



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN AGUA Y  
SEDIMENTO DEL RÍO BALUARTE, SINALOA, MÉXICO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS**

PRESENTA:  
**JACQUELINE HERNÁNDEZ ANGELES**

**TUTOR(A) O TUTORES PRINCIPALES:**

DR. CARLOS RENÉ GREEN RUÍZ  
BIOGEOQUÍMICA AMBIENTAL Y SEDIMENTOLOGÍA (BGAS), UNIDAD ACADÉMICA  
MAZATLÁN, INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

**COMITÉ TUTOR:**

DR. JOSÉ ROBERTO RIVERA HERNÁNDEZ  
LABORATORIO DE MICROPLÁSTICOS, UNIDAD ACADÉMICA MAZATLÁN, INSTITUTO  
DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM  
DR. JORGE FELICIANO ONTIVEROS CUADRAS  
UNIDAD ACADÉMICA PROCESOS OCEÁNICOS Y COSTEROS, INSTITUTO DE  
CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM  
DRA. MARIANA VELLOSA CAPPARELLI  
ECOFISIOLOGÍA Y ECOTOXICOLOGÍA, ESTACIÓN EL CARMEN, INSTITUTO DE  
CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM  
DRA. CECILIA ROBLES MENDOZA  
UMDI-SISAL, UNAM

**MÉXICO, MAZATLÁN, MARZO, 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# **PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN AGUA Y SEDIMENTO DEL RÍO BALUARTE, SINALOA, MÉXICO**

## **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS**

PRESENTA:  
**JACQUELINE HERNÁNDEZ ANGELES**

### **TUTOR(A) O TUTORES PRINCIPALES:**

DR. CARLOS RENÉ GREEN RUÍZ  
BIOGEOQUÍMICA AMBIENTAL Y SEDIMENTOLOGÍA (BGAS), UNIDAD ACADÉMICA  
MAZATLÁN, INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

### **COMITÉ TUTOR:**

DR. JOSÉ ROBERTO RIVERA HERNÁNDEZ  
LABORATORIO DE MICROPLÁSTICOS, UNIDAD ACADÉMICA MAZATLÁN, INSTITUTO  
DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM  
DR. JORGE FELICIANO ONTIVEROS CUADRAS  
UNIDAD ACADÉMICA PROCESOS OCEÁNICOS Y COSTEROS, INSTITUTO DE  
CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM  
DRA. MARIANA VELLOSA CAPPARELLI  
ECOFISIOLOGÍA Y ECOTOXICOLOGÍA, ESTACIÓN EL CARMEN, INSTITUTO DE  
CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM  
DRA. CECILIA ROBLES MENDOZA  
UMDI-SISAL, UNAM

**MÉXICO, MAZATLÁN, MARZO, 2024**

## AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

- Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, y a todo su personal, por hacer del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología - Unidad Mazatlán una segunda casa, por brindarme en todo momento el apoyo para la realización de mis objetivos académicos.
- A CONAHCYT por otorgarme la beca nacional de Maestría CVU: 910610.
- A mi tutor principal, el Dr. Carlos René Green Ruíz, por mostrar en todo momento disposición para dirigir y alentar mi crecimiento académico y mi formación como científica, por hacer su trabajo con una virtud docente única, y por ser siempre un ejemplo de integridad.
- Al Dr. José Roberto Rivera Hernández, por su ayuda tanto en campo como en la etapa de análisis, por otorgándome en todo momento su valiosa retroalimentación y contribución.
- A cada uno de los miembros del jurado:
  - Al Dr. Jorge Ontiveros por su atención siempre oportuna y su visión, clara y concisa.
  - A la Dra. Cecilia Robles, por alentarme a la incesante exploración y al enriquecimiento del presente trabajo.
  - A la Dra. Mariana Capparelli, por tan acertados comentarios y por sus siempre pertinentes y cálidas aportaciones.
  - Y de nuevo al Dr. Roberto Rivera, por su cooperación y apoyo durante toda esta etapa, así como por impulsarme a hacer mejoras en este trabajo.
- Al M. en C. Sergio Rendón Rodríguez por su invaluable colaboración durante la etapa de muestreo. Así como, a la Dra. Daniela Alvarado por su refuerzo en laboratorio.

# AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se lo dedico con todo mi corazón a mi familia, que siempre me brinda el soporte necesario para que yo goce de la libertad de explorar mi vida, de escribirla a pulso, según siento y camino. La libertad suficiente para poder elegir dónde pongo mi energía, y que este sea un lugar donde se sienta expandida. Son maestros. Son raíz.

También, gracias Melo por tu compañía en esta aventura, por ayudarme a entender el poder de la comunicación. Gracias Lau por tu amistad sincera.

Y gracias a la vida por revelarme el vasto amor que la constituye a cada paso, porque el camino que recorro está siempre repleto de flores, seres sumamente mágicos. Siempre conectando y reconectando con seres llenos de calidez.

¡Gracias!

*“Gran fuerza del espíritu abuelo Imox, permítenos entrar en la mente pura e inteligente, en aquella que sabe escuchar, ver y sentir a los otros, esa mente en la que todos podemos convivir en un estado de común acuerdo, podemos fluctuar entre las diferencias de nuestros espíritus y necesidades, tanto espirituales como materiales...Permite que volvamos a escuchar a la madre tierra, que escuchemos sus consejos, y nos hagamos fuertes a través de sus enseñanzas. Que no pasemos por alto el dolor de una planta, de un animal, de una piedra, de nuestros conocidos y desconocidos. Danos el rezo adecuado con las palabras necesarias para orar al agua, para devolver la vida a los bosques. Trae el entendimiento para cuidar los árboles, haciendo que estos estén siempre frondosos, llenos de vida, que no se sequen, y los ríos sean fecundos, limpios y dadores de vida silvestre y vegetal.*

*No nos permitas entrar en la idiotez del pensamiento mundano y egoísta, mantennos centrados en lo que es verdaderamente importante y debemos aplicar toda la atención...Danos ríos limpios y tierras fértiles enseñando al hombre de la ciudad el cuidado de estos elementos que nos forman y nos dan vida, vida que, sin ellos, no sería posible.”*

*El Latido Nawal Maya  
(Makuna Mawe & Zazil Ik,2020)*

*“L’originalitat consisteix a tornar a l’origen”*

*Antoni Gaudí*

# ÍNDICE

RESUMEN .....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN .....	12
ANTECEDENTES .....	15
JUSTIFICACIÓN .....	16
HIPÓTESIS.....	16
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	17
OBJETIVOS.....	17
OBJETIVOS PARTICULARES .....	17
ÁREA DE ESTUDIO .....	18
MÉTODOS.....	19
Muestreo .....	20
<i>Parámetros fisicoquímicos</i> .....	21
<i>Agua</i> .....	21
<i>Sedimento</i> .....	22
Observación e identificación .....	22
Control de calidad .....	23
Análisis estadísticos.....	24
RESULTADOS .....	25
Agua .....	25
<i>Caracterización físico-química del agua del río Baluarte</i> .....	25
<i>Concentración y caracterización física de PPP en agua</i> .....	29
Sedimento.....	38
<i>Caracterización granulométrica</i> .....	38
<i>Concentración y caracterización física de PPP en sedimento</i> .....	40
Caracterización química .....	48
DISCUSIÓN.....	53
Parámetros fisicoquímicos en agua de la CRB .....	53
Caracterización física de PPP .....	56
<i>Forma</i> .....	56
<i>Color</i> .....	57

<i>Tamaño</i> .....	58
Variación temporal de concentraciones de microplásticos.....	59
<i>Agua</i> .....	59
<i>Sedimento</i> .....	61
Caracterización química .....	63
CONCLUSIONES .....	69
RECOMENDACIONES.....	70
REFERENCIAS.....	72
ANEXO.....	78

# ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Mapa de sitios de muestreo a lo largo de las zonas media y baja de la Cuenca del Río Baluarte.....	20
Fig. 2. Turbidez observada en los sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas y de lluvias. ....	25
Fig. 3 Sólidos Totales Disueltos [ppm] observados en los sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas y de lluvias. Poner atención al cambio de orden de magnitud en el eje Y de la figura correspondiente a la confluencia. .	26
Fig. 4 Concentración de oxígeno disuelto [ $\text{mg L}^{-1}$ ] observada en los sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas y de lluvias. ....	27
Fig. 5 Conductividad específica [ $\mu\text{S cm}^{-1}$ ] observada en los sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas y de lluvias. Poner atención al cambio de orden de magnitud en el eje Y de la figura correspondiente a la confluencia. ....	28
Fig. 6 Mapa con concentraciones encontradas en los diferentes sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas.....	29
Fig. 7 Diagrama de porcentajes de distribución de las diferentes formas de PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	31
Fig. 8 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes colores encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	32
Fig. 9 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes tamaños encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	33
Fig. 10 Mapa con concentraciones de PPP encontradas en los diferentes sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de lluvia.....	34
Fig. 11 Diagrama de porcentajes de distribución de las diferentes formas de PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	35
Fig. 12 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes colores encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	36
Fig. 13 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes tamaños encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	37
Fig. 14 Granulometría encontrada en los sitios de muestreo en la Cuenca del Río Baluarte. Arriba durante temporada de secas y abajo durante lluvias. ....	39
Fig. 15 Mapa de concentraciones de PPP encontradas en los diferentes sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de estiaje.....	40
Fig. 16 Diagrama de porcentajes de distribución de las diferentes formas de PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	41
Fig. 17 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes colores encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	42
Fig. 18 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes tamaños encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	43
Fig. 19 Mapa con concentraciones encontradas en los diferentes sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de estiaje.....	44
Fig. 20 Diagrama de porcentajes de distribución de las diferentes formas de PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	45
Fig. 21 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes colores encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	46

Fig. 22 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes tamaños encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.....	47
Fig. 23 Distribución de posibles partículas plásticas (PPP) analizadas entre microplásticos y otro tipo de micropartículas de la Cuenca del Río Usumacinta.....	48
Fig. 24 Distribución entre los diferentes polímeros encontrados en las muestras de agua en la Cuenca del Río Baluarte. Arriba durante la temporada de estiaje y abajo durante lluvias.....	50
<i>Fig. 25 Distribución entre los diferentes polímeros encontrados en las muestras de sedimento en la Cuenca del Río Baluarte. Arriba durante la temporada de estiaje y abajo durante lluvias.....</i>	<i>52</i>
Fig. 26 Concentraciones de MP encontradas en agua superficial en los sitios de muestreo en la Cuenca del Río Baluarte. ....	60
Fig. 27 Comparación de las concentraciones de MP encontradas en sedimento en las dos diferentes temporadas de muestreo en la Cuenca del Río Baluarte.....	62
Fig. 28 Porcentaje de algodón encontrado a lo largo del estudio en las diferentes matrices analizadas. ....	64

## RESUMEN

Dada la inquietante alerta que existe en torno a la posible toxicidad que representan los microplásticos en el ambiente, a lo largo de las últimas dos décadas, se han realizado impetuosos esfuerzos por entender más acerca de los microplásticos en el planeta Tierra: presencia y distribución en diferentes matrices ambientales, dinámica y rutas de movilidad, entre otros muchos elementos e incógnitas que aún son materia de estudio. El presente trabajo es el primero centrado en el estudio de la presencia y distribución de microplásticos en un ambiente lótico exorreico de la vertiente del Pacífico Mexicano tropical, específicamente en agua superficial y sedimento de la Cuenca del Río Baluarte. En agua superficial, un promedio de 0.23 PPP L<sup>-1</sup>, durante ambas temporadas, fue observado, mostrando que no existen diferencias significativas. Durante la temporada de lluvias, se encontró una concentración promedio de microplásticos de 0.11 partículas L<sup>-1</sup>. Por otro lado, en sedimento, los resultados arrojaron concentraciones promedio de 139.2 y 66.7 partículas kg<sup>-1</sup> para la temporada de secas y lluvias, respectivamente; observando diferencias significativas entre ambas temporadas. La mayoría de las micropartículas analizadas, presentaron forma de fibras y, colores azul claro y transparente. Tanto en agua como en sedimento, generalmente, se presentaron PPP de tamaño mayor a 100 µm. El polietileno tereftalato (PET) fue el polímero más encontrado, en ambos compartimentos ambientales, seguido por el celofán y el rayón. Se presume que en general, los microplásticos encontrados en el sistema fluvial de la Cuenca del Río Baluarte pueden proceder de la descarga de aguas residuales domésticas, de la agricultura, la pesca, de basura vertida en suelos, así como de la construcción de infraestructura hidrológica en la zona. Se recomienda la aplicación de mejores métodos de extracción de microplásticos, así como la ubicación de sitios de muestreo que se encuentren a distancias variables de asentamientos humanos. Sería interesante tomar medidas de control en ríos de primer orden de la cuenca del río Baluarte, así como la implementación de controles positivos y negativos.

## ABSTRACT

Given the concerning alert about the potential high toxicity of microplastics in the environment, in recent years, significant efforts have been made to understand more about microplastics on Earth. These include where they are found in higher concentrations, their transport pathways, their occurrence in a diversity of organisms, and many other questions that still need to be answered. The present work is the first one to focus on the study of microplastics in a lotic exorheic environment in the tropical Mexican Pacific region. In this study, the occurrence, temporal variation, and chemical composition of microplastics found in the surface water and sediment of rivers of different orders in the Baluarte River Basin were investigated. In surface waters, an average of 0.23 microplastic-like particles (PPP, in Spanish) per liter were found during both seasons, showing no significant differences between them. During the rainy season, there was an average microplastic concentration of 0.11 particles per liter. For sediment, the results showed average concentrations of 139.2 and 66.7 microplastic particles per kilogram for the dry and rainy seasons, respectively, with significantly higher concentrations of microplastics during the dry season. Most of the analyzed microparticles were fibers of light blue and transparent colours. Polyethylene terephthalate (PET) was the most found polymer in both environmental compartments, followed by cellophane and rayon. It is concluded that, in general, the microplastics found in the fluvial system of the Baluarte River Basin may come from the discharge of domestic wastewater, agriculture, fishing, garbage dumped on land, as well as the construction of hydrological infrastructure in the area. For future, more detailed studies, it is recommended to increase the number of sampling sites at varying distances from human settlements and to explore better methods for microplastic extraction. It would be interesting to implement control measures in first-order rivers of the Baluarte River Basin.

# INTRODUCCIÓN

El plástico se ha convertido en un material ampliamente usado en la vida moderna debido a su baja conductividad térmica, alta resistencia, durabilidad, bajo peso, a sus propiedades bioinertes y bajo costo (Van Cauwenberghe et al., 2015). Se estima que la producción mundial de plástico en el año 2012 fue de 288 millones de toneladas (PlasticsEurope, 2013). Para el 2021, se estimó que esta cifra había alcanzado los 390.7 millones de toneladas, mostrando un efecto de *rebote* después de la pandemia por COVID-19 (375.5 millones de toneladas producidas en 2020), (PlasticsEurope, 2022); lo anterior refleja también el crecimiento exponencial en la demanda de dicho material. Además, resulta pertinente señalar como causa fundamental de producción, posterior desecho y, por tanto, fuente de microplásticos al uso de este material en el embalaje y empaquetado de otros productos (Moore, 2008). Para el 2019, el embalaje representó casi el 40 % de la demanda de plástico en Europa (PlasticsEurope, 2020).

Aunado a esto, globalmente los sistemas de manejo de residuos siguen siendo deficientes e insuficientes, aunque de forma diferenciada regionalmente, para enfrentar el problema de contaminación que deriva del desecho de plásticos. En algunas regiones los vertederos son la primera opción de destino final de estos residuos (PlasticsEurope, 2020). En el año 2021, se calculó que solo el 10 % (32.5 millones de toneladas) de la producción total del plástico fue reciclado (PlasticsEurope, 2022).

Una consecuencia inevitable del actual uso generalizado del plástico, tanto en la vida diaria como en la industrial, es que millones de toneladas por año de este material entran a ambientes marinos. En 2010 se estimó que de 4.8 a 12.7 millones de toneladas entraron a los océanos (Jambeck et al., 2015; Agamughu, 2018). Como expertos confirman, las tendencias de aumento en las concentraciones de microplásticos halladas en ambientes acuáticos y la producción de plástico mundialmente están ligadas (Simon-Sánchez et al., 2022). En términos de la composición global de la basura vertida en ambientes marinos, se ha estimado que los plásticos representan de un 66 a un 79 %. A su vez, los plásticos representan un 65.9 % de la composición de basura en el fondo marino y 78.5 % de la basura encontrada en superficie (Tekman et al., s.f.).

Una vez dentro del océano, los plásticos son expuestos a diferentes factores físico químicos que les generan cambios morfológicos, es decir, los erosionan. Tales factores pueden ser la abrasión por oleaje, radiación UV, salinidad, pH, por mencionar algunos. Los

microplásticos que resultan de estos procesos de interperismo y erosión son conocidos como microplásticos secundarios. En contraparte, se reconoce como microplásticos primarios a aquellos que han llegado al ambiente en el que se encuentran contaminando por vertido directo. Un ejemplo de ello son los derrames de microesferas (pellets) plásticas que sirven como materia prima para la producción de otros plásticos (Van Cauwenberghe et al., 2015).

Según Boucher y Friot (2017), las principales fuentes directas de microplásticos son, en orden de importancia: (1) derrames de pellets de plástico (partículas de 2-5 mm), (2) el lavado de textiles sintéticos, (3) la abrasión de llantas de automóviles y pinturas usadas en carreteras (y su posterior lavado y escorrentía a cuerpos de agua), (4) el intemperismo que sufren los revestimientos de embarcaciones marinas comerciales o de uso recreativo, (5) el uso de microperlas en productos de cuidado personal y, (6) el polvo de ciudad, como recientemente se le ha nombrado al conjunto de residuos que un ambiente urbano puede generar y hacer llegar a ambientes acuáticos en forma de polvo (por abrasión de objetos de uso frecuente e infraestructura, uso de detergentes, entre otros).

Por otro lado, plásticos que van de 1 a 1000  $\mu\text{m}$  son llamados microplásticos pequeños (también nombrados micro-nanoplásticos). Las partículas de plástico de tamaños mayores a 1000  $\mu\text{m}$  pero menores a 5000  $\mu\text{m}$  reciben el nombre de microplásticos grandes (EU MSDF, 2013).

Dada su alta persistencia, ubicuidad y su capacidad para interactuar con medio biótico y abiótico, los microplásticos se convierten en un material potencialmente tóxico (Waring et al., 2018). Estudios confirman el potencial consumo de microplásticos por organismos que habitan en agua y sedimentos (Wright et al., 2013; Capparelli et al., 2022), por lo que se suele considerar a estos como bio-indicadores de contaminación por microplásticos. También, se ha demostrado que los microplásticos pueden retenerse y bioacumularse en organismos, traslocarse entre tejidos e incluso tener transferencia trófica, fenómenos que desencadenan efectos adversos en la salud de dichos organismos, tales como menores tasas de crecimiento, respuestas inflamatorias, alimentación reducida, menor cantidad de energía, y hasta defectos en el desarrollo (Murray y Cowie, 2011; Wegner et al., 2012; Farrell and Nelson, 2013; Della Torre et al., 2014; Kutralam-Muniasamy et al., 2023).

Sobre la distribución de los microplásticos, se ha encontrado que suelen presentarse concentraciones mucho más elevadas en sedimento, respecto a las concentraciones

encontradas en agua, esto dada su alta capacidad de adsorción de otras partículas, lo que disminuye su capacidad de flotabilidad y facilita su hundimiento (Van Cauwenberghe et al., 2015). En sedimentos oceánicos, a 5000 m de profundidad, se han encontrado concentraciones de más de 2000 partículas por m<sup>2</sup> (Fisher et al., 2015). En playas altamente impactadas se ha reportado que hasta 3.3 % del peso total seco de muestra de sedimento corresponde a microplásticos (Carson et al., 2011).

En contraparte, a pesar de que los ríos representan una fuente sustancial de microplásticos hacia los océanos, pues se estima que hasta el 80 % del plástico presente en ambientes marinos llega por medio de estos, el estudio de microplásticos en ambientes lóticos sigue siendo menos común que en ambientes marinos (GESAMP, 2010 en Rodrigues et al., 2018).

La Cuenca del Río Baluarte, ubicada en el noroeste mexicano, drena hacia el río Baluarte, el cual tiene su desembocadura en el municipio de El Rosario, Sinaloa, hacia el Golfo de California (Pacífico Central del Este). Dicho río, además, se ubica al norte de Marismas Nacionales, sitio RAMSAR, considerado por su amplia extensión de mangle, por ser lugar de anidación y migración de aves; así como su gran diversidad endémica de flora y fauna (SEMARNAT, 2017).

Lo anterior pone de manifiesto la importancia de realizar estudios que indaguen sobre el estado de degradación ambiental de la Cuenca del Río Baluarte. Además, es importante mencionar que en la zona se realiza minería, pues este tipo de industria suele estar asociada a la descarga de metales pesados en sistemas fluviales. Como anteriormente se menciona, dada la alta capacidad de adsorción con la que cuentan los microplásticos, los problemas de toxicidad por otros contaminantes pueden ser potenciados (Tang et al., 2021). Lo anterior apunta hacia la emergente necesidad de contar con conocimiento claro respecto a la presencia y distribución de microplásticos en los ríos de la cuenca.

Por lo tanto, la finalidad de este trabajo es realizar un primer acercamiento al estudio de microplásticos en la Cuenca del Río Baluarte, con el fin de conocer más acerca de las condiciones de deterioro que presenta la región, dada la presencia de industrias, actividad minera, acuícola, ganadera, construcción de presas, cambio de uso de suelo para agricultura y la urbanización que se ha dado en la región a lo largo de las últimas décadas (INECC-FONNOR, 2018).

## ANTECEDENTES

El estudio de la contaminación por microplásticos es un tema global que ha atraído la atención de la sociedad en general a nivel mundial. Diversos estudios han demostrado la presencia y distribución de microplásticos en diferentes ambientes, principalmente en ambientes marinos. Sin embargo, también se han realizado algunos esfuerzos para entender el comportamiento de los microplásticos en ambientes lóticos, a lo largo de Europa, Asia, Norte y Sur América (Rech et al., 2014; Ivar do Sul et al., 2014; Rodrigues et al., 2018; Ding et al., 2019; Mao et al., 2020); siendo el continente asiático el que muestra el mayor número de trabajos enfocados al estudio de los microplásticos en ambientes lóticos (Cera et al. 2020).

En lo que respecta a México, diversos estudios en zona costera del sureste del país han sido llevados a cabo (Quesada-Rojas et al., 2021; Cruz-Salas et al., 2022; Capparelli et al., 2022). Sólo un estudio de microplásticos en ambiente lótico se ha realizado (Shruti et al., 2019). Dicho estudio analizó la concentración y caracterización física de microplásticos en sedimento de la Cuenca del Río Atoyac, que incorpora a la ciudad de Puebla, misma que cuenta con relevante actividad industrial. Se encontraron concentraciones de hasta  $333.33 \pm 17.38$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ , y concentraciones acumuladas de hasta  $1633.34 \pm 202.56$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ .

Existen diversos estudios en las costas del Pacífico Mexicano (Retama et al., 2016; Piñón-Colin et al., 2018; Jonathan et al., 2021; Arreola-Alarcón et al., 2022). Específicamente, en zonas aledañas al área de estudio del presente trabajo se han realizado sólo algunas investigaciones sobre la acumulación de microplásticos (i.e., Ríos-Mendoza et al., 2021; Alvarado-Zambrano et al., 2023)

Ríos-Mendoza et al., (2021) encontró que, en el sur del estado de Sinaloa, la vulnerabilidad de la zona costera suele aumentar durante eventos de precipitación, y a su vez, en ciudades altamente impactadas por el turismo, es posible percibir picos de contaminación por microplásticos durante temporadas de alta actividad turística. Los microplásticos más abundantes en su estudio fueron el polipropileno, polietileno y el polietileno tereftalato. En playa Espíritu, Escuinapa, sitio más cercano a la zona de estudio de la presente investigación, se encontraron concentraciones de  $0.46 \pm 0.05$  y de  $0.31 \pm 0.03$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ .

Finalmente, en Alvarado-Zambrano et al., (2023) se estudió la presencia de microplásticos en agua subterránea de una zona aledaña a la Cuenca del Río Baluarte, encontrando que las concentraciones variaban de 10 a 34 partículas L<sup>-1</sup>, con un promedio de 18.3 partículas L<sup>-1</sup>. Además, se encontró la presencia de cuatro diferentes polímeros: polipropileno isostático, hidroxietilcelulosa, cloruro de polivinilo carboxilado y polietileno de baja densidad. Se sugirió a la actividad agrícola y aguas de desecho doméstico como potenciales fuentes de contaminación.

Con base en lo anterior, y destacando la laxa literatura existente sobre el estudio de microplásticos en ambientes lóticos y en México, la presente investigación cobra relevancia e interés. Este trabajo es el primer estudio realizado en agua y sedimento de un sistema fluvial del noroeste tropical de México.

## JUSTIFICACIÓN

Dada la naturaleza emergente del estudio de microplásticos a nivel global, resulta primordial aportar al desarrollo de conocimiento en el área. En la presente investigación se trabajó en ambientes lóticos, ámbito aún poco estudiado. A su vez, se aportó información referente a latitudes tropicales mexicanas, la cual es aún laxa, fomentando así el mejor entendimiento de dicho contaminante a nivel general. Además, la realización del presente estudio condujo a una evaluación más amplia del potencial tóxico que existe en la región sur del estado de Sinaloa y su zona marina de influencia. El presente estudio planteó las primeras bases para la identificación de principales fuentes de contaminación de microplásticos en la Cuenca del Río Baluarte.

## HIPÓTESIS

- Debido a las actividades antropogénicas que se realizan en la Cuenca del Río Baluarte (CRB), como son la agricultura, acuicultura, ganadería y minería, se espera la presencia de microplásticos en agua y sedimento de la CRB.

- Debido a la ubicación de dichas actividades antropogénicas, así como a la morfología y dinámica propia del río Baluarte, se esperan mayores concentraciones en zona baja de la cuenca.
- Dado el aumento de caudal y arrastre superficial durante la temporada de lluvias, se espera encontrar mayores concentraciones de microplásticos durante esta temporada del año, tanto en agua como en sedimento.

## PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Qué concentraciones de microplásticos se encuentran en agua y sedimento de la cuenca del río Baluarte y sus tributarios?

¿En qué zona de la cuenca se encuentran mayores concentraciones de microplásticos?

¿Qué tipo de microplásticos (composición, forma) se encuentran en el río principal de la Cuenca del Río Baluarte y sus tributarios, y cuáles cuentan con mayor representación?

¿Cómo varían las concentraciones de microplásticos entre las temporadas de lluvias y secas?

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Evaluar la presencia, distribución y composición de microplásticos en agua y sedimento de la Cuenca del Río Baluarte.

### OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar la presencia y distribución de microplásticos en agua superficial y sedimento a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte (CRB).
- Caracterizar morfológicamente (color, tamaño y forma) los microplásticos encontrados en agua y sedimento de la CRB.
- Caracterizar la composición polimérica de los microplásticos presentes en la CRB.
- Definir qué microplásticos tienen mayor presencia en la CRB.
- Evaluar si existe un cambio temporal en las concentraciones, distribución y composición de los microplásticos a lo largo de la CRB.

## ÁREA DE ESTUDIO

La Cuenca del Río Baluarte (CRB) se localiza al noroeste de México, entre los 21° 24' 00" y los 23° 52' 48" N y los 106° 06' 00" y los 103° 44' 24" W (Ruelas-Inzunza et al., 2011). La CRB se encuentra ubicada en la vertiente continental del Golfo de California, distribuida entre dos provincias fisiográficas: la Sierra Madre Occidental con un 93 % de la cuenca y la Llanura Costera del Pacífico con un 7 % de la cuenca. La superficie completa es de 5 100 km<sup>2</sup> y está conformada por los estados de Sinaloa (55.64 %), Durango (44.02 %) y Nayarit (0.34 %) (INECC-FONNOR, 2018).

En la CRB, la mayor elevación registrada es de 2927 msnm y la menor es de 0 msnm, con una elevación promedio de 982 msnm. La CRB presenta grandes contrastes de relieve, la máxima pendiente es de 76 grados y la pendiente promedio de 22 grados. Esta cuenca se considera muy compleja, debido a las ramificaciones que presenta su red hidrográfica. El cauce principal del río Baluarte tiene una longitud total de 191 km, con longitud total de cauces de 13067 km. La CRB se divide en tres zonas funcionales, cuenca alta con el 35 % de la superficie, cuenca media con el 57.5 % y cuenca baja con 7.5 % (INECC-FONNOR, 2018).

El Río Baluarte ocupa el tercer lugar en escurrimiento a nivel estatal (Sinaloa, México), con un promedio anual de 1519.3 millones de m<sup>3</sup>, un máximo de 3046 millones de m<sup>3</sup> y un mínimo de 675 millones de m<sup>3</sup> (Zavala-Nevárez, 2009). En la zona, según la clasificación climática de Köppen modificada por García (1964), predomina el clima cálido subhúmedo (55 %), aunque presenta siete climas más, esto dada la alta variabilidad de altitud con la que cuenta. Dicho clima se encuentra en la cuenca baja y en la parte inferior de la cuenca media. En general, la CRB tiene una precipitación promedio anual de 1468 mm, con mínimos de 712 mm y máximos de 1508 mm (INECC-FONNOR, 2018).

Según INEGI (2020) las localidades más importantes en la zona son: El Rosario, Sinaloa (17097 habitantes), en la cuenca baja y La Ciudad, Durango (2697 habitantes), en la cuenca alta. Otros poblados son: Ojo de Agua, Matatán, Copales, Aguacate, San Rafael, Apoderado, Cofradía, Majahual, La Reforma, Nieblas, Pozole, San Pedro Chametla, Agua Verde y Jarillo (CNDM, 1988).

En la CRB, la principal actividad económica es la agricultura y la ganadería. Los cultivos con mayor representación son el sorgo forrajero, pastos, coco, chile, tomate, maíz

y mango (INECC-FONNOR, 2018). Asimismo, la cuenca cuenta con actividad minera, misma que tuvo un crecimiento exponencial durante los últimos 80 años (Ruelas-Inzunza et al., 2011). Otras actividades económicas que se realizan son la camaronicultura, el empaquetado de mariscos, pesquería y turismo. Además, el río Baluarte tiene tres presas: una de desvío (Lic. Genaro Estrada 'El Tamarindo'), y dos presas auxiliares utilizadas como reservorios (Las Higueras 'Tortugas' y Agustina Ramírez 'El Peñón'). Recientemente, se aprobó un proyecto para construir la presa hidroeléctrica Santa María, la cual está en etapa de construcción y por iniciar actividades (Hernández-Guzmán et al., 2018 en INECC, 2018). En conjunto, todas estas actividades representan diversos impactos antropogénicos en los recursos lóticos de la cuenca, y, en consecuencia, se podría vislumbrar la presencia de microplásticos en los diferentes reservorios del sistema.

## MÉTODOS

Se realizaron dos muestreos a lo largo de la CRB, representativos de las temporadas de secas (mayo de 2022) y de lluvias (noviembre de 2022), para dilucidar el impacto de la contaminación por microplásticos en diferentes zonas de la cuenca.

Se eligieron 17 sitios de muestreo, según su cercanía a zonas mineras o asentamientos urbanos (Fig. 1; Anexo: Tabla 1). De estos 17 sitios, 7 se localizaron sobre el río principal y 10 en algunos de sus ríos tributarios más importantes. Se consideró que con este número de sitios se podría representar el estado de contaminación por microplásticos de la CRB en sus zonas media y baja. Así mismo, se consideró al sitio El Nacaral (NAC) como sitio control al encontrarse en una zona poco impactada, (86 – 100 % de vegetación natural según INECC-FONNOR, 2018).

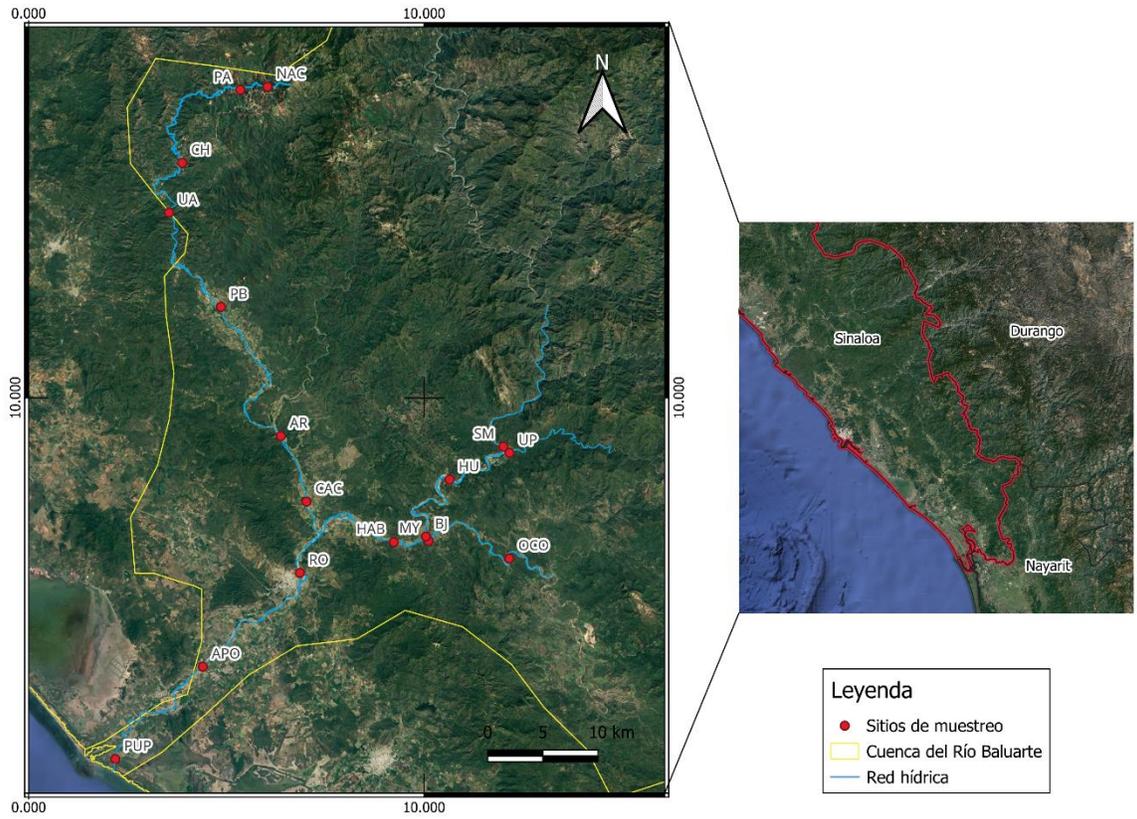


Fig. 1. Mapa de sitios de muestreo a lo largo de las zonas media y baja de la Cuenca del Río Baluarte

## Muestreo

Se realizaron muestreos de agua y sedimento. Para las muestras de agua, se hizo un transecto perpendicular a la línea de costa del canal y se tomaron muestras en tres puntos (margen izquierdo, derecho, y al centro), generando un triplicado por sitio. En sitios donde el canal era muy reducido debido a la temporada de estiaje, sólo se tomaron muestras en un punto. Se colectó un total de 30 L de agua por muestra con ayuda de una jarra de vidrio y dicho volumen se filtró a través de un tamiz de acero inoxidable con abertura de malla de 63 µm (Rodrigues et al., 2018). En ambos casos, tanto en temporada de secas como en lluvias, el material retenido en el tamiz fue enjuagado con agua tridestilada y transferido a un frasco de vidrio de medio litro para su almacenamiento y transporte al laboratorio. Durante la temporada de lluvias se estimó la velocidad de la corriente superficial con ayuda de un cronómetro, un metro como unidad de referencia y una esfera flotante.

Las muestras de sedimento fueron colectadas en los primeros 15 cm de profundidad del lecho con una draga tipo Van Veen, cuando el lecho así lo permitía. En caso de no funcionar la draga, se hizo uso de una cuchara de acero inoxidable para la toma de muestra.

Una submuestra de aproximadamente 500 g fue tomada del centro de la draga, cuidando no raspar sus paredes, y fue almacenada en frascos de vidrio para su posterior análisis (Rodrigues et al., 2018). Todas las muestras fueron puestas en refrigeración (4 °C aprox.) para su posterior tratamiento en laboratorio.

### *Parámetros fisicoquímicos*

Se tomaron algunos parámetros fisicoquímicos en cada sitio de muestreo: i) pH, temperatura (°C), sólidos totales disueltos (STD) y conductividad eléctrica (EC) con ayuda de una sonda multiparamétrica HANNA™ modelo HI98311 EC/TDS/Temperature Tester; ii) turbidez con el uso de un turbidímetro portable marca HANNA™ modelo HI93703; y, iii) oxígeno disuelto con ayuda de una sonda marca YSI™ modelo DO200A (EcoSense). Todas las sondas usadas se enjuagaron con agua tridestilada antes de su uso.

### Tratamiento de muestras en laboratorio

Todas las muestras, tanto de agua como sedimento, fueron sometidas a tres diferentes etapas (digestión, flotación y filtración) para conseguir la extracción de las partículas de microplásticos. A continuación, se detallan cada una de las etapas de extracción:

Con la finalidad de eliminar la presencia de materia orgánica tanto a las muestras de agua, como de sedimento, se les aplicó una digestión. Esta se realizó con ayuda de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) al 30 %, durante 24 horas, a 70 rpm y a 65° C (Prata et al., 2019). Se agregó en un volumen de 1:1 (muestra:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30 %) aproximado. En el caso del sedimento fue necesario dejar las muestras en digestión por 48 horas o más (hasta 72 horas).

### *Agua*

Después del proceso de digestión, fueron añadidos 250 ml de solución de cloruro de sodio (NaCl) a 1.2 g cm<sup>3</sup> (Hidalgo-Ruz et al., 2012), para así separar por densidad los microplásticos presentes en la muestra. Las muestras se mezclaron durante dos minutos con una cuchara de acero inoxidable y se dejaron reposar durante 24 horas. Transcurrido este tiempo el material flotante fue recuperado por decantación y filtrado con ayuda de filtros

GF/F de 0.7  $\mu\text{m}$  y una bomba de vacío (Wang et al., 2017). Una vez terminada dicha filtración, los filtros fueron colocados en cajas Petri de cristal y llevados a secado, a 50 °C por 24 horas (Ding et al., 2019). Una vez secos, se procedió a su observación bajo estereomicroscopio.

## *Sedimento*

Las muestras de sedimento fueron sometidas primero a secado, a 65 °C durante 48 horas (Ding et al., 2019). Después, las muestras fueron homogeneizadas con ayuda de una cuchara de acero inoxidable y se tomaron tres submuestras de 10 g de cada una; cada submuestra fue llevada a digestión como se especificó previamente. Posteriormente, a cada submuestra se le agregaron 300 ml de solución salina (NaCl) a 1.2 g  $\text{cm}^3$  y se homogeneizaron, agitándolas durante dos minutos con una cuchara de acero inoxidable; se dejaron reposar por 24 horas (Rodrigues et al., 2018). Transcurrido ese tiempo, se recuperó el sobrenadante con ayuda de una pipeta y se filtró de igual manera con filtros GF/F con 0.7  $\mu\text{m}$  de abertura; los filtros se secaron durante 24 horas a 25 °C y posteriormente fueron observados bajo el estereomicroscopio.

A cada una de las muestras se les realizó análisis granulométrico como a continuación se describe: un total de 100 g en peso seco de cada muestra fue tamizado a través de mallas con 5 diferentes tamaños de abertura: 1.5 mm, 0.5 mm, 0.250 mm, 0.125 mm y 0.063 mm. Así se pudo clasificar el material colectado entre: i) arena gruesa, ii) arena media, iv) arena fina, v) arena muy fina y vi) limo.

## Observación e identificación

Posteriormente, los filtros recuperados de cada una de las muestras fueron observados bajo estereomicroscopio para que todas las posibles partículas plásticas (PPP) halladas fueran contabilizadas y clasificadas según su forma, color y tamaño (Hidalgo-Ruz et al., 2012); se tomó registro fotográfico de cada una de las PPP encontradas. En el caso de las muestras de agua, la unidad de medida de concentración usada fue partículas por

litro (partículas L<sup>-1</sup>). En el caso de las muestras de sedimento, la unidad que se usó fue partículas por kilogramo (partículas kg<sup>-1</sup>).

Finalmente, las PPP fueron analizadas en un Espectroscopio de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR-ATR) marca Thermo Scientific™ modelo Nicolet™ iN™10 MX, con la finalidad de confirmar su composición polimérica. Se utilizaron las librerías: i) HR Spectra Polymers and Plasticizers by ATR (Copyrigh 2008 Thermo Fisher Scientific Inc. for Nicolet FT-IR). Rango 401 - 4000 cm<sup>-1</sup>, ii) Hummel Polymer Sample Library (Copyrigh 1988, 2004, 2008 Thermo Fisher Scientific Inc. for Nicolet FT-IR). Rango 455 - 3996 cm<sup>-1</sup> y iii) Microplastics\_ICML (ICML, 2022). Rango 675 - 4000 cm<sup>-1</sup>, para hacer coincidir los espectros de las PPP con los espectros IR de referencia de cada tipo de polímero. La última librería mencionada es desarrollada por el Laboratorio de Microplásticos del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Mazatlán.

## Control de calidad

Todo tratamiento realizado en el laboratorio se hizo sobre superficies limpias, dentro de una campana de flujo laminar y cuidando que la persona que manipulara las muestras vistiera siempre bata de laboratorio de algodón (Masura et al., 2015). Todas las soluciones usadas durante el tratamiento de las muestras fueron previamente filtradas con ayuda de filtros GF/F de 0.7 µm de abertura para así evitar contaminación de las muestras. Sólo se usó material de vidrio para el almacenamiento de las muestras, antes y después de la extracción de MP. Todo material se enjuagó antes de ser usado con agua tridestilada. Para la solución salina se hizo uso de sal de mesa común marca “La Fina”.

Durante el muestreo, se realizaron controles de campo (blancos) en algunos sitios al azar utilizando agua tridestilada previamente filtrada. Se vació dicha agua a frascos iguales a los que se utilizaron para almacenar las muestras. Estos blancos se procesaron igual que las muestras. En laboratorio, un total de 10 blancos fueron sometidos a todos los pasos antes descritos (digestión, flotación, filtración) para calcular así el límite mínimo de detección (LOD, por sus siglas en inglés) involucrado en los métodos aquí usados, según Shruti & Kutralam-Munyasamy (2023). También se realizó una prueba de repetitividad, tomando 10 submuestras de un mismo sitio, para así calcular la mínima desviación estándar que pueda existir en las muestras recolectadas a lo largo de esta investigación.

## Análisis estadísticos

A todos los conjuntos de datos se les realizaron pruebas de normalidad y homocedasticidad (Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente). Dado que los datos no cumplieron con las condiciones de normalidad y homocedasticidad, se les decidió aplicar pruebas no paramétricas. Se realizó la prueba de U de Mann-Whitney para comparar las concentraciones de microplásticos (MP) entre las encontradas en lluvias y en secas, tanto en agua como en sedimento. También, se realizó la prueba de Spearman para evaluar la correlación entre el número de habitantes y las concentraciones de microplásticos en sedimento, de cada sitio de muestreo para ambas temporadas. Para dicha prueba se decidió usar los datos de concentraciones de MP en sedimento, pues sólo de estos se contó con información por sitio para ambas temporadas estudiadas. Todas las pruebas se realizaron con el software IBM-SPSS Statistics 25.

Finalmente, haciendo uso de software STATISTICA (StatSoft, Inc., 2011) se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para indagar en las posibles correlaciones existentes entre las variables físico químicas observadas en agua de los ríos muestreados y las concentraciones de MP obtenidas. El análisis se llevó a cabo haciendo uso de cuatro factores de correlación. Se logró un porcentaje de significancia de 58.74 % para la temporada de secas y 70.5 % para lluvias. Adicionalmente, también se realizó un ACP por casos para cada una de las temporadas, obteniendo los mismos porcentajes de significancia en ambas temporadas.

# RESULTADOS

## Agua

### Caracterización físico química del agua del río Baluarte

Al comparar entre estaciones, la media de la turbidez del agua durante la temporada de lluvias fue mayor que la de la temporada de estiaje (23.8 y 14.1 NTU, respectivamente) (Fig. 2). Durante ambas temporadas, se observaron los valores más altos de turbidez en el sitio Huamuchilita (HU; 106 y 63 NTU, en lluvias y secas, respectivamente), Puente Poyeque (PUP), Santa María (SM) y Baluarte-Juntas (BJ). En general, los sitios restantes presentaron valores por debajo de los 20 NTU, durante ambas temporadas. Las medias de temperatura encontradas en ambas campañas de muestreo fueron de 29.3°C y 28.6°C, para lluvias y secas respectivamente. Cabe notar que las temperaturas observadas están altamente influenciadas por las horas de muestreo de cada sitio, las cuales no pudieron ser controladas, pues fueron dependientes de la logística de cada campaña.

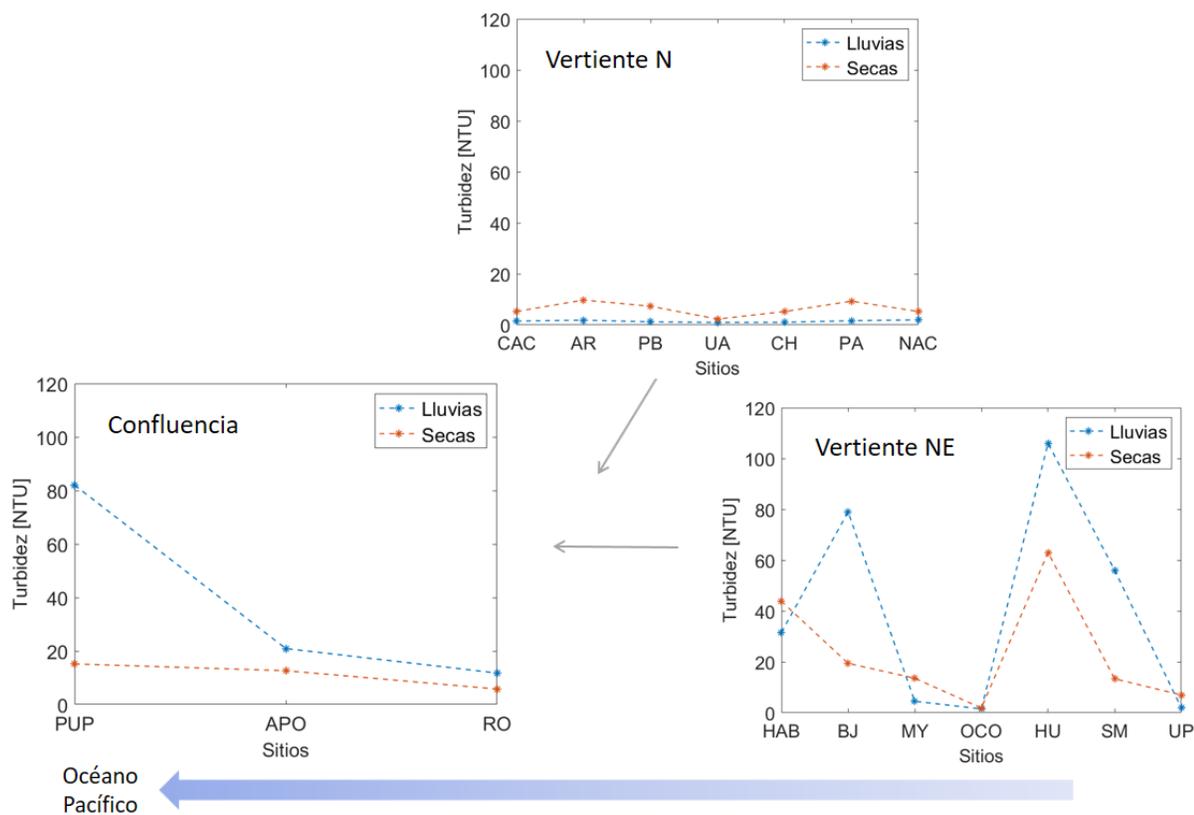


Fig. 2. Turbidez observada en los sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas y de lluvias.

Los sólidos totales disueltos (STD) presentaron medias de 99.5 y 161.4 ppm, para lluvias y secas (Fig. 3). El sitio PUP corresponde a la zona estuarina de la desembocadura del río Baluarte, por lo que los altos valores observados son propios de dicho ambiente. En todos los sitios se registraron valores más altos durante la temporada de secas. Durante ambas temporadas, el sitio Chupaderos (CH) presentó los valores más altos de STD (184 y 350 ppm, respectivamente); dichos valores son cercanos al doble de la media de los valores registrados en los otros sitios de muestreo en la temporada correspondiente.

También, es posible observar tendencias similares entre ambas temporadas del año a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte (Fig. 3).

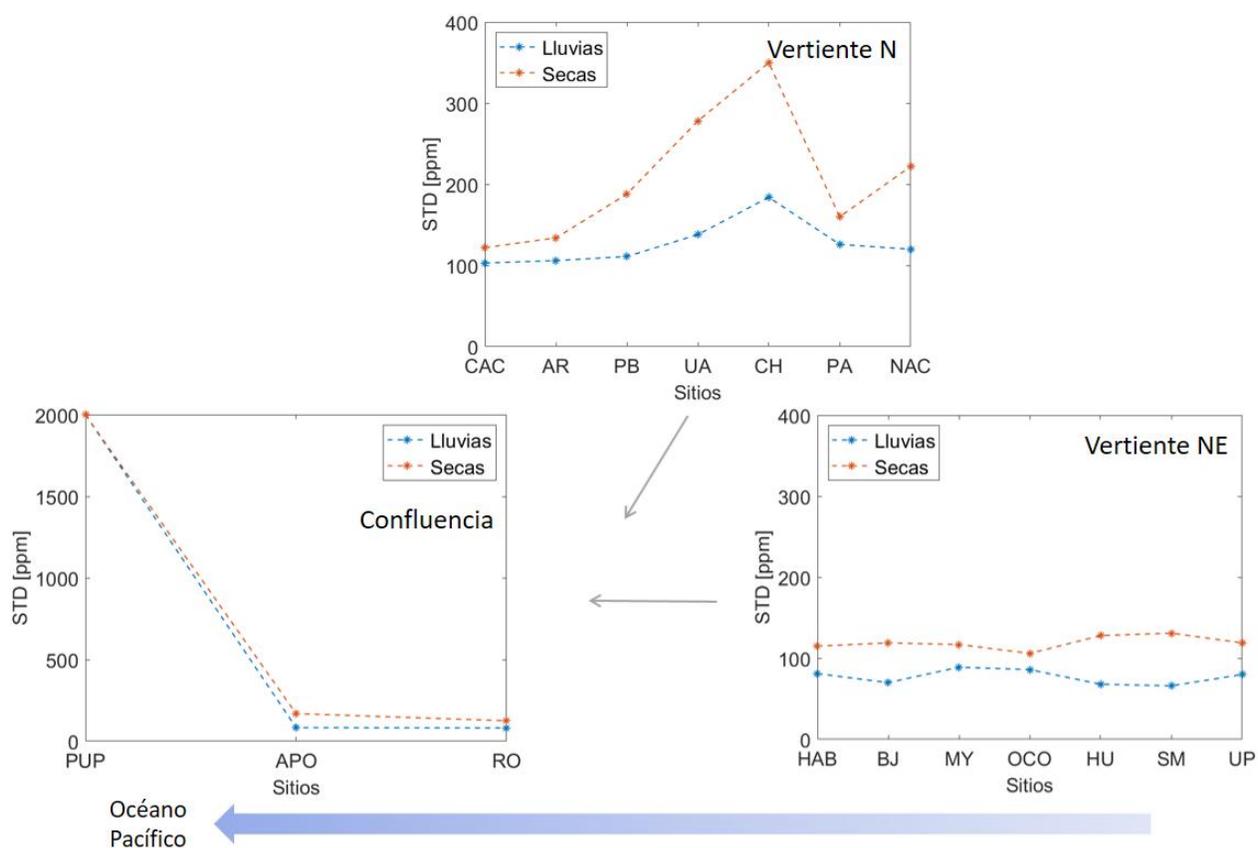


Fig. 3 Sólidos Totales Disueltos [ppm] observados en los sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas y de lluvias. Poner atención al cambio de orden de magnitud en el eje Y de la figura correspondiente a la confluencia.

En lo que respecta al oxígeno disuelto, se observaron medias de 6.5 y 7.5 mg L<sup>-1</sup>, en lluvias y secas (Fig. 4). Durante la temporada de lluvias se detectaron concentraciones estables, las cuales rondaron entre los 6.5 mg L<sup>-1</sup>. Se identificó el mínimo de oxígeno disuelto en PUP, siendo este de 3.4 mg L<sup>-1</sup>, el cual puede ser resultado de la propia hidrodinámica del sitio, ya que se encuentra dentro de una zona estuarina. Durante temporada de secas, se observaron valores más variados de oxígeno disuelto. Los valores variaron dentro de un intervalo de 3.8 – 11.3 mg L<sup>-1</sup>.

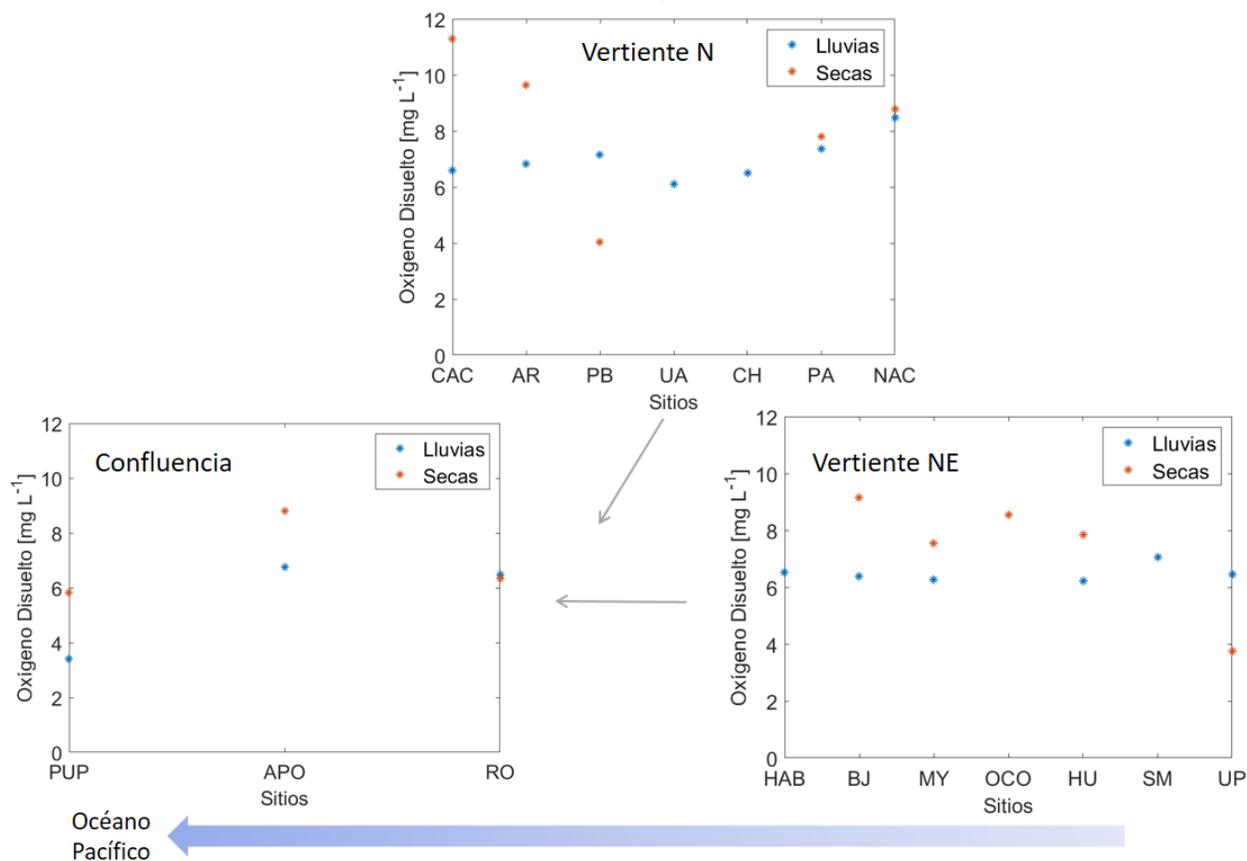


Fig. 4 Concentración de oxígeno disuelto [mg L<sup>-1</sup>] observada en los sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas y de lluvias.

Para la conductividad eléctrica, durante el muestreo respectivo a la temporada de secas se obtuvo una media de  $323.4 \mu\text{S cm}^{-1}$ , y para la temporada de lluvias la media fue de  $200.8 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Esto sin tomar en cuenta el valor obtenido en Puente Poyete (PUP), el cual para secas fue de  $39999 \mu\text{S cm}^{-1}$  y para lluvias fue de  $3999 \mu\text{S cm}^{-1}$  (Fig. 5). Al utilizar todos los valores de conductividad eléctrica, las medias fueron de  $2657.3$  y  $424.2 \mu\text{S cm}^{-1}$ , respectivamente. La conductividad eléctrica registrada durante este estudio mostró valores más altos durante la temporada de secas que durante la temporada de lluvia en todos los sitios sin excepción (Fig. 5).

Finalmente, las medias de pH registradas durante ambas temporadas fueron de 8.0. Durante la temporada de lluvias los valores registrados variaron de 7.3 a 8.6; para la temporada de secas, los valores se encontraron dentro de 6.8 y 8.9. Se observó mayor variación durante esta última temporada.

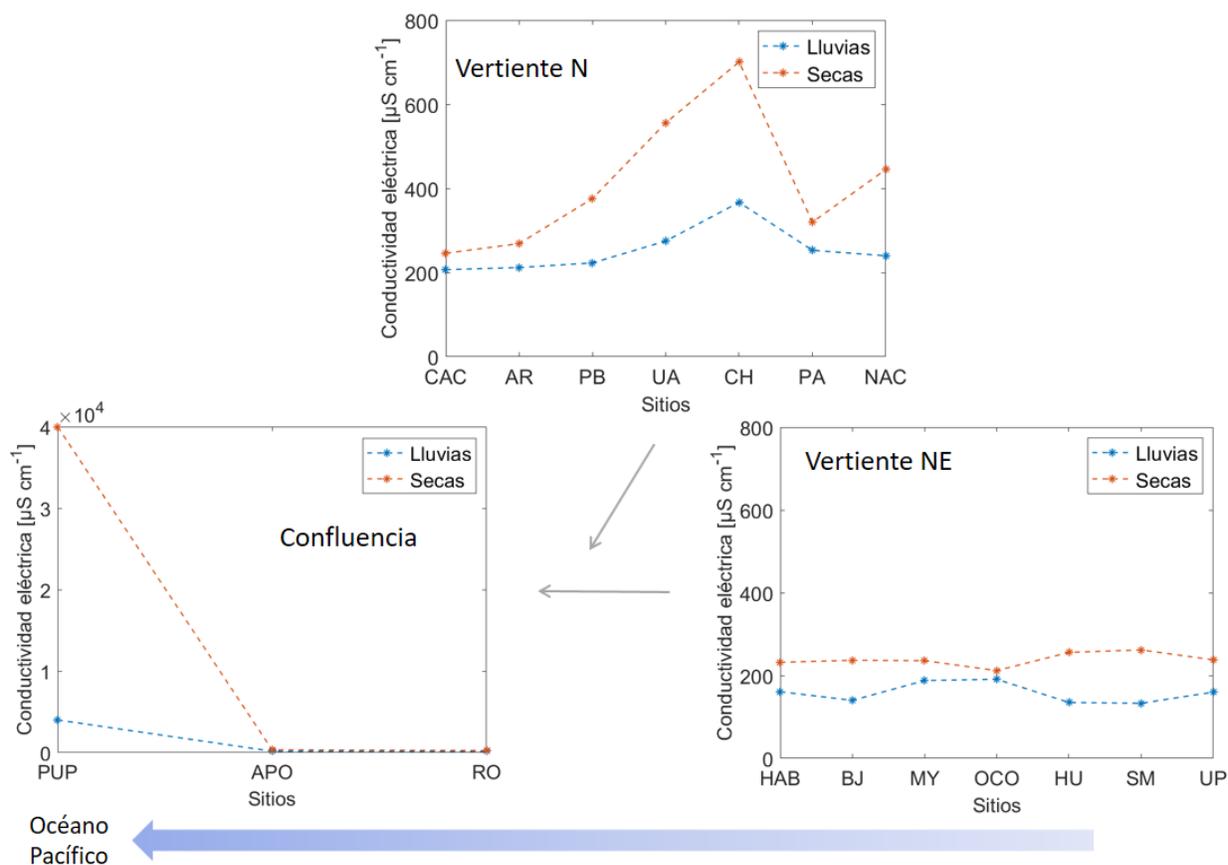


Fig. 5 Conductividad específica [ $\mu\text{S cm}^{-1}$ ] observada en los sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas y de lluvias. Poner atención al cambio de orden de magnitud en el eje Y de la figura correspondiente a la confluencia.

## Concentración y caracterización física de PPP en agua

Se realizaron seis controles en campo, tres durante el muestreo de secas y tres durante lluvias. En uno de estos se halló una fibra transparente y en otro un fragmento azul claro, por lo que se obtuvo una concentración de PPP de 1.33 partículas L<sup>-1</sup> para el conjunto de blancos de campo. A su vez, se realizó el cálculo de Límite de Detección (LD) propio de la metodología usada y se obtuvo un resultado de 7 partículas kg<sup>-1</sup>.

Durante la temporada de estiaje, la concentración media de posibles partículas plásticas (PPP) fue de 0.23 partículas L<sup>-1</sup>. La mayor concentración de PPP en agua se encontró en el sitio Santa María (SM) (Fig. 6), siendo 0.52 ± 0.19 partículas L<sup>-1</sup>, dónde la presa “Santa María” estaba en proceso de construcción. Otras concentraciones de valores más altos se observaron en Pánuco (PA), Chupaderos (CH) y El Rosario (RO), sitios cercanos a asentamientos humanos y a zonas donde se realizan actividades mineras. RO es el sitio con mayor área urbana y población (17 097 hab.).

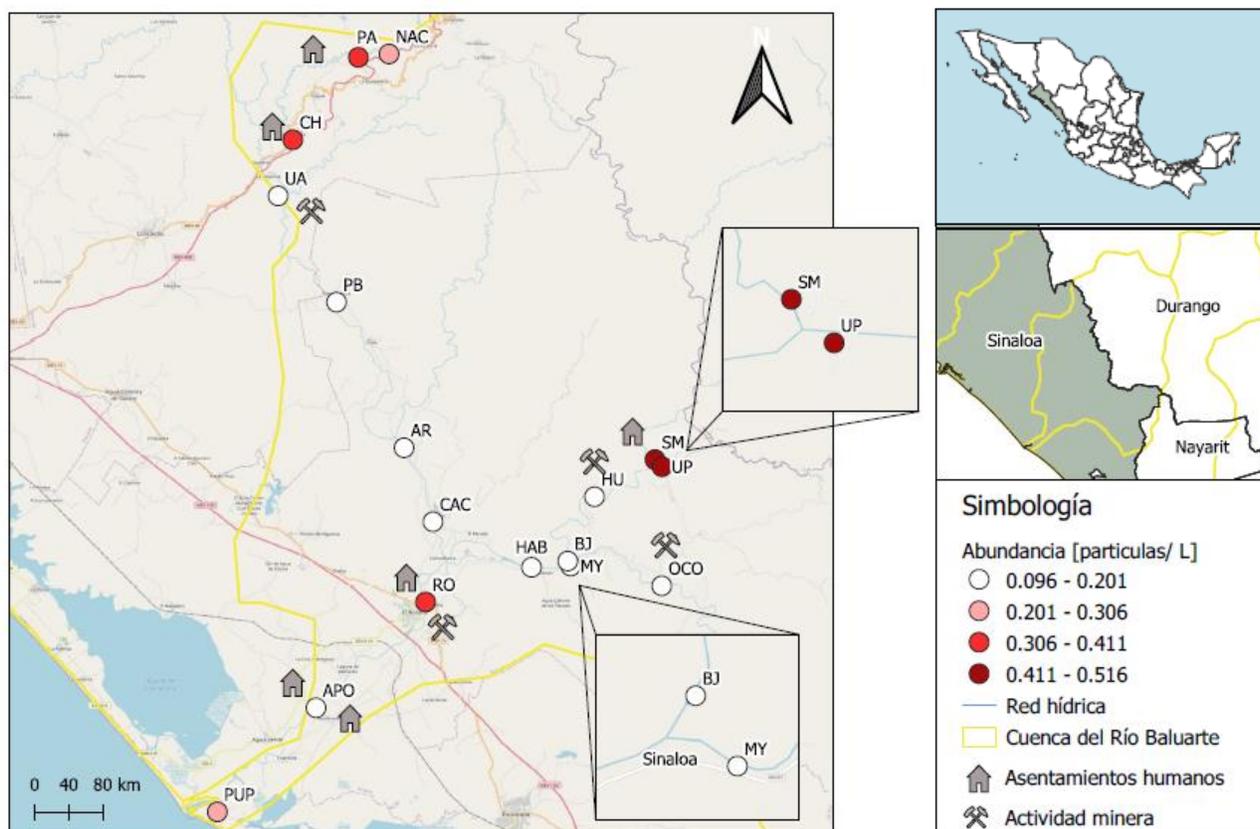


Fig. 6 Mapa con concentraciones encontradas en los diferentes sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de secas.

La menor concentración se encontró en el sitio Baluarte – Juntas (BJ), con 0.096 partículas L<sup>-1</sup>; sin embargo, en los sitios Palos Blancos (PB), Arrayanes (AR) y Cacalotán (CAC), también se encontraron concentraciones muy cercanas al mínimo antes mencionado ( $0.12 \pm 0.02$ ,  $0.11 \pm 0.18$ , y  $0.1 \pm 0.08$  partículas L<sup>-1</sup>, respectivamente).

En lo que respecta a las formas de PPP encontradas, se observó en general una mayor presencia de fibras (87 %) que de fragmentos/films (13 %), con excepción de los sitios Puente Poyete (PUP), Apoderado (APO) y El Rosario (RO) (Fig. 7). En los sitios Umon-Plumosas (UP) y Las Habitas (HAB) no se encontró ningún fragmento o film. En el conjunto de sitios correspondiente a la vertiente noroeste, que va de El Nacaral (NAC) a Cacalotán (CAC) (Fig. 7), se observa cierta tendencia al aumento de la porción de fragmentos/film al ir cuenca abajo.

En cuanto a los colores observados, se encontraron ocho diferentes: amarillo, rojo, negro, blanco, gris, transparente, azul oscuro y azul claro (Fig. 8). El color que se identificó con mayor frecuencia y en todos los sitios de muestreo, fue el azul claro. También el color azul oscuro estuvo presente en la gran mayoría de los sitios (con excepción de Cacalotán (CAC), Palos Blancos (PB) y Las Habitas (HAB)). Después, se presentó el color transparente > gris > rojo > negro > amarillo > blanco, en orden decreciente de porcentaje de representación.

Finalmente, en lo referente a los diferentes tamaños encontrados, se observaron los mayores porcentajes de representatividad en el intervalo de los 1001 a los 2500  $\mu\text{m}$  (Fig. 9), seguido por los intervalos que van de 101 – 500 y 501 – 1000  $\mu\text{m}$  a lo largo de todos los sitios muestreados. En los sitios de los últimos kilómetros de río, es decir, en los sitios PUP, APO y RO, se encontraron los mayores porcentajes de microplásticos dentro de la categoría más pequeña (10 – 63  $\mu\text{m}$ ).

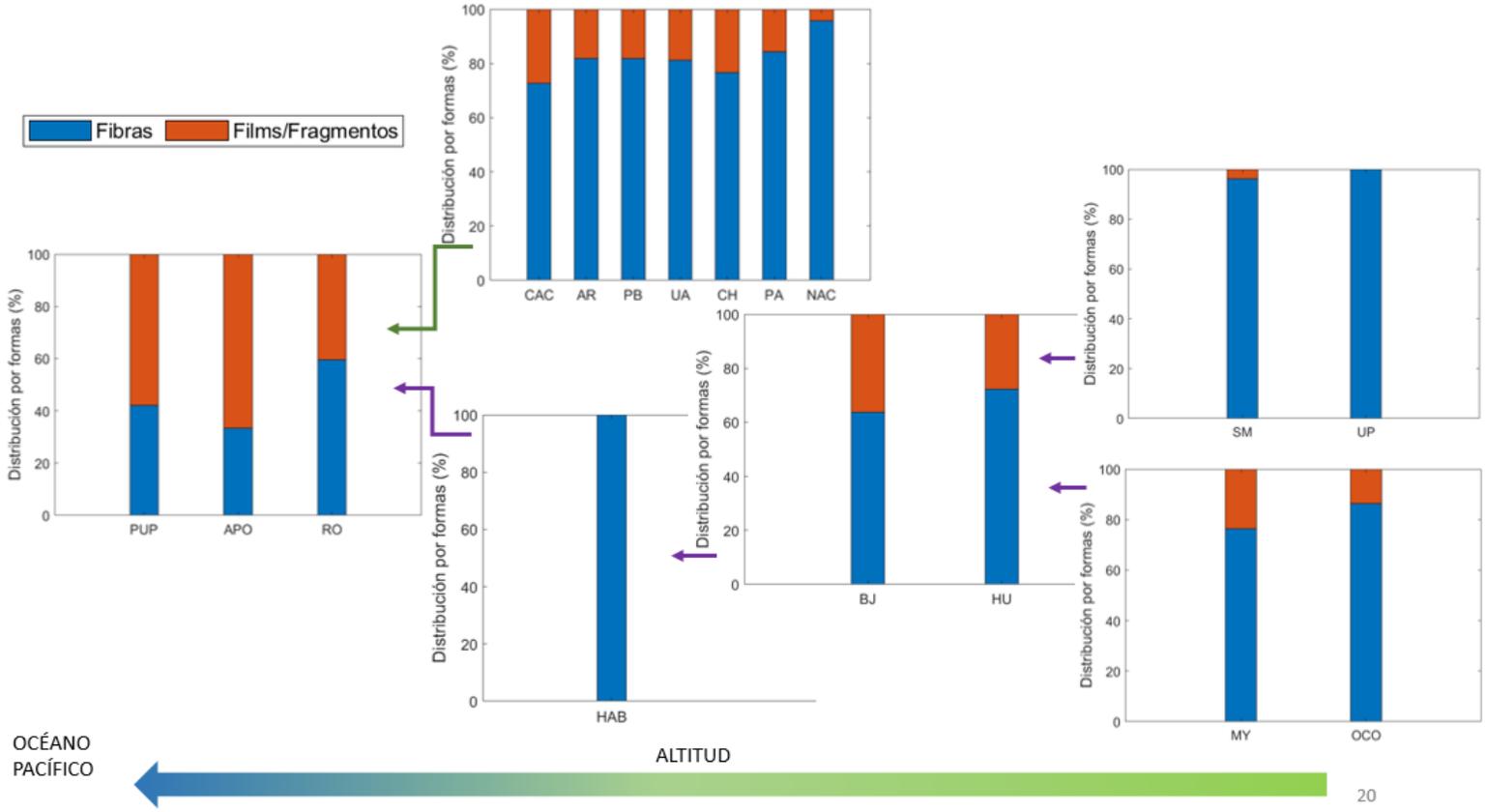


Fig. 7 Diagrama de porcentajes de distribución de las diferentes formas de PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

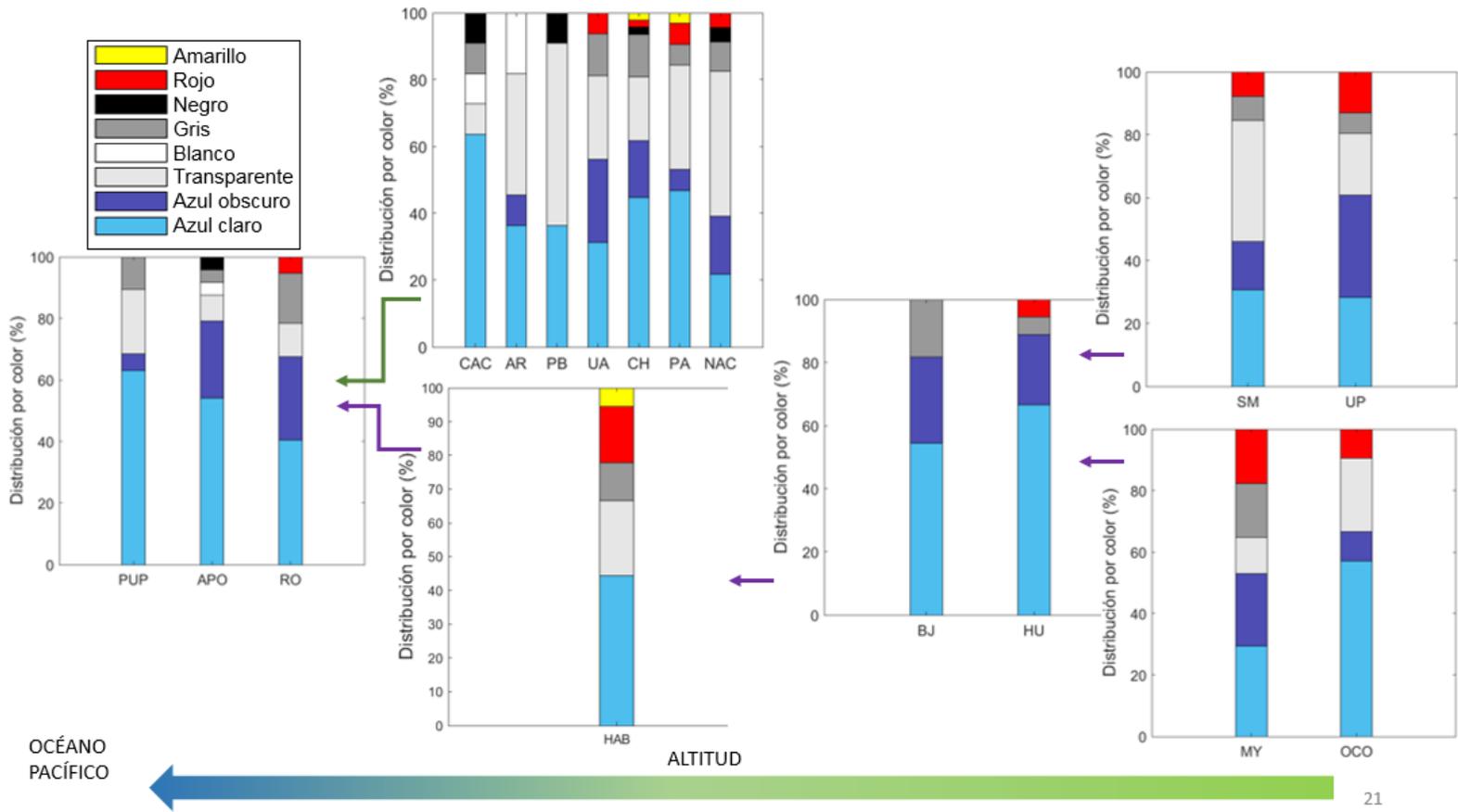


Fig. 8 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes colores encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

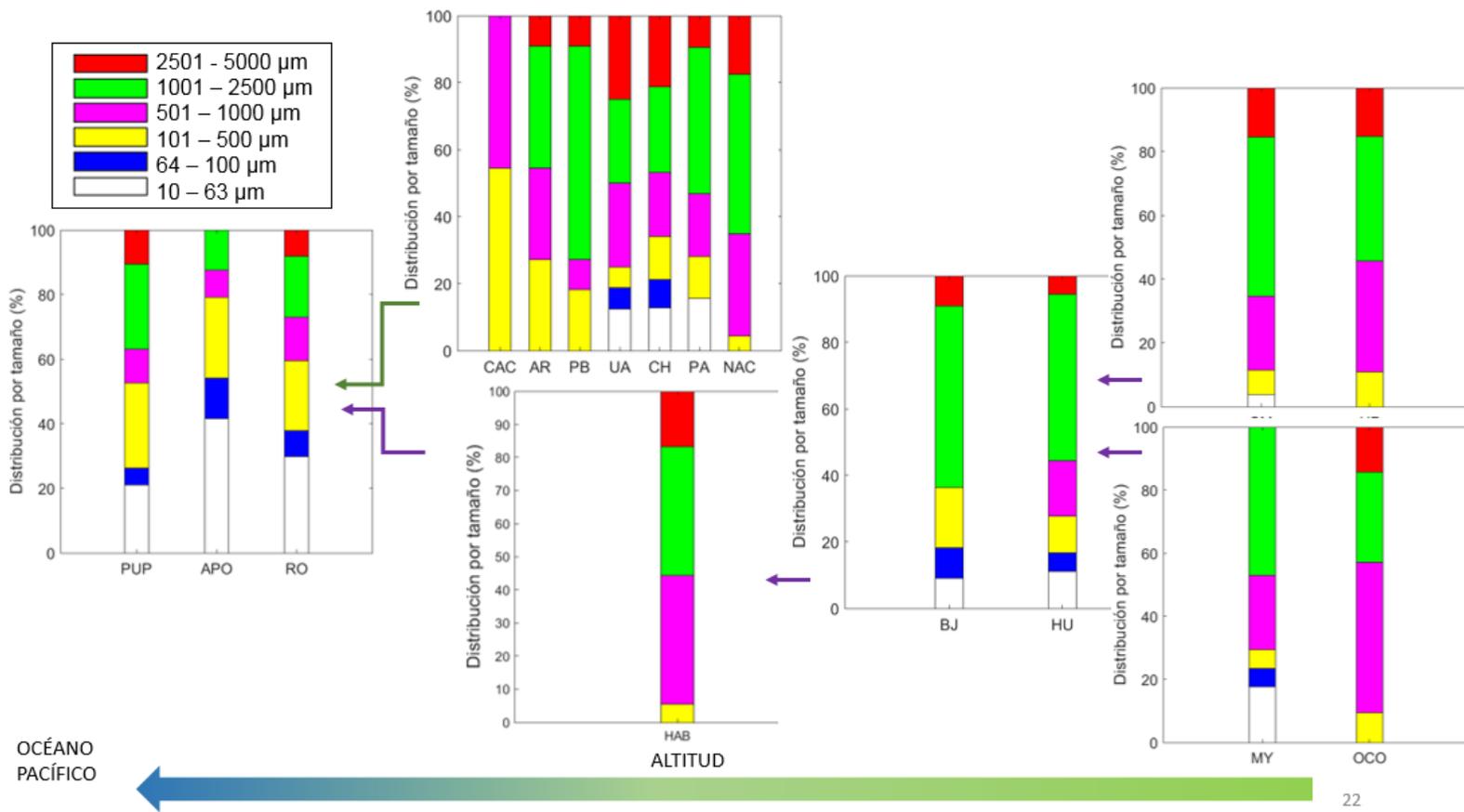


Fig. 9 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes tamaños encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

Durante la temporada de lluvia, se observó la mayor concentración de PPP en el sitio Puente Poyete (PUP) (Fig. 10), siendo esta de  $0.52 \pm 0.12$  partículas por  $L^{-1}$ , y además fue la única dentro del rango de concentraciones más altas ( $0.47$  a  $0.59$  partículas  $L^{-1}$ ). El sitio PUP es el más próximo a la desembocadura del río Baluarte y recibe afluentes de seis diferentes localidades, con un total de más de 12 000 habitantes (INEGI, 2020). Asimismo, en el sitio PUP se sabe que se realiza actividad pesquera. La concentración más baja se encontró en el sitio Huamuchilita (HU), con  $0.11 \pm 0.07$  partículas  $L^{-1}$  pero, de hecho, la mayoría de los sitios presentaron concentraciones dentro del rango de  $0.11$  a  $0.23$  partículas por  $L^{-1}$ . La media para esta temporada fue de  $0.23$  partículas  $L^{-1}$ . No se observó tendencia de aumento en las concentraciones al ir cuenca abajo.

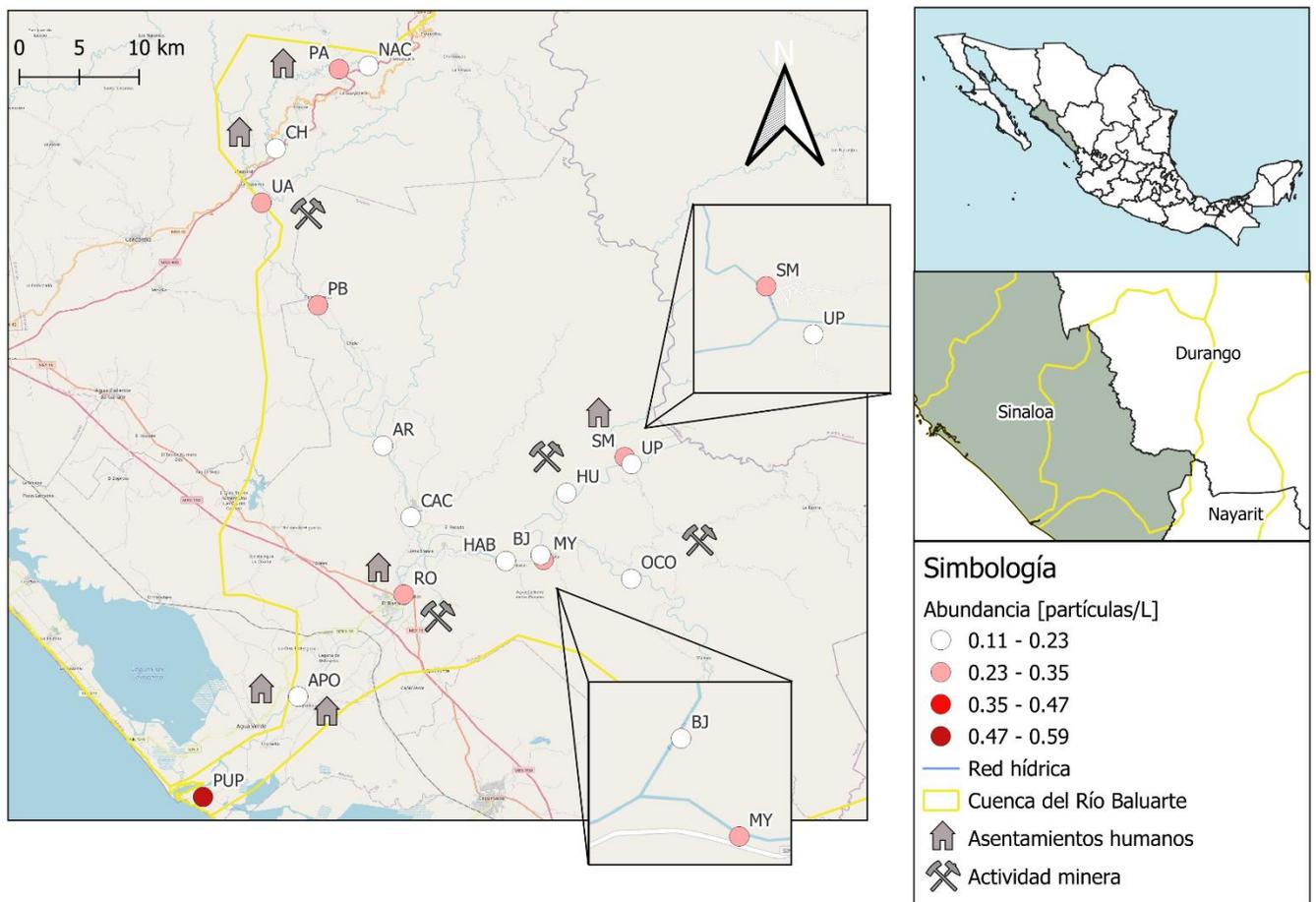


Fig. 10 Mapa con concentraciones de PPP encontradas en los diferentes sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de lluvia.

Aunque también se observó que la mayoría de las PPP encontradas tuvieron forma de fibra (70 %), en este caso, durante la temporada de lluvias a diferencia de la temporada de secas, se observó mayor presencia de fragmentos (30 %) (Fig. 11). No se observaron tendencias claras de cambios en las proporciones entre fibras y fragmentos a lo largo de la cuenca.

Durante la temporada de lluvias se presentó mayor variedad de colores en las PPP observadas (Fig. 12), agregándose los colores morado, verde y café a la gama. En esta ocasión, el azul claro perdió protagonismo, pues se observó también una mayor presencia de PPP transparentes (32 %). El 22 % de las muestras presentó color azul claro, y el porcentaje restante se reparte de forma equitativa entre los demás colores.

En el caso de los diferentes tamaños observados (Fig. 13), por lo general se presentaron PPP mayores a 63  $\mu\text{m}$ , y las proporciones entre los diferentes rangos de medida fueron más balanceadas. El 32 % de las PPP estuvieron dentro de los 100 – 500  $\mu\text{m}$  y el 29 % dentro de los 1000 – 2500  $\mu\text{m}$ . No se observó tendencia alguna a lo largo de la cuenca.

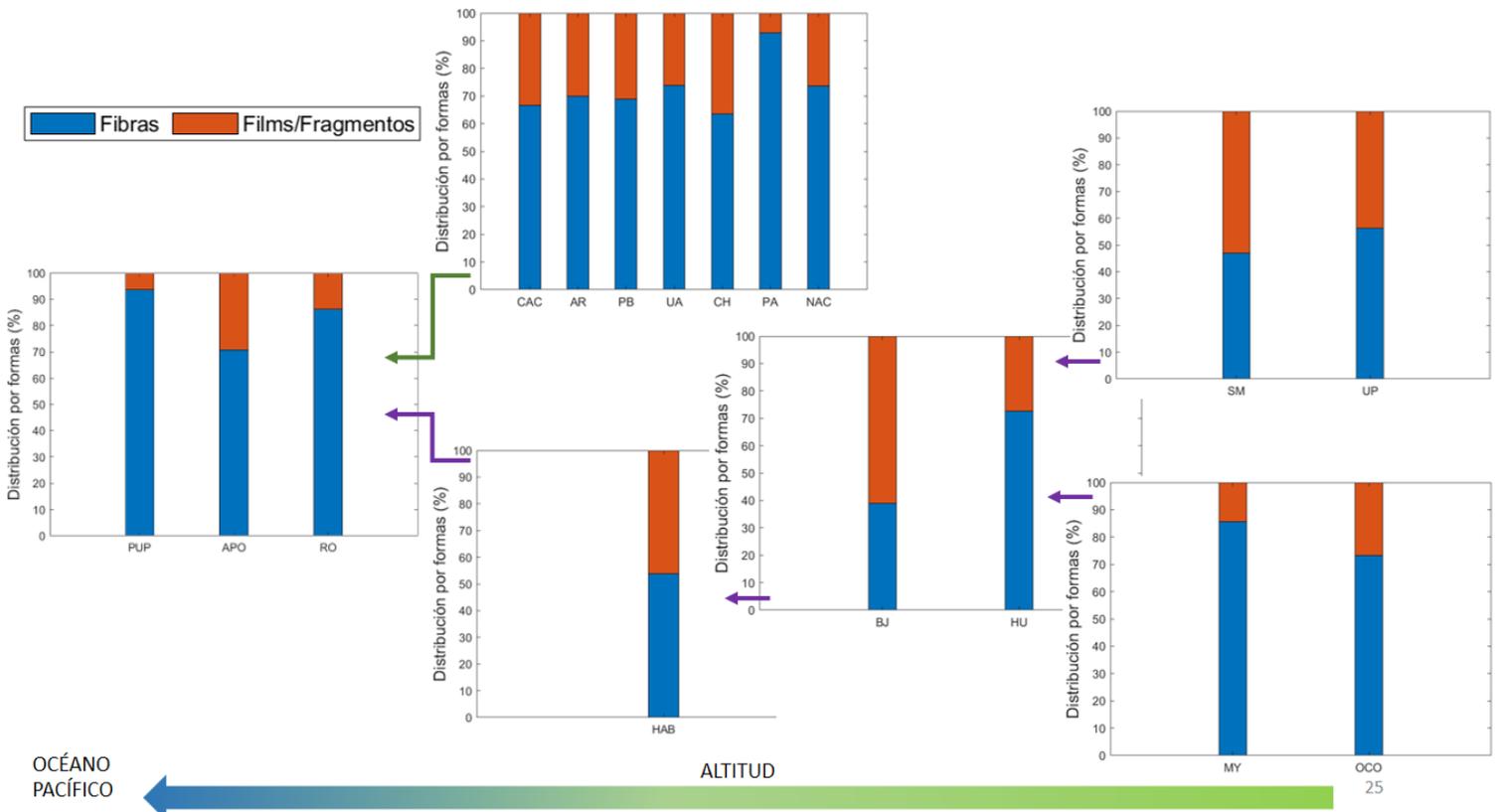


Fig. 11 Diagrama de porcentajes de distribución de las diferentes formas de PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

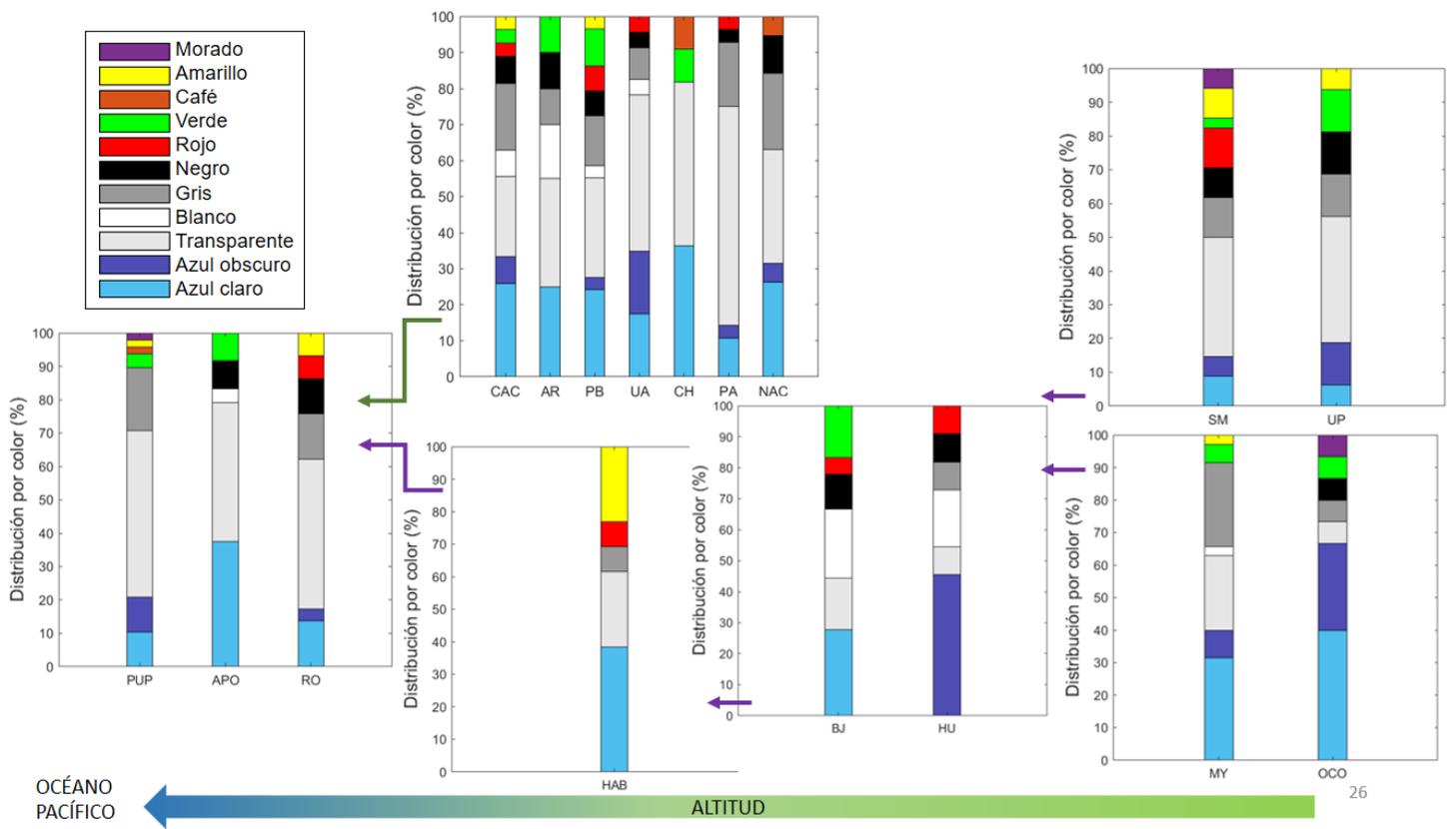


Fig. 12 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes colores encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

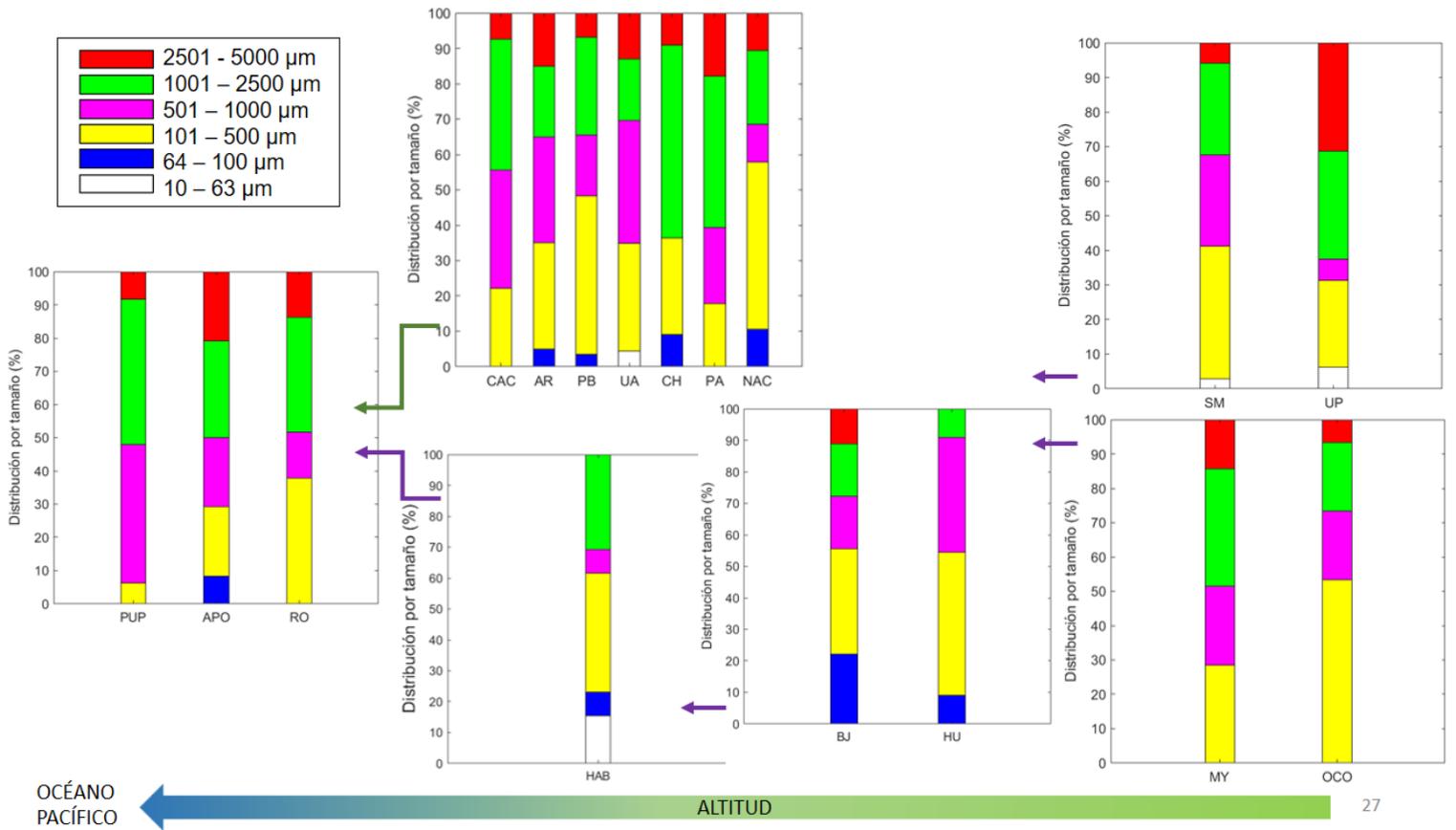


Fig. 13 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes tamaños encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

## Sedimento

### *Caracterización granulométrica*

Las muestras de sedimento fueron tomadas del lecho de los ríos, descartando *in situ* clastos de tamaño >2 cm de diámetro, con el fin de asegurar un volumen suficiente de muestra para los análisis y los intereses del presente estudio. Se buscó coleccionar sedimento de zonas de acumulación, ya fuera en zonas de acreción, o en colas de barras. En los sitios de lecho rocoso (clastos > 5 cm de diámetro) se tomaron muestras sólo a orillas del canal.

El sedimento analizado se constituía principalmente por granos con tamaños que caen dentro de la clasificación de: arena gruesa (con diámetro >1.41 mm), media (1.41-0.5 mm), fina (0.5-0.25 mm) y muy fina (0.25-0.125 mm), aunque también se observó la presencia de limo (0.125-0.062 mm) (Fig. 14).

En el caso de la temporada de secas, fue posible observar el mayor porcentaje dentro de la clasificación de arena gruesa (42.3 %). Se encontraron porcentajes balanceados entre las clasificaciones de arena media y arena fina (24.6 y 20.4 %, respectivamente). El porcentaje restante se distribuyó entre arena muy fina y limo (9.1 y 3.6%).

Durante la temporada de lluvias, los tamaños de sedimento analizados se distribuyeron de la siguiente manera: 45.4 % arena gruesa, 27.7 % arena media, 12.7 % arena fina, 4.7 % arena muy fina y 1.5 % limo. Al comparar entre temporadas, fue posible observar que durante la temporada de lluvias las arenas muestreadas con mayor representación fueron las de diámetros más grandes, englobado el 73.1 % del total entre tamaño grueso y medio. También, durante esta temporada, se observó menor presencia de limo (menos de la mitad que el observado durante secas), lo que es coherente con la mayor velocidad de la corriente (mayor energía), que se da durante la temporada de lluvias.

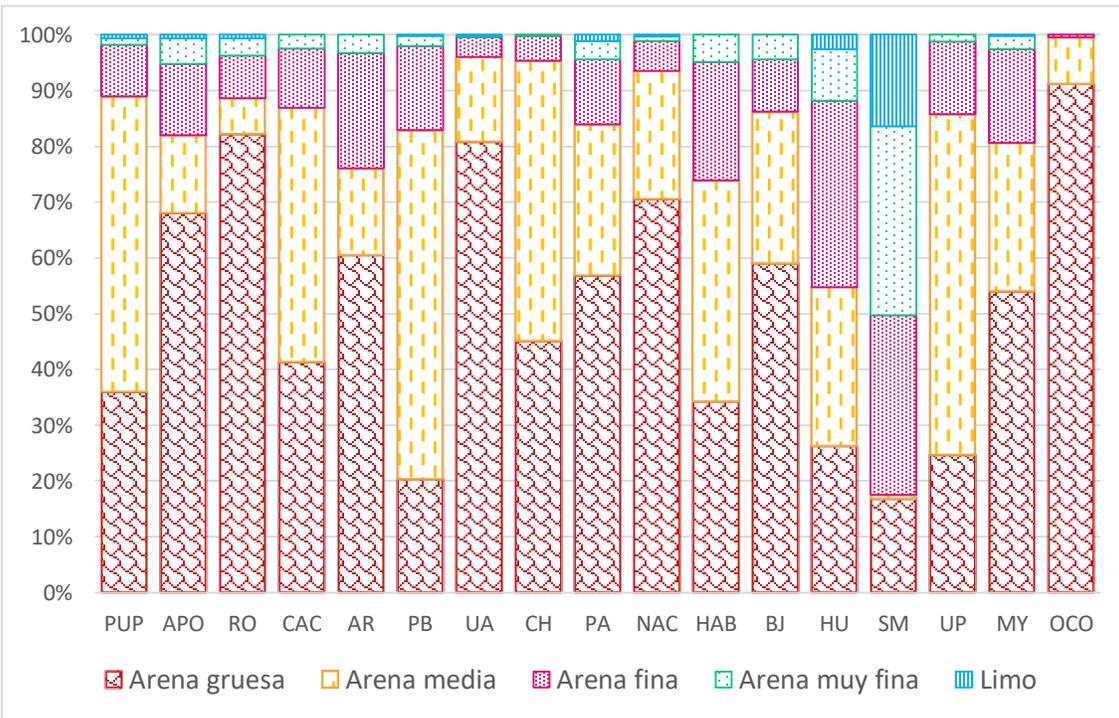
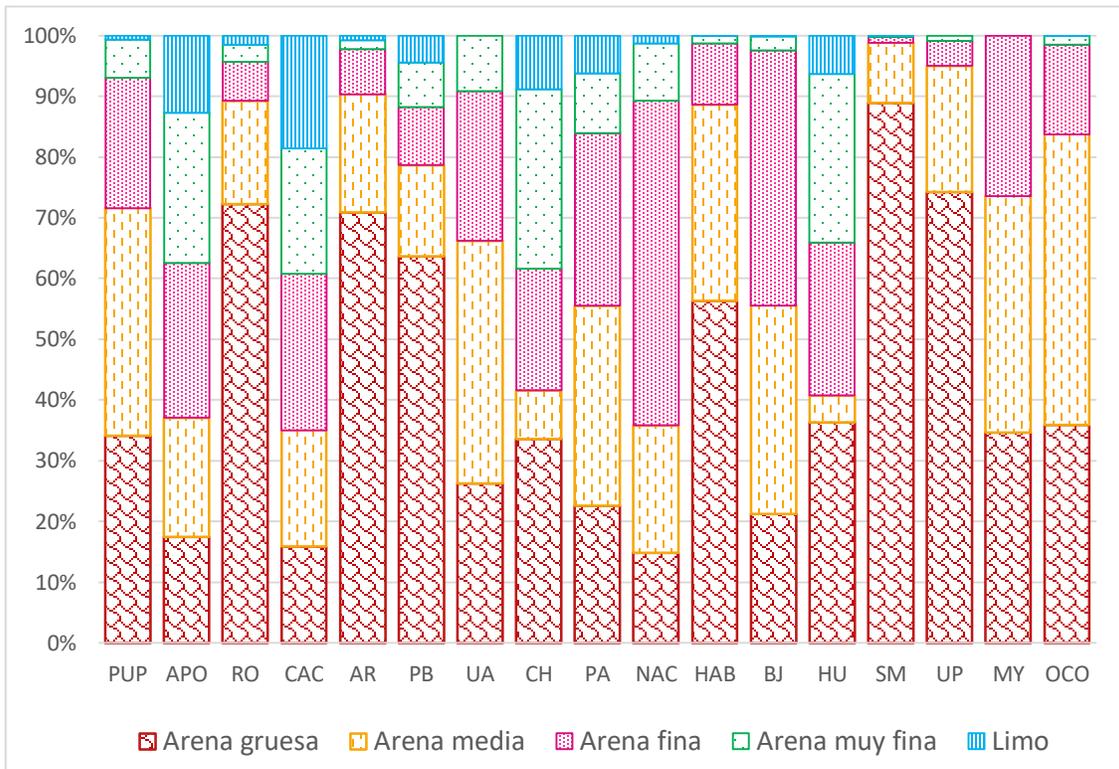


Fig. 14 Granulometría encontrada en los sitios de muestreo en la Cuenca del Río Baluarte. Arriba durante temporada de secas y abajo durante lluvias.

## Concentración y caracterización física de PPP en sedimento

La mayor concentración de PPP encontrada en sedimento durante la temporada de estiaje fue de  $1479.7 \pm 300$  partículas  $\text{kg}^{-1}$  en el sitio Santa María (SM), seguida por la encontrada en Palos Blancos (PB) ( $1219.8 \pm 230.9$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ ) (Fig. 15). La concentración promedio de la temporada de secas fue de  $685.4 \pm 307.6$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ . En la mayoría de los sitios se encontraron abundancias por encima de las 600 partículas  $\text{kg}^{-1}$ . El sitio con menor abundancia de PPP fue Cacalotán (CAC) con  $310.7 \pm 152.8$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ . No se observó alguna tendencia clara en la distribución de los sitios con mayores abundancias de PPP a lo largo de la cuenca.

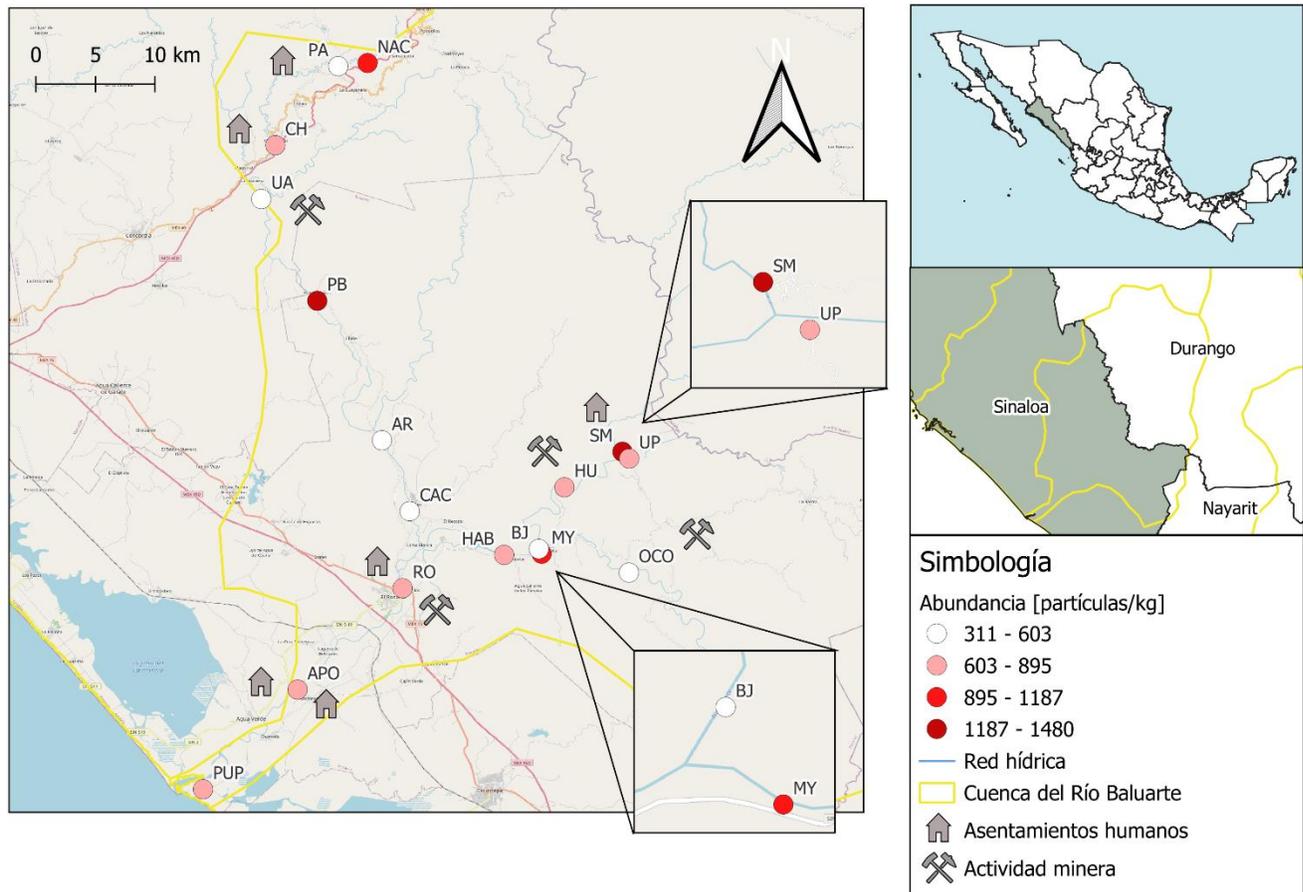


Fig. 15 Mapa de concentraciones de PPP encontradas en los diferentes sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de estiaje.

En secas se observó mayor presencia de PPP en forma de fibra, en todos los sitios muestreados (Fig. 16). En general, el 87.3 % de las PPP caracterizadas fueron fibras, y sólo el 12.7 % presentó formas tipo fragmento o film. Las proporciones entre fibras y fragmentos fueron muy semejantes entre todos los sitios muestreados. No se identificó alguna tendencia de variación de formas a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte.

Casi el 50 % de las PPP caracterizadas presentó color transparente, y en este caso sólo un 30 % fue de color azul claro (Fig. 17), mientras que el 20 % restante se distribuyó entre los colores amarillo, rojo, café, gris, blanco, negro, verde y azul oscuro. Los colores verde y café fueron los menos comunes.

Finalmente, la mayoría de las PPP caracterizadas se encontraron en un rango de tamaño de entre los 1001 y los 2500  $\mu\text{m}$  (40 %) (Fig. 18). A su vez, más del 97 % del total de las PPP tuvieron tamaños mayores a 100  $\mu\text{m}$ . No se observa alguna tendencia al aumento o disminución de tamaño de las PPP a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte.

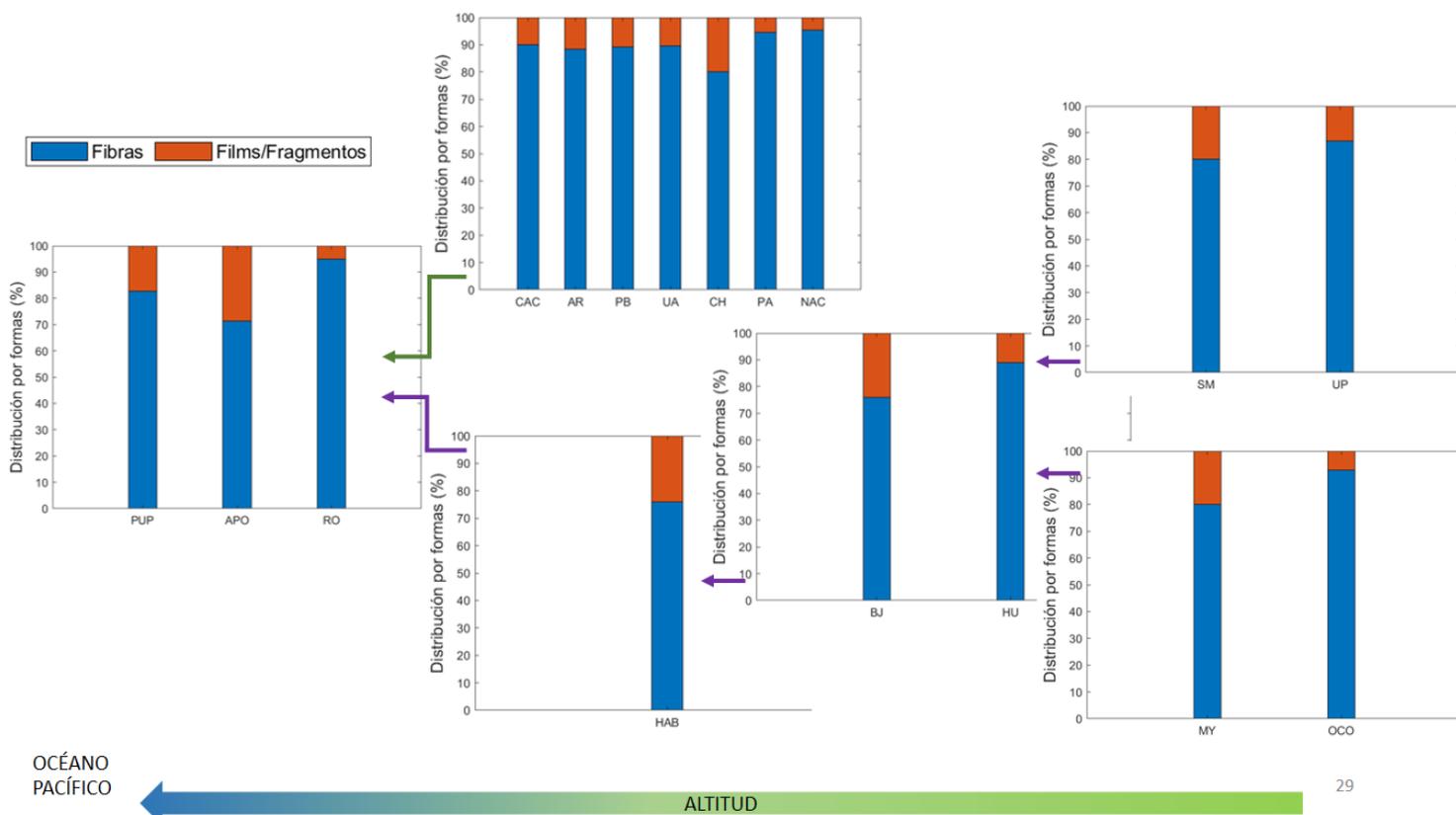


Fig. 16 Diagrama de porcentajes de distribución de las diferentes formas de PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

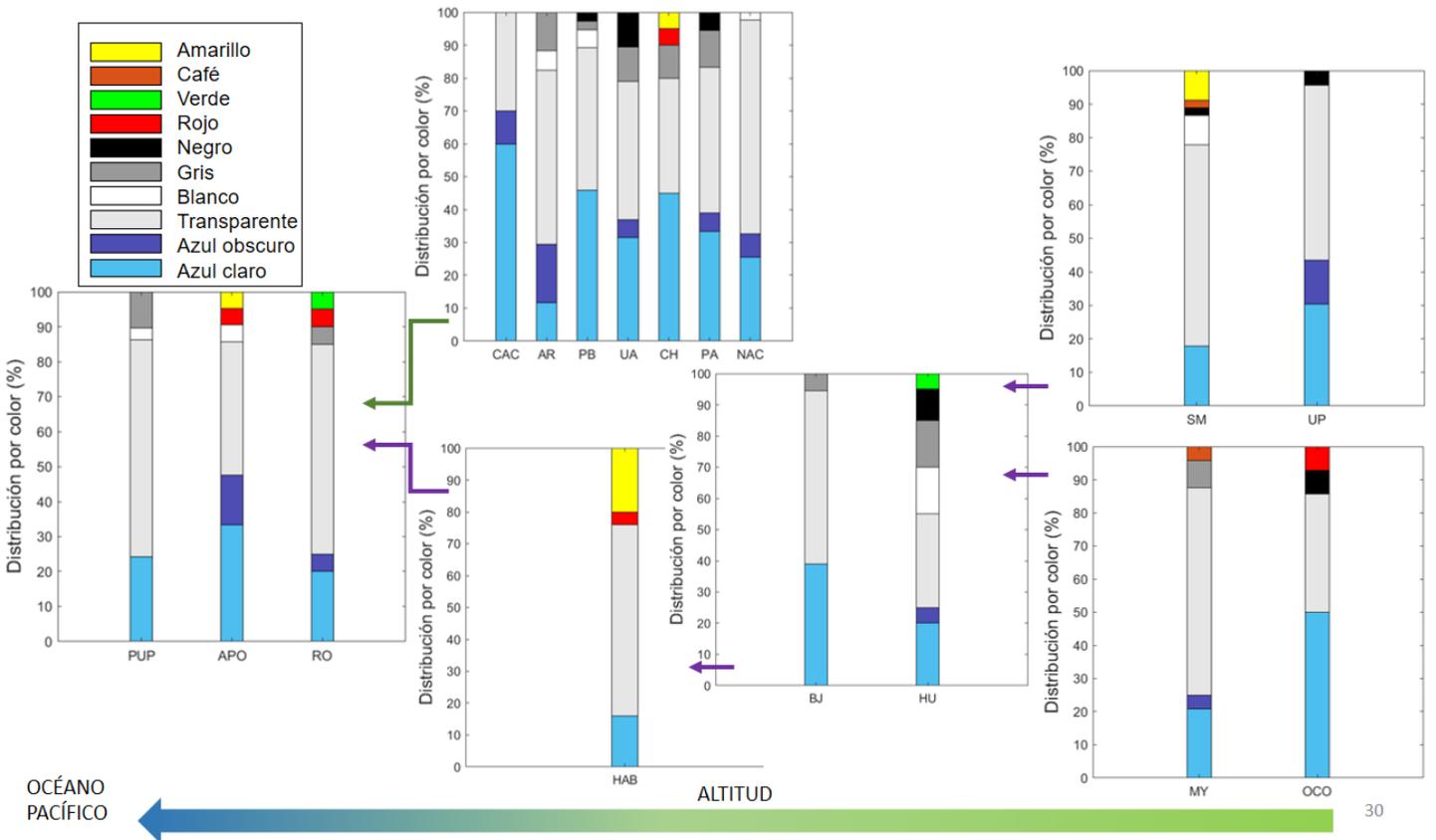


Fig. 17 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes colores encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

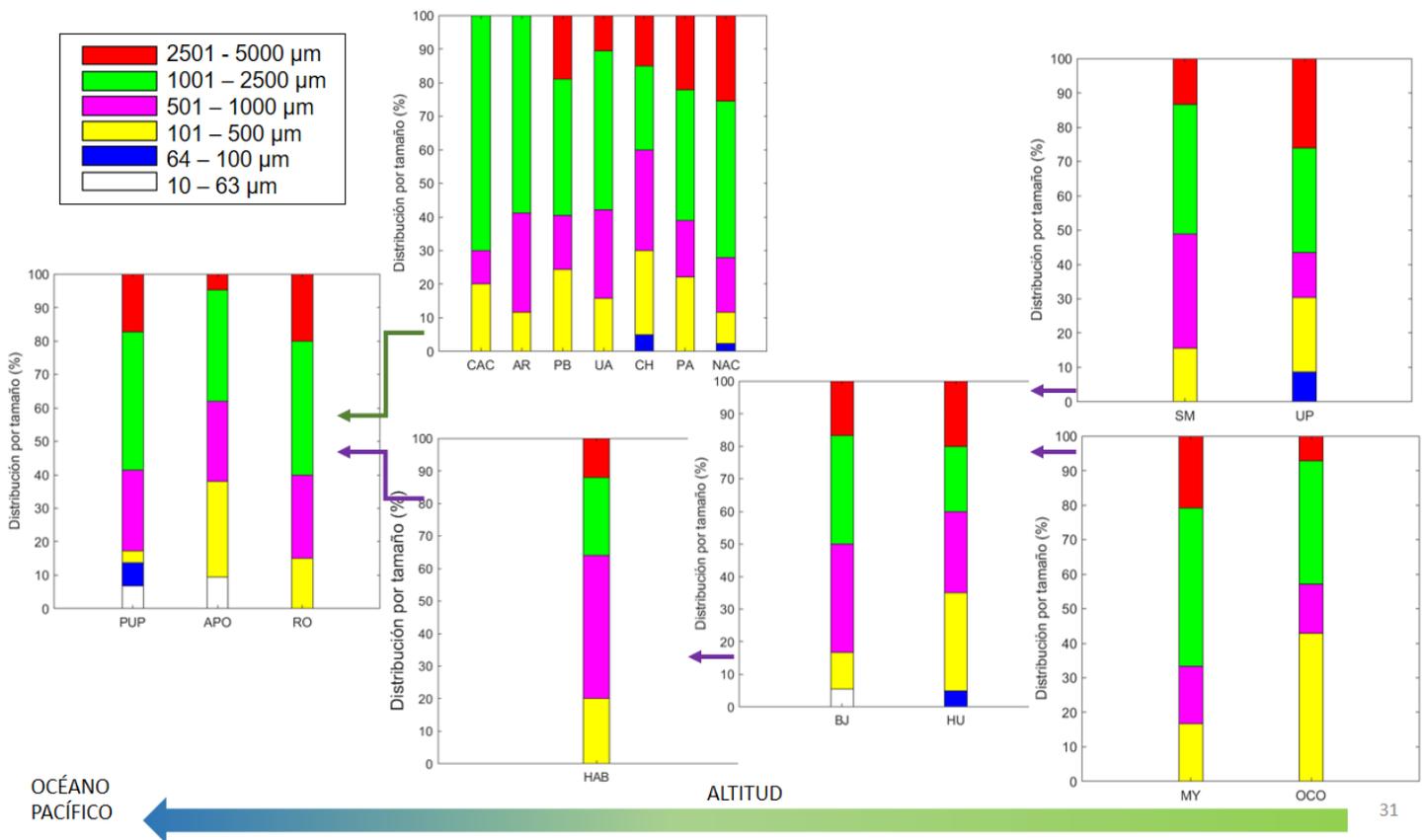


Fig. 18 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes tamaños encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

En lluvias, los sitios Arrayanes (AR), Apoderado (APO) y Huamuchilita (HU) fueron los que presentaron las concentraciones de PPP más altas:  $830.1 \pm 472.6$ ,  $795.8 \pm 100$  y  $667.2 \pm 416.4$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ , respectivamente (Fig. 19). Durante la temporada de lluvias se obtuvo una concentración promedio de  $386.5 \pm 216.6$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ , menor al promedio de la temporada de secas. En la mayoría de los sitios se encontraron concentraciones por encima de las 267 partículas  $\text{kg}^{-1}$ . No se observó alguna tendencia de variación en las concentraciones a lo largo de la cuenca.

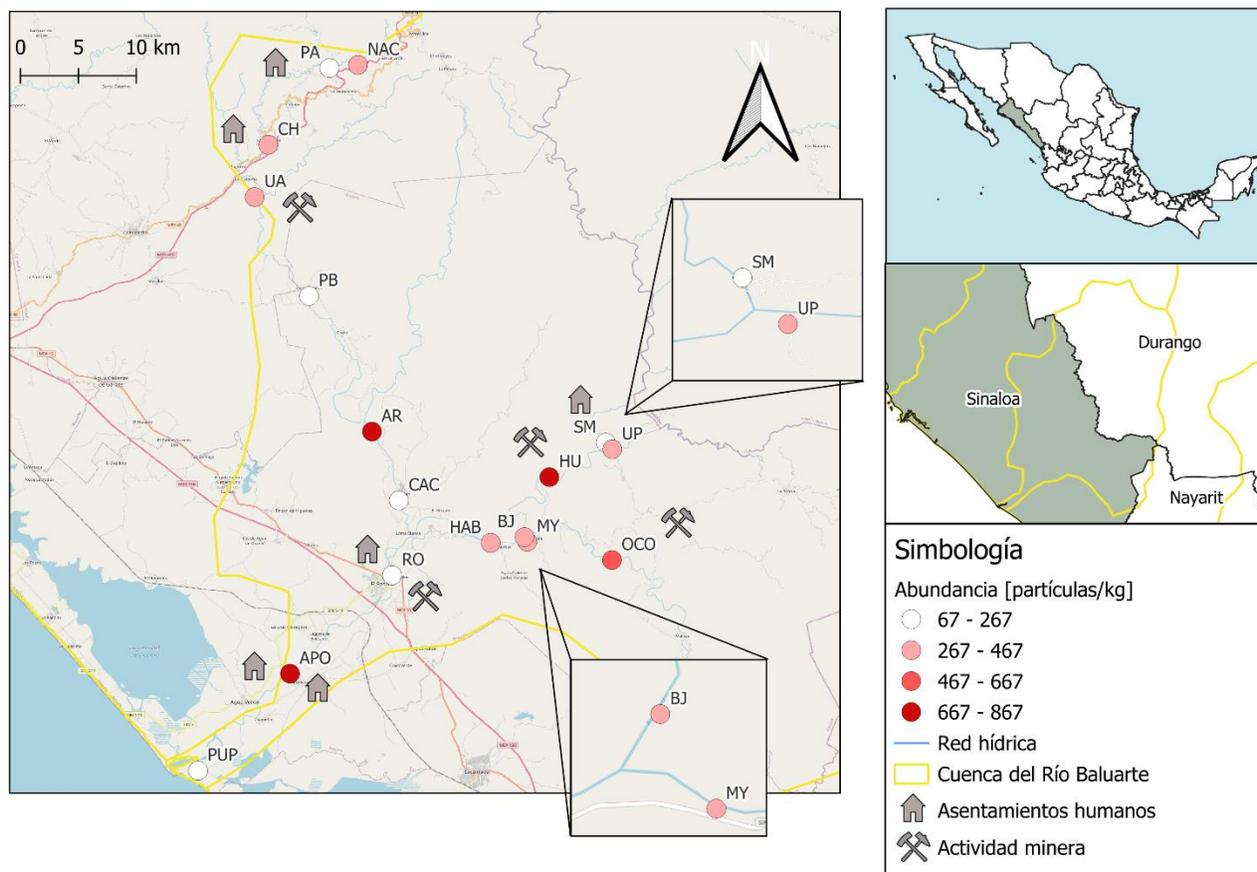


Fig. 19 Mapa con concentraciones encontradas en los diferentes sitios de muestreo a lo largo de la Cuenca del Río Baluarte durante la temporada de estiaje.

En lluvias, en las muestras de sedimento, en general, se encontró que el 87.6 % de las PPP se presentaron en forma de fibras, y el 12.4 % restante en forma de fragmentos o films (Fig. 20). A pesar de que no se observa alguna tendencia clara de variación en las formas halladas cuenca abajo, se observó que hay varios sitios donde sólo se encontraron fibras. Únicamente en el sitio Mayolita (MY), se observó una distribución más homogénea entre los dos tipos de PPP analizados.

En lo que respecta a los colores, en temporada de lluvia, se observó que el 47 % de las PPP encontradas fueron transparentes y 29 % de color azul claro; mientras que el porcentaje restante se distribuyó de forma equitativa entre el resto de colores observados (Fig. 21). Se presentó mayor variedad de colores durante la temporada de lluvias que durante la temporada de secas.

Finalmente, los tamaños de PPP más presentes en las muestras de sedimento de la temporada de lluvias cayeron dentro de los rangos de partículas más grandes, de los 1001 – 2500  $\mu\text{m}$  y los 2501 – 5000  $\mu\text{m}$  (Fig. 22). Se observó poca presencia de partículas por debajo de los 100  $\mu\text{m}$  (~2 % del total de PPP analizadas).

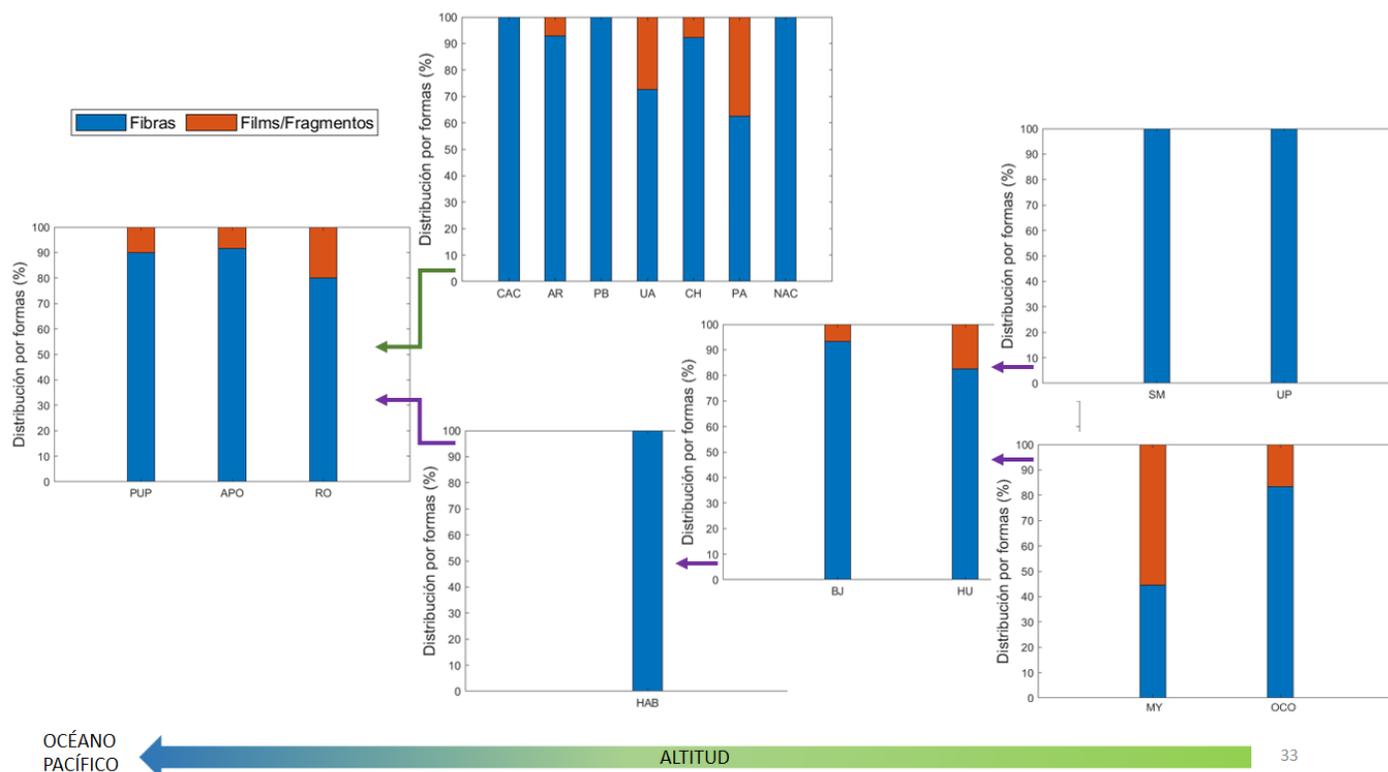


Fig. 20 Diagrama de porcentajes de distribución de las diferentes formas de PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

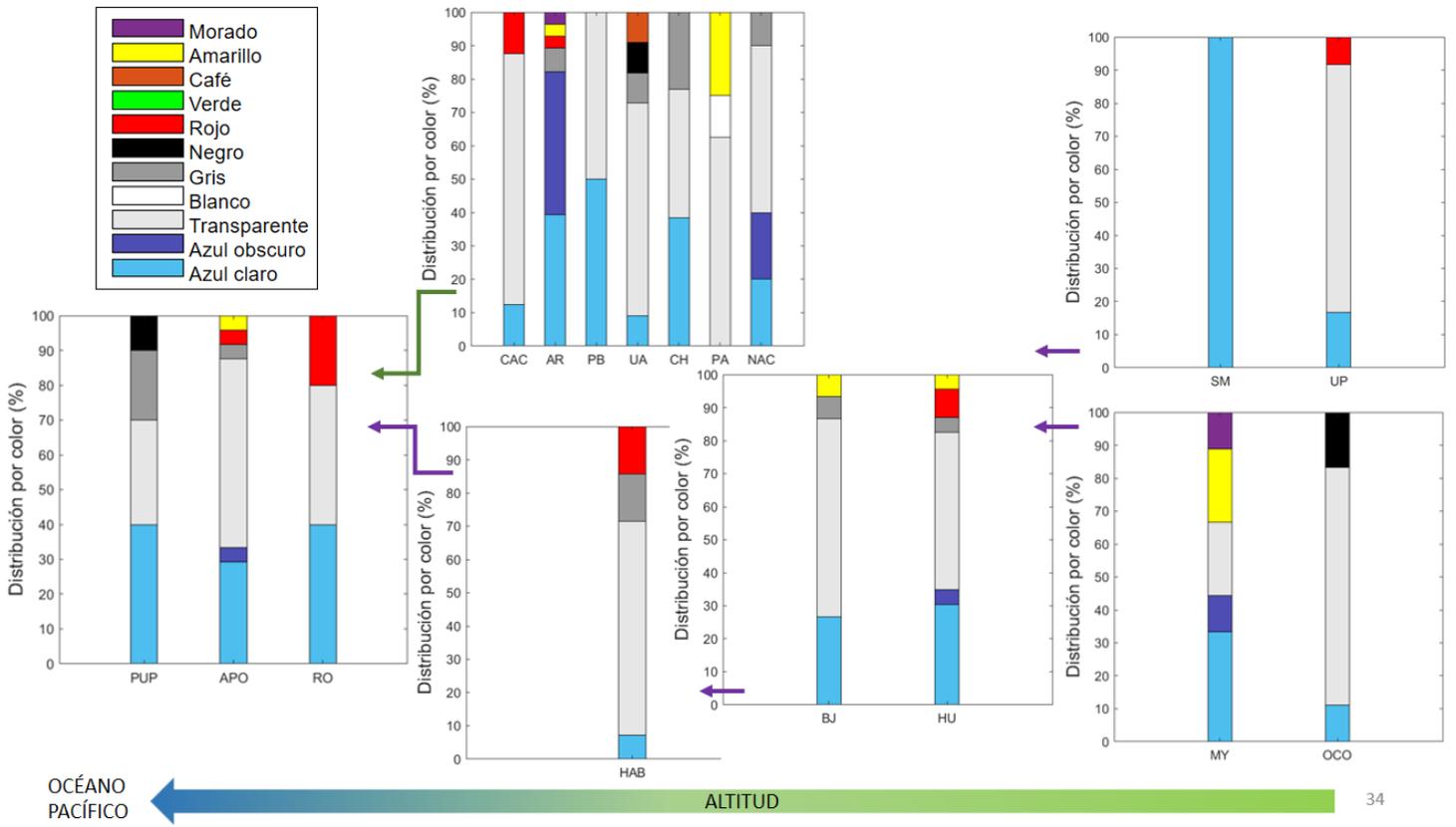


Fig. 21 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes colores encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

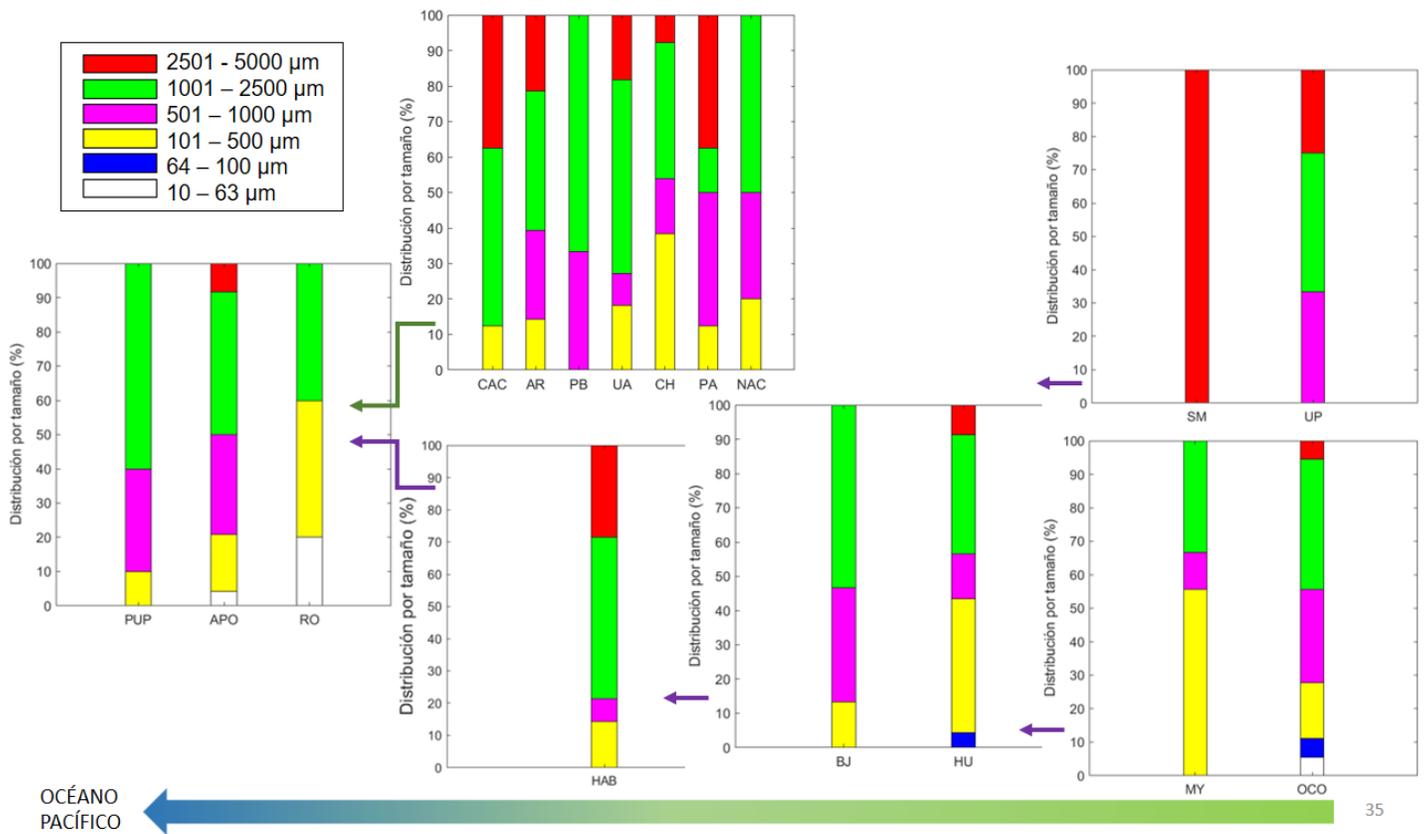
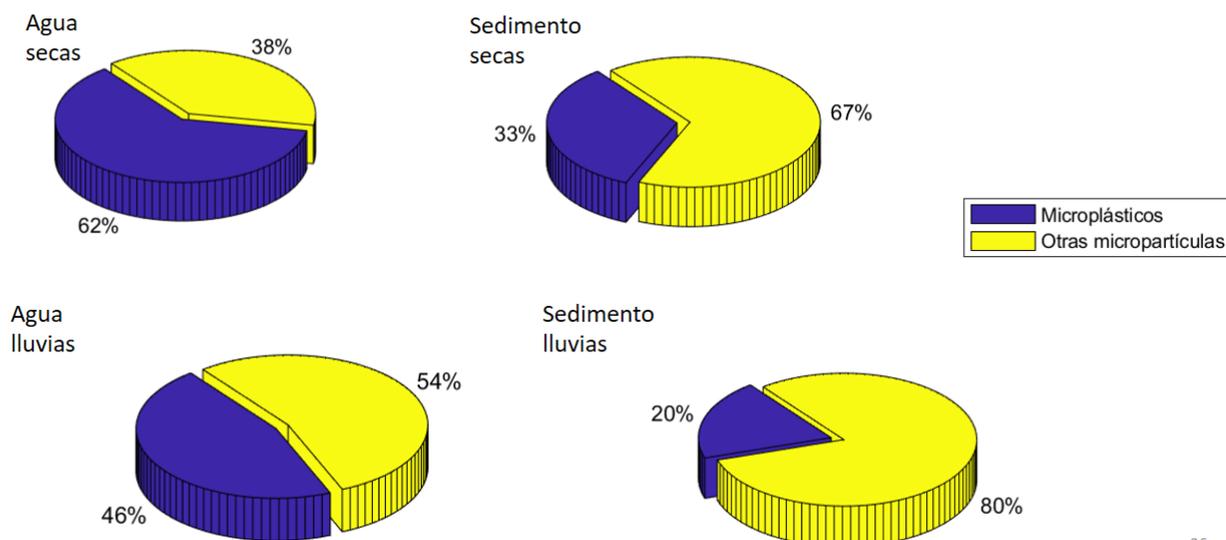


Fig. 22 Diagrama de porcentajes de distribución de los diferentes tamaños encontrados en las PPP de la Cuenca del Río Baluarte.

## Caracterización química

Setenta por ciento de las posibles partículas plásticas (PPP) fueron analizadas químicamente con ayuda de un Espectrómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR- $\mu$ ATR; Thermo Scientific Nicolet IN10 MX). Para la temporada de secas el 62 % de las PPP encontradas en las muestras de agua fueron microplásticos, el otro 38 % fueron partículas no plásticas. En las muestras de sedimentos dichos porcentajes fueron de 33 y 67 %, respectivamente (Fig. 23).

Para temporada de lluvias se observó una tendencia similar a secas. En las muestras de agua se determinó que un 46 % de las PPP analizadas fueron partículas plásticas, mientras que un 54 % fueron micropartículas de otra composición. En lo que respecta a las muestras de sedimento, sólo un 20 % de las PPP analizadas fueron partículas plásticas.



36

Fig. 23 Distribución de posibles partículas plásticas (PPP) analizadas entre microplásticos y otro tipo de micropartículas de la Cuenca del Río Usumacinta.

Al analizar sólo el porcentaje de las PPP que resultaron ser polímero plástico se observó que, en el caso de las muestras de agua, durante la época de lluvias se encontró una variedad más amplia de polímeros (trece diferentes), siendo el polietileno tereftalato (PET), el polipropileno (PP) y el Nylon los más comunes. En las muestras de agua

respectivas a la temporada de secas (7 diferentes polímeros) fueron el PET, el celofán y el rayón los polímeros predominantes (Fig. 24; Tabla 1).

*Tabla 1. Tipos de polímeros encontrados en las muestras de agua y sedimento de la Cuenca del Río Baluarte.*

<b>Matriz</b>	<b>Polímeros</b>	<b>Densidades [g cm<sup>3</sup>]</b>
Agua	- Polietileno Terephtalato (PET)	1.38
	- Polietileno (PE)	0.917; 0.94
	- Polipropileno (PP)	0.9
	- Poliacrilonitrilo (PAN)	0.8
	- Poliestireno (PS)	1.04
	- Poliuretano (PU)	0.03 – 0.06
	- Celofán	1.42
	- Rayón	1.5
	- Acrílico	1.17-1.2
	- Nylon	1.13 – 1.15
	- Poliacrilamida (PAM)	1.189
	- Politetrafluoretileno (PTFE)	2.2
	- Resina alquídica (RA)	0.91
	- Resina de poliéster (RP)	1.1 – 1.43
	- Resina fenólica (RF)	1.2 – 1.4
Sedimento	- Poliacrilonitrilo (PAN)	0.8
	- Polietileno Terephtalato (PET)	1.38
	- Polietileno (PE)	0.917; 0.94
	- Polipropileno (PP)	0.9
	- Poliestireno (PS)	1.04
	- Poliuretano (PU)	0.03 – 0.06
	- Policloruro de vinilideno (PVDC)	1.63 – 1.72
	- Rayón	1.5
	- Acrílico	1.17 – 1.2
	- Celofán	1.42
	- Ftalato de dialilo (DAP)	1.1
	- Resina alquídica (RA)	0.91
- Resina de poliéster (RP)	1.1 – 1.43	

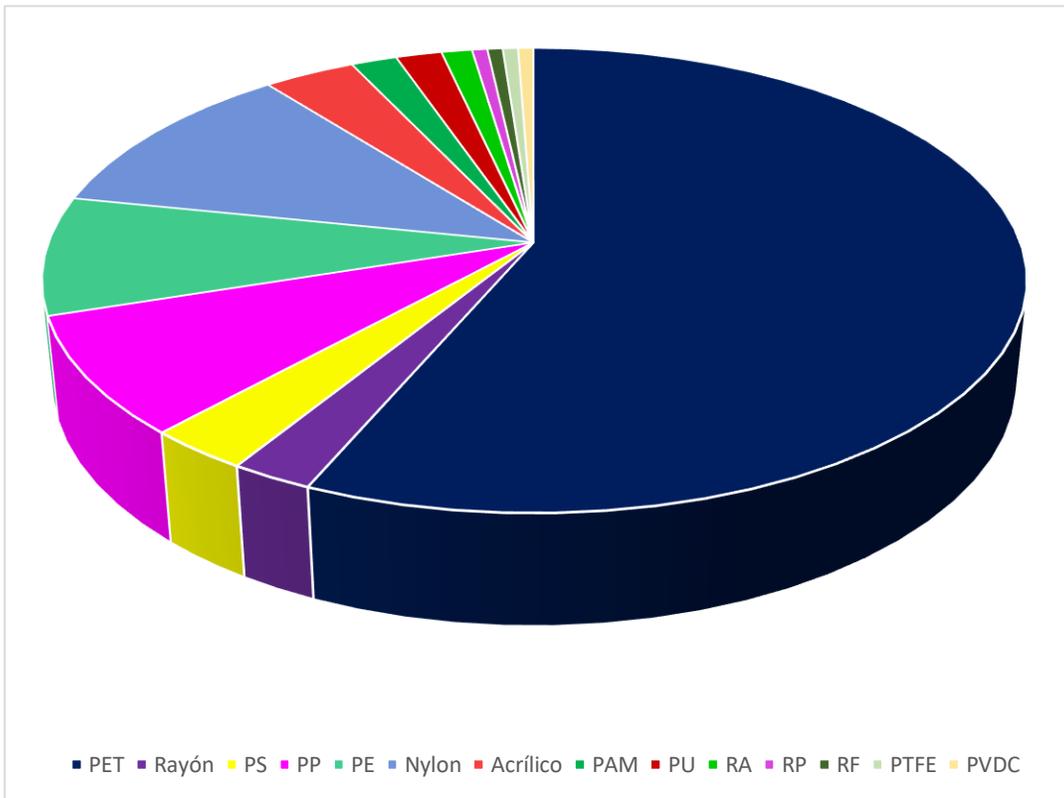
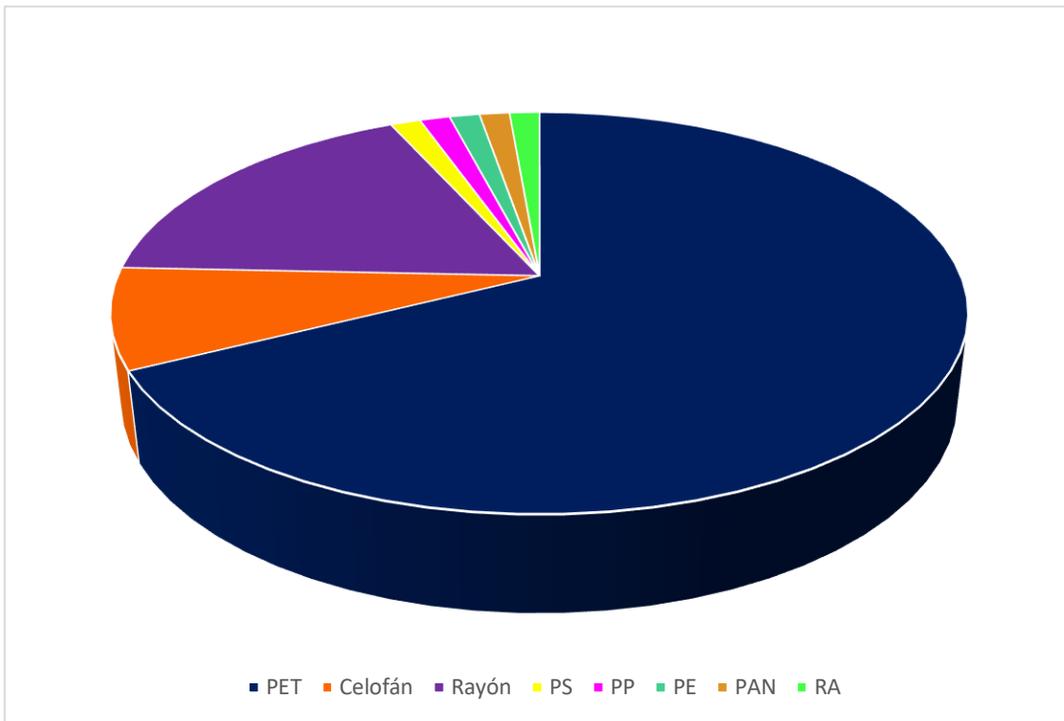


Fig. 24 Distribución entre los diferentes polímeros encontrados en las muestras de agua en la Cuenca del Río Baluarte. Arriba durante la temporada de estiaje y abajo durante lluvias.

En el caso de los polímeros encontrados en sedimento, durante la temporada de secas se observó mayor variedad polimérica (10 diferentes polímeros), respecto a la variedad encontrada en temporada de lluvias (6 polímeros) (Fig. 25; Tabla 1). En sedimento de la temporada de secas, los polímeros con mayor representación fueron el polietileno tereftalato (PET), el rayón y el celofán, mientras que, durante la temporada de lluvias el polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS) y rayón fueron los polímeros predominantes.

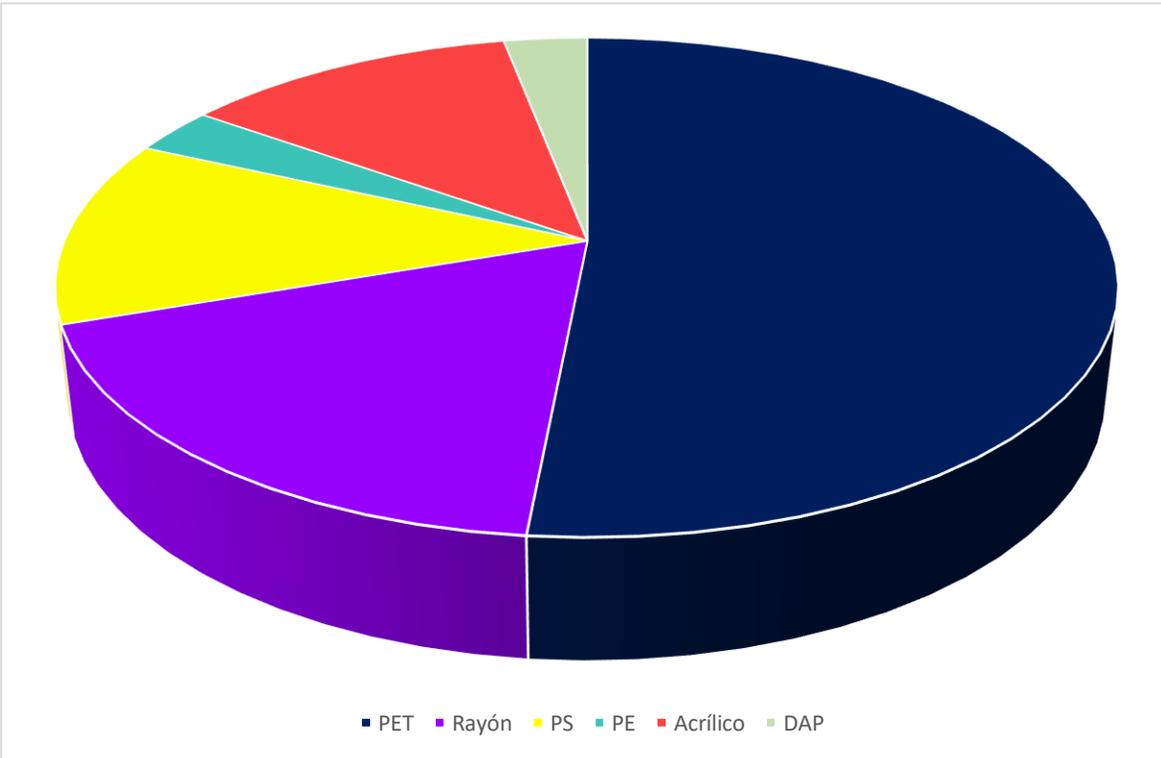
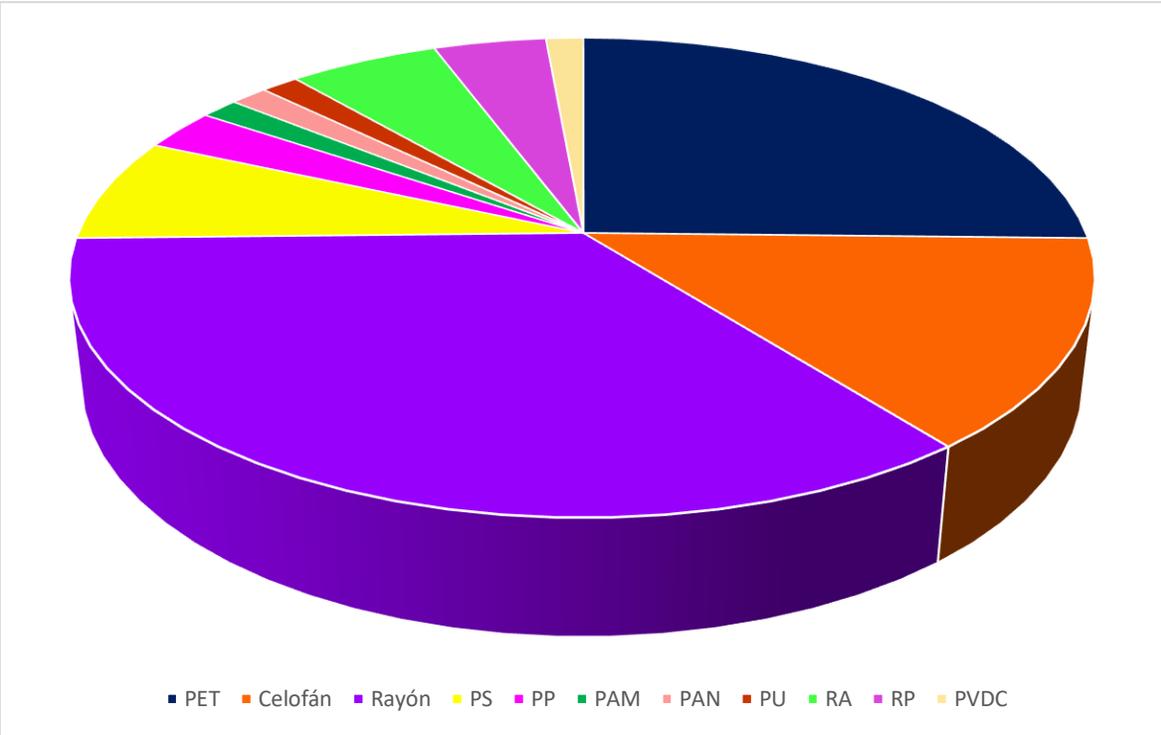


Fig. 25 Distribución entre los diferentes polímeros encontrados en las muestras de sedimento en la Cuenca del Río Baluarte. Arriba durante la temporada de estiaje y abajo durante lluvias.

## DISCUSIÓN

Desde la anulación de los servicios hedonísticos que ofrecen los espacios naturales con poca intervención humana, que en los últimos tiempos han tomado mayor relevancia económica dada el alza de actividades ecoturísticas que la sociedad moderna ha implementado en sus vidas, hasta la advertencia del riesgo que implican por sí mismos, pero también como vectores de patógenos, pesticidas, virus, metales pesados, entre otros contaminantes de alto riesgo, es un hecho que la contaminación por plásticos y microplásticos hoy día, se ha puesto en el centro de la investigación científica. A continuación, la discusión de los resultados obtenidos en el presente estudio.

### Parámetros fisicoquímicos en agua de la CRB

Se observaron valores de pH de 7.3 a 8.6, lo cual refleja condiciones de alcalinidad clásicas del agua de sistemas fluviales (Mattson, 2009). La prueba estadística de Análisis de Componentes Principales (ACP) que se realizó con los valores de concentración de MP en agua y sedimento, y las variables físico-químicas analizadas, muestran una relación inversamente proporcional entre los valores de pH y las concentraciones de MP, en ambas matrices, durante la temporada de secas. Se recomienda indagar más al respecto, pues no se cuenta con información referente al *biofilm* desarrollado en los MP hallados, y éste podría ser uno de los factores que generen la relación entre concentración de MP y pH (Wang et al., 2021).

En lo que respecta al oxígeno disuelto, se observaron concentraciones que reflejan mayor consumo que producción durante la temporada de lluvias, condiciones normales en un contexto de aumento de entrada de materia alóctona al sistema debido a escorrentía superficial (Lewis, 2009) (Fig. 4). En el sitio Puente Poyete (PUP) se observaron concentraciones muy por debajo de las condiciones de saturación del sistema ( $3.4 \text{ mg L}^{-1}$ ), pero cabe mencionar que dicho sitio se encuentra dentro de un ambiente estuarino. Dichos ecosistemas típicamente presentan condiciones reductoras (Bukaveckas, 2009).

Durante la temporada de secas, se observaron valores de oxígeno disuelto mucho más variables a lo largo de la cuenca muestreada. La menor concentración se observó en el sitio Umón-Plumosas (UP), pero se cree que pudo ser un dato erróneo, pues ningún otro indicador físico-químico reflejó condiciones de deterioro ambiental. La condición de sobre

saturación que se observó en el sitio Cacalotán (CAC), sitio con mayor concentración de oxígeno durante la temporada, podría deberse a que, durante dicha temporada, la productividad se ve favorecida dadas las buenas condiciones de luz en columna de agua y, a su vez, a la presencia de nutrientes (Bukaveckas, 2009). En la mayoría de los sitios de estudio se observaron condiciones de producción sobre consumo de oxígeno disuelto. Los valores de OD observados también se pueden atribuir a la turbulencia y poca profundidad de los ríos muestreados (Anh et al., 2023).

Los valores de turbidez mostraron ser mayores durante lluvias. Estudios previos comprueban la relación que existe entre los eventos de precipitación y la turbidez, la cual guarda una correspondencia directa (Mukundan et al., 2013; Effler et al., 2009), pero se observó el comportamiento opuesto a lo largo de la vertiente norte (Fig. 2). Esto se podría deber a que, por un lado, los muestreos de la temporada de lluvias se realizaron durante el último mes de la temporada, por lo que, en esta sección los efectos de la precipitación pudieron verse atenuados (Seeger et al., 2004), y también a que, debido a la mayor productividad que se da durante la temporada de secas, materia orgánica como algas, plantas acuáticas, y residuos de las mismas, pudieron interferir en los valores de turbidez observados (Tomperi et al., 2020).

En los análisis de ACP se observó, durante la temporada de secas, una relación inversamente proporcional entre los valores de turbidez y MP en agua y sedimento. Se esperaría que la relación entre la turbidez y la concentración de MP hallados en agua mostraran una relación directamente proporcional, dada la relación que existe entre la turbidez y la medida de sólidos totales suspendidos (Tomperi et al., 2020; Effler et al., 1998). A su vez, dado que los valores de turbidez fueron tomados en el agua superficial del sistema y no en agua intersticial, la relación entre estas variables no parece muy clara. Se recomienda indagar más en futuros estudios. Cabe mencionar que la turbidez presentó baja representatividad dentro del ACP (ANEXO Fig. 1).

Destacan los valores de turbidez hallados en el sitio Huamuchiltita (HU) y en Baluarte - Juntas (BJ) durante lluvias, los cuales se cree están ligados a la construcción de la presa Santa María, algunos kilómetros río arriba de los sitios de muestreo mencionados. Dicha obra puede generar disturbios tales como resuspensión de sedimentos, mayor acarreo de sedimentos alóctonos por apertura de caminos, agregado de sedimentos producto de residuos de material de construcción, entre otros, mismos que se propagan río abajo.

Los valores de conductividad observados a lo largo de la cuenca se mantuvieron dentro del rango de normalidad para agua de ríos (Mainali & Chang, 2021), con excepción del valor observado en Chupaderos (CH) durante la temporada de secas. Se cree que éste puede ser reflejo de la actividad agrícola que se da en la zona (Wenner et al., 2003; Anexo: Tabla 1). Así mismo, se observaron valores más altos de conductividad eléctrica durante la temporada de secas. Se supone que esto es resultado del efecto de dilución que la precipitación puede ocasionar durante la temporada de lluvias. Los valores observados en el sitio PUP apuntan a deberse a la entrada de agua marina al sistema fluvial (Bukaveckas, 2009).

En el ACP se pudo observar la estrecha relación que existe entre la conductividad y los sólidos totales disueltos (STD), además, dichas variables fueron las que mejor representación tuvieron dentro del análisis (ANEXO, Fig. 1 y 2). Esta relación ha sido observada en estudios previos (Anh et al., 2023). Ninguna de estas variables guardó correlación con las concentraciones de MP halladas.

Finalmente, al hacer la prueba de ACP por casos (Anexo, Fig. 3 y 4), durante ambas temporadas el sitio PUP se mostró diferenciado del resto de los sitios. Este hecho se puede explicar debido a su ubicación dentro de un ambiente con alta influencia marina, lo cual modifica en conjunto todas las variables físico-químicas implicadas en este estudio, pero sobre todo la conductividad y los STD, variables que además fueron las mejor representadas en el ACP (Anexo, Fig. 1 y 2).

Durante la temporada de secas, se pudo observar que los sitios se ordenaron formando dos agrupaciones principales entre los sitios UP, SM, NAC, PA, AR, PB, RO, y los sitios CH, UA, CAC, MY, OCO, BJ, HU, HAB, APO. No es fácil de dilucidar qué variables influyeron en dichas agrupaciones, pues los ríos que componen cada grupo son de diferente orden, pertenecen a diferentes vertientes y no se encuentran en alguna zona particular de la cuenca hidrológica. Durante la temporada de lluvias no se observó ninguna agrupación específica. Por lo tanto, se recomienda indagar más al respecto, y en un futuro, poder agregar los datos de oxígeno disuelto al análisis, pues suele ser una variable físico-química de gran importancia para la descripción de ambientes acuáticos (Bukaveckas, 2009).

## Caracterización física de PPP

### *Forma*

En general, tanto en las muestras de agua como en las de sedimento encontradas, durante ambas temporadas, la forma predominante de PPP fueron las fibras; dicha prevalencia se ha observado también en otros estudios (Koelmans et al., 2019; Lin et al., 2023; Nguyen et al., 2023).

En las muestras de agua y durante la temporada de estiaje, en los tres sitios ubicados en el cauce principal del río Baluarte antes de su desembocadura en el Océano Pacífico (Puente Poyeque (PUP), Apoderado (APO) y El Rosario (RO)), fue posible observar mayor presencia de PPP en forma de fragmentos/films, respecto a los otros sitios (Fig. 7). Esto se puede deber a la presencia de agua marina en la columna de agua (Fig. 5), la cual, al ser de mayor salinidad, cuenta con mayor densidad, y facilita que PPP de diferentes tamaños, formas y densidades permanezcan en la superficie de la columna de agua.

Por otro lado, al ser temporada de sequía, se podría también suponer que las fuentes de contaminación son cercanas a los puntos de muestreo, pues se supone un menor transporte de detritos dentro de la red fluvial de la cuenca durante dicha temporada. De hecho, en este último tramo del río se encuentran los asentamientos con mayor cantidad de habitantes dentro de la zona de estudio: 761 hab. en total río arriba del sitio RO, 18931 de APO y 12352 hab. de PUP (INEGI, 2020). Asociado al sitio APO se encuentra “El Rosario”, asentamiento con mayor número de habitantes de la CRB (17097 hab.). A su vez, asociado al sitio PUP se encuentra el poblado “Agua Verde”, el segundo sitio con mayor cantidad de habitantes de la CRB (4341 hab.) (INEGI, 2020).

Durante lluvias, en general, se observa mayor presencia de fragmentos/films en todos los sitios de estudio. En este caso, se supone que esto se relaciona, por un lado, al aporte de partículas por escurrimiento superficial, y también al aumento de velocidad del cauce, que genera turbulencia dentro de la columna de agua y facilita la resuspensión y transporte de fragmentos y films en el agua superficial (Li et al., 2023).

Por otro lado, en sedimentos también se observó prevalencia de PPP en forma de fibras, contrario a lo esperado, pues en otros estudios se ha observado una mayor presencia de fragmentos, al ser estos de mayor densidad y capacidad de sedimentación (Maheswaran et al., 2022). Cabe destacar que muchas de las fibras halladas fueron detectadas como

PET, polímero de alta densidad ( $1.38 \text{ g cm}^3$ ), factor que beneficia su sedimentación (He et al., 2021). La relativa presencia menor de fragmentos en temporada de lluvias, respecto a la temporada de secas, se relaciona al lavado de estos por la mayor velocidad de flujo que se da durante la temporada de alto caudal.

Finalmente, en el sitio Pánuco (PA) se observó amplia presencia de fragmentos/films en temporada de lluvias, relativa a la media general. Esto se puede deber a que el sitio de muestreo se encuentra cerca de un asentamiento humano (251 hab.) (INEGI, 2020), pero principalmente a que se encuentra cerca de una zona de actividad minera en etapa de exploración. Así mismo, el sitio Mayolita (MY) es receptor de un tributario impactado por la minería ubicado en las cercanías de Mayola, Sinaloa (Ruelas-Inzunza et al., 2011).

### *Color*

En general, los colores más predominantes fueron el azul claro en las muestras de agua, y el transparente en sedimento. Durante la temporada de lluvias, en las muestras de agua se observó una proporción más balanceada entre los diferentes colores encontrados. Esto podría ser indicio de una mayor variabilidad en las fuentes de origen de las PPP. Ríos-Mendoza et al. (2021) encontró que en general, la mayoría de microplásticos eran de color blanco en su estudio realizado en una zona aledaña al presente trabajo, en arena, sedimento y agua superficial. Por su lado, en Alvarado-Zambrano et al. (2023) se encontró una marcada presencia de fragmentos color azul claro en agua subterránea de las cercanías de la CRB. Se presume que las PPP de color azul claro puedan ser resultado de aguas residuales de uso doméstico, siendo estas originadas en el proceso de lavado de prendas y el posterior vertido de las aguas residuales en los ríos (Maheswaran et al., 2022).

Aunque el color de la partícula se podría relacionar con el material degradado que le dio origen, esto no siempre es así, pues como explican Fan et al. (2019), procesos de interperismo y erosión pueden generar decoloración en las PPP, volviendo estas transparentes/traslucidas. Entonces, la traslucidez de las partículas puede ser más bien indicativo de que llevan un amplio tiempo de residencia en el sistema fluvial. Así, se podría deducir que las partículas encontradas en sedimento suelen ser más viejas que las encontradas en agua, lo que es congruente con las diferentes dinámicas de estos dos compartimentos ambientales.

Finalmente, la relativa presencia menor de partículas de diferentes colores (no transparentes) en sedimento en algunos sitios de estudio se puede deber a su secuestro

por consumo de algunos predadores, pues se ha estudiado que, efectivamente, algunos organismos se ven atraídos por PPP de colores semejantes a los de su alimento natural (Abayomi et al., 2017).

### *Tamaño*

La distribución por tamaños de las PPP refleja el cambio hidrológico por temporadas de la CRB. Así, fue posible observar que partículas dentro del rango de menor tamaño (10 - 63  $\mu\text{m}$ ), tuvieron menor presencia en las muestras de agua superficial tomadas durante la temporada de alto caudal, siendo sólo el 1.7 % del total de las PPP. Durante la temporada de estiaje este rango representó el 10.3 % de la muestra total. La razón de este cambio entre estaciones ser resultado de la menor velocidad de corriente, condición que propicia que las partículas de menor tamaño permanezcan en la superficie del agua. Por el contrario, durante la temporada de mayor caudal, estas partículas pueden ser hundidas por movimientos convectivos de turbulencia, y encontrarse atrapadas dentro de la columna de agua más que en la superficie. Durante ambas temporadas el rango de 64 – 100  $\mu\text{m}$  fue el que tuvo menor representación (4.5 y 3.6 %, para lluvias y secas, respectivamente).

Se observó gran presencia de PPP dentro del rango de 10 – 63  $\mu\text{m}$  en los tres sitios de muestreo (PUP, APO, RO), situados en el caudal principal del río Baluarte, justo antes de su desembocadura en el Océano Pacífico, hecho que confirma la hipótesis de que su mayor presencia se debe a menores velocidades de flujo pues, los tres sitios se encuentran dentro de la cuenca baja, porción con casi nula pendiente (menor a seis grados) (INECC-FONNOR, 2018). Desgraciadamente, no se cuentan con datos de flujo para la temporada de secas.

En lo que respecta al sedimento, se observó una mayor presencia relativa de PPP dentro de los 1001 – 2500  $\mu\text{m}$ , durante ambas temporadas del año, siendo aproximadamente el 40 % de las partículas totales. La presencia de partículas relativamente grandes en sedimento se explica debido a su mayor capacidad de sedimentar. Partículas de tamaño menor a los 100  $\mu\text{m}$  representaron menos del 4 % de las partículas totales durante secas y menos de 2.5 % en lluvias.

En lluvias se observó una mayor presencia de partículas dentro del rango de los 2501 – 5000  $\mu\text{m}$  que en secas (17.6 vs. 14.7 %). Este ligero aumento durante eventos de precipitación se puede ligar al ingreso de partículas alóctonas al sistema, mismas que llegan por arrastre y escorrentía superficial (Capparelli et al., 2021). En general, se puede asumir

que el tamaño de las PPP halladas en sedimento de ríos está ligado a los cambios hidrológicos de la cuenca.

## Variación temporal de concentraciones de microplásticos

### *Agua*

Para las muestras de agua, en el caso de la temporada de secas, fue imposible recalcular concentraciones de microplásticos (MP) por sitio después de la caracterización física de las PPP, pues estas fueron agrupadas por tipo y color para su posterior caracterización química, por lo que se hizo una comparación entre las concentraciones de PPP de ambas temporadas. No se encontraron diferencias significativas ( $p$  value = 0.496). Aunque se esperarían mayores concentraciones de PPP durante la temporada de lluvias, debido a procesos de arrastre por escurrimiento superficial, esta diferencia no fue detectada. Esto podría deberse a procesos de dilución en la columna de agua.

Al analizar la variación de las concentraciones de MP encontradas en agua durante la temporada de lluvias ( $M = 0.11 \pm 0.07$  partículas  $L^{-1}$ ), se observa la mayor concentración en el sitio PUP (Fig. 26). Dicho máximo se puede explicar al tomar en cuenta que el sitio PUP se encuentra río abajo de seis localidades que suman un total de 12352 habitantes (INEGI, 2020), por lo que, es probable que en el sitio PUP se pueda percibir la captura de aguas residuales provenientes de estos asentamientos. Además, este es el sitio más próximo a la desembocadura del río Baluarte en el océano Pacífico, y aunque durante la temporada de lluvias la entrada de agua marina al cauce es menor, dada la naturaleza hidrológica del río Baluarte, se observa la influencia del agua marina en el cauce, la cual se refleja en los valores de conductividad medidos en dicho sitio que son de diferente orden que el resto (Fig. 5). Otros estudios han encontrado que las concentraciones de MP en agua superficial de zona costera suelen ser mayores que las del agua superficial de ríos exorreicos (Capparelli et al., 2021).

En la vertiente norte se observaron relativas altas concentraciones en los sitios, Pánuco (PA), Palos Blancos (PB) y Cacalotán (CAC). El sitio PB se encuentra cercano a la localidad que lleva el mismo nombre, la cual cuenta con una población total de 169 hab.; a su vez, PB podría estar recibiendo MP de Chupaderos (332 hab.), Piedra Blanca (71

habs.) y La Guásima (55 habs.), localidades que preceden al sitio de muestreo, entre La Uásima (UA) y PB. Por su lado, el sitio CAC, cercano a la localidad “Cacalotán” cuenta con una población total de 1625 habs. PA tiene un total de 251 habs.

Como se observa, a pesar de que CAC tiene más habitantes asociados, PB presentó concentraciones más altas. Se puede suponer entonces que, no necesariamente donde existe mayor número de habitantes, se dan las mayores concentraciones de MP en agua superficial. Esto habla de la dinámica altamente caótica de los MP, contaminación que sólo puede ser descrita como difusa.

En lo que respecta a la vertiente este, los sitios con los valores más altos de concentración de MP fueron Santa María (SM) y Mayolita (MY). En el caso de SM esto podría estar ligado a, principalmente, la construcción de la presa hidroeléctrica “Santa María”; en el caso de MY, el poblado más cercano llamado “Matatán” cuenta con una población total de 663 habs. y, además, el caudal puede estar percibiendo residuos de la actividad minera de Mayola, Sinaloa.

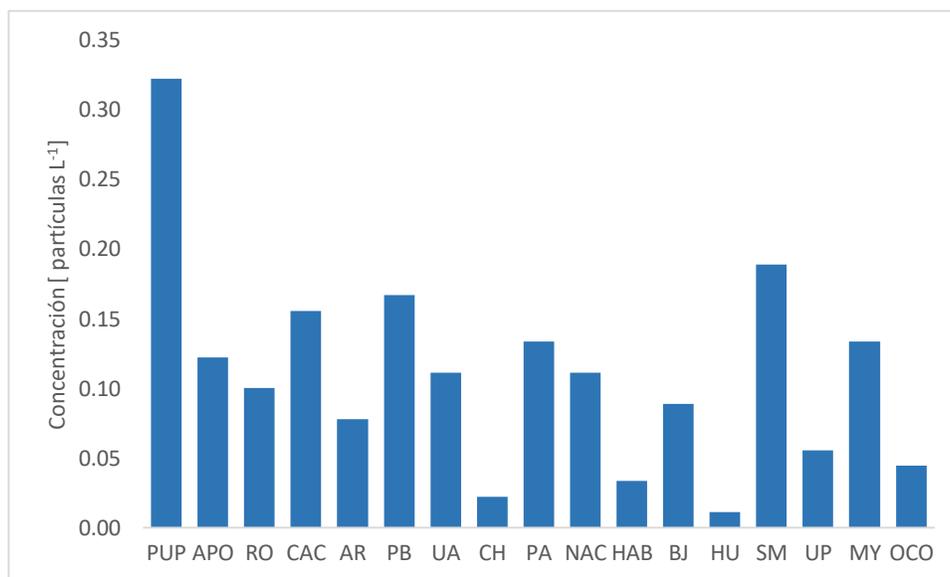


Fig. 26 Concentraciones de MP encontradas en agua superficial en los sitios de muestreo en la Cuenca del Río Baluarte.

## *Sedimento*

El 70 % de las PPP observadas bajo estereomicroscopio fueron caracterizadas químicamente con ATR-FTIR. Se recalcularon las concentraciones de microplásticos (MP) presentes en cada sitio después de dicha caracterización.

Al realizar la interpretación estadística (U de Mann-Whitney), se encontró que existen diferencias significativas entre las concentraciones de MP encontradas en sedimento durante la temporada de secas ( $M = 139.2 \pm 79.3$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ ) y las concentraciones encontradas durante la temporada de lluvias ( $M = 66.7 \pm 60.1$  partículas  $\text{kg}^{-1}$ ), siendo mayores las concentraciones de MP durante la temporada de estiaje ( $p$  value= 0.003). Esto se podría deber a la menor velocidad del cauce que se da durante la temporada de secas, misma que genera tiempos de residencia mayores, menor turbulencia y así, permite que los detritos presentes en columna de agua tengan mayores tasas de sedimentación (Nguyen et al., 2023). Cabe mencionar que se ha encontrado que los sedimentos superficiales suelen contar con concentraciones de MP ligeramente elevadas en comparación con sedimentos subsuperficiales (Ghinassi et al., 2023), por lo que las concentraciones presentadas en este estudio podrían tender a la sobre estimación. Solo en los sitios Huamulchitita (HU) y Puente Poyeque (PUP), se encontraron mayores concentraciones durante la temporada de lluvias (Fig. 27).

En el caso del sitio Huamulchitita (HU), la mayor concentración de MP en temporada de lluvias se pueden explicar por influencia de la construcción de la presa Santa María, la cual se encuentra a aprox. 5 km de distancia río arriba del punto de muestreo y que muy probablemente provoca arrastre de detritos, entre ellos detritos plásticos, y su posterior deposición en el sitio de muestreo. Además, cerca del sitio, se encuentran algunas vialidades por las que durante el periodo de muestreo se transportaban trabajadores, materiales e insumos para la construcción de la presa. Es de esperarse que dichas actividades sean consideradas fuentes potenciales generadoras de contaminación por MP en la zona (Boucher y Friot, 2017).

A su vez, el hecho de que en el sitio Puente Poyeque (PUP) se observen mayores concentraciones de MP durante la temporada de lluvia (Fig. 27) se podría deber a que dicho sitio recibe afluentes de seis diferentes asentamientos: El Pozole, El Chupadero, Apoderado, Ejido Cajón de Agua no. 2, Agua Verde y Chametla, mismos que suman un total de 12325 habitantes. Durante la temporada de lluvias, la contaminación por descarga

de aguas de desecho doméstico de este conjunto de localidades puede tener un mayor alcance y, por tanto, ser observada a varios kilómetros río abajo. También se debe tomar en cuenta la posible entrada de agua marina en la zona de muestreo, misma que se corrobora con los niveles de conductividad eléctrica que se manifestaron en el punto de extracción de muestra (Fig. 5). Estudios confirman que, en ríos, la zona de mayor acumulación de MP se da cerca de su desembocadura (Simon-Sánchez et al., 2019).

Los resultados de las pruebas de Spearman, que correlacionaron las concentraciones de MP halladas en ambas temporadas con el número de habitantes asociados a cada sitio de muestreo, arrojaron como resultado que no existen correlaciones entre ambos datos ( $p = 0.723$  y  $p = 0.487$ , para secas y lluvias, respectivamente). Se cree que este resultado sólo describe la generalidad, pero no casos puntuales como lo son los sitios HU y PUP.

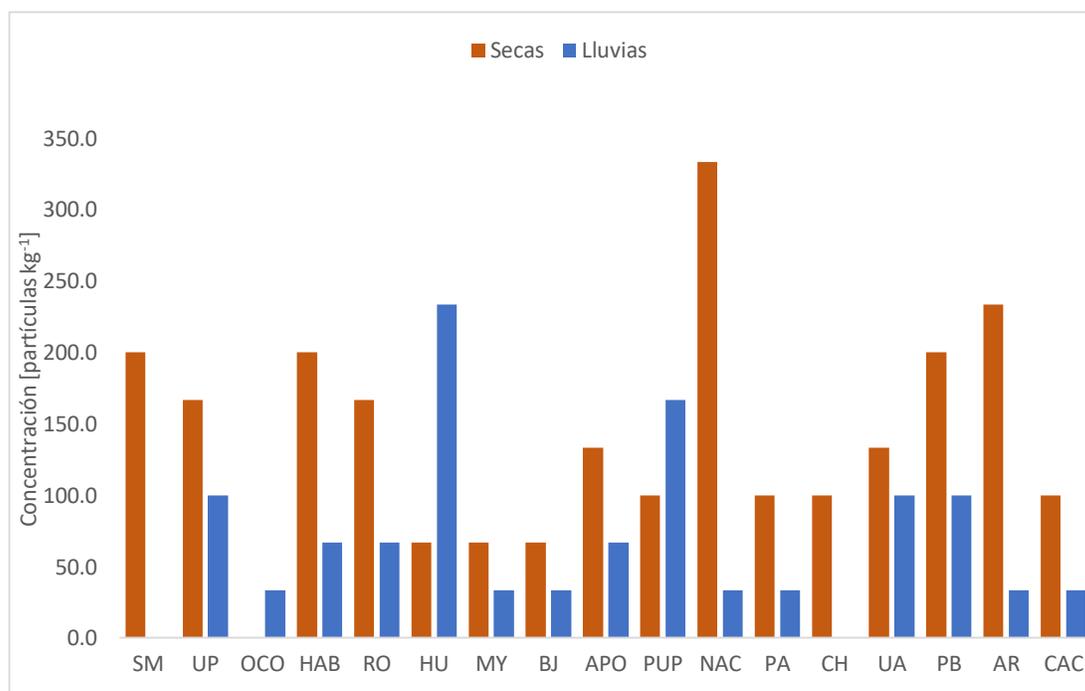


Fig. 27 Comparación de las concentraciones de MP encontradas en sedimento en las dos diferentes temporadas de muestreo en la Cuenca del Río Baluarte.

## Caracterización química

Durante la temporada de secas se identificó la presencia de siete tipos de polímeros en las muestras de agua superficial de la CRB: Celofán, Polipropileno (PP), Polietileno (PE), Poliacrilonitrilo (PAN), Resina Alquídica (RA), Polietileno tereftalato (PET) y Rayón. Durante la temporada de lluvias se identificaron trece diferentes polímeros: PET, PP, RA, PE, Rayón, Poliestireno (PS), Poliuretano (PU), Resina de poliéster (RP), Acrílico, Nylon, Poliacrilamida (PAM), Politetrafluoretileno (PTFE) y Resina fenólica (RF) (Fig. 30 y 31).

Reciente literatura ha demostrado que, tanto en agua continental como en el océano, el polietileno (PE) es el tipo de polímero más abundante, seguido del poliéster (PEST), poliamida (PA), acrílico y polipropileno (PP) (Orona-Návar et al., 2022; Apetogbor et al., 2023). En este estudio se encontró PE tanto en agua durante ambas temporadas como en sedimento durante temporada de lluvias. También se detectó acrílico (ambas matrices en lluvias) y PP (agua y sedimento en secas).

Se observó una mayor variedad de polímeros durante la temporada de alto caudal, lo que podría relacionarse con el efecto de arrastre que el escurrimiento superficial supone, a eventos de inundación, al derrame de agua del sistema de alcantarillado en ambientes urbanizados, entre otros fenómenos que tienen lugar durante la temporada de lluvias (Nguyen et al., 2023; Capparelli et al., 2021). A su vez, se podría suponer que, durante secas, el origen de los MP hallados es cercano al punto de muestreo, es decir, se trata de contaminación puntual, mientras que durante lluvias se trata de contaminación difusa. Se reconoce como contaminación puntual a aquella de la que se pueden detectar las fuentes y dichas fuentes tienen una localización geográfica precisa e identificable en el espacio. La contaminación difusa, por su lado, es aquella en la que la localización de las fuentes resulta más compleja, al ser esta originada por fuentes distribuidas, en espacios lejanos al punto de detección y, además, converger con muchos otros factores que la pueden magnificar, acumular, dispersar, entre otros fenómenos (NRDC, 2018).

Por otro lado, según la naturaleza de los polímeros encontrados, podemos observar algunos típicamente usados en la industria textil, como el Rayón y Nylon. Además, tanto en las muestras de agua como en los sedimentos, fue posible percibir una porción de micropartículas identificadas químicamente como algodón, que fue mayor al 30 % en todos los casos (Fig. 28). Al encontrar también presencia de Nylon y Rayón, y dado que en la región no existen plantíos de algodón para explotación textil, se puede apuntar a la

descarga de aguas residuales de uso doméstico (lavado de ropa), en los ríos de la CRB como una fuente de contaminación puntual probable (Sánchez Orendain, 2019). Algunos estudios recientes clasifican al algodón como MP (Xia et al. 2021; Apetogbor et al., 2023).

Aunque el algodón comparte características físicas con los MP tales como su tamaño, forma y coloración, no así, con una de las características más relevantes y alarmantes de otros polímeros, que es su tasa mínima de biodegradación, factor que disminuiría su toxicidad frente a los MP (Volokita et al., 1996). Aun así, al ser tan pequeñas, las micropartículas de algodón (casi sin excepción con forma de fibra), también cuentan con el potencial de actuar como vectores de otros contaminantes (pesticidas, organoclorados, metales pesados, HAPs, por mencionar algunos). De ser así, se podría explorar incluso su utilidad como tecnología de remediación ambiental.

Entonces, se podría asumir que existe mayor riesgo de confundir PPP con MP en muestras de sedimento que en muestras de agua.

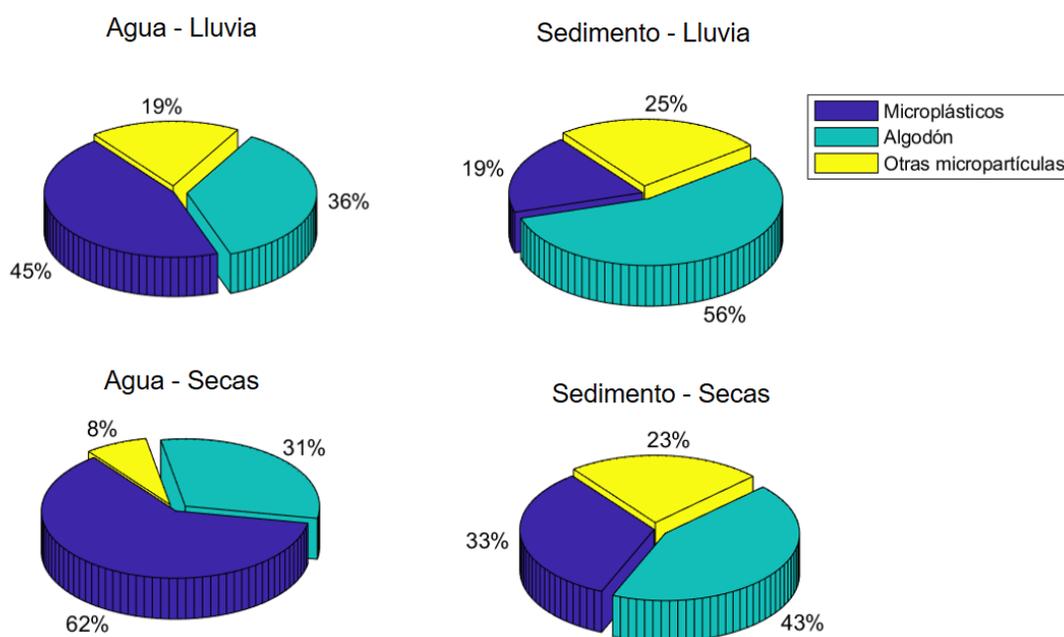


Fig. 28 Porcentaje de algodón encontrado a lo largo del estudio en las diferentes matrices analizadas.

El PET es el polímero con mayor porcentaje de presencia en este estudio (68 % agua en secas, 56 % agua en lluvias, 25 % sedimento en secas y 52 % sedimento en lluvias). El PET es el termoplástico más ampliamente reciclado y, es comúnmente usado para el embalaje (rígido o flexible). Dicho polímero ha mostrado ser más tóxico que el PE en ambientes acuáticos (Apetogbor et al., 2023), por lo que su amplia presencia en las aguas superficiales de la CRB debe ser enfatizada. Además, dado que el PET es un polímero de alta densidad ( $1.38 \text{ g cm}^3$ ) (He et al., 2021), y aun así se observó una amplia presencia en aguas superficiales del sistema fluvial de estudio, se supone entonces que las fuentes de contaminación son cercanas a los puntos de muestreo, no dando lugar así a su sedimentación.

El PE y el PP suelen ser usados en bolsas de empaque de comida, y en los sectores de agricultura y pesca (Xia et al., 2021). La agricultura, es la actividad económica más relevante de CRB. Según INECC-FONNOR (2018) la mayoría de los sitios de muestreo del presente estudio se ubican dentro de zonas en transición de suelo de uso agrícola a suelo urbano y se encontraron tanto en agua como en sedimento en ambas temporadas muestreadas (< 10 %). Principalmente se presenta el cultivo de sorgo forrajero, pastos, coco, chile, tomate verde y rojo, maíz y mango, siendo este último el principal (Alvarado-Zambrano et al., 2023). De igual forma, en Ríos-Mendoza et al. (2021), también se encontró dentro de los polímeros más comunes al PP, PE y PET. El Ftalato de dialilo (DAP), presente en muestras de sedimento durante lluvias (3 %), suele usarse como precursor del PE y el PP, entre otros polímeros.

La resina de poliéster (RP) es la resina más ampliamente usada; representa alrededor del 75 % de las resinas utilizadas (Loos, 2015). Se encontró en muestras de sedimento en secas (4 %) y en agua durante lluvias (1 %). Suele emplearse en el sector náutico, en autopartes, depósitos de agua, tuberías, en esculturas y moldes, revestimiento de madera, metal y concreto, esto dadas sus propiedades termoestables, hidrofóbicas, su alta estabilidad química, eléctrica y mecánica, su translucidez óptica, bajo costo y su alta resistencia a la corrosión, al calor y a la radiación UV (Elchalakani et al., 2023). La resina de poliéster también se usa en combinación con fibras de vidrio para producir plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), que es un material ligero, pero fuerte y duradero.

A su vez, la resina alquídica (RA), la cual fue la resina más ampliamente usada durante los años 50's, suele ser usada como aislante eléctrico y como revestimiento industrial. Se encontró en muestras de sedimento en secas (6 %) y en agua tanto en secas como en lluvias (1 %). Durante los inicios de los 2000's este tipo de resinas ganaron

popularidad en algunos mercados de EUA para su uso doméstico, dada su facilidad de limpieza, resistencia a la luz y su baja demanda de disolventes (Edwards & Misláng, 2000). Finalmente, la resina fenólica (RF), la cual se reconoce como el primer producto polimérico producido comercialmente a partir de compuestos simples de bajo peso molecular, actualmente sigue siendo ampliamente usada en polvos de moldeo, resinas para laminación, adhesivos, aglutinantes, revestimientos de superficies e impermeabilizantes. Sin embargo, su uso en enchufes e interruptores domésticos es el más conocido. También suele usarse en manijas, teléfonos (partes externas), tapas y mangos de cacerolas, portalámparas, planchas eléctricas y en objetos donde un alto aislamiento eléctrico no es requerido (Brydson, 1999). Se encontró RF en muestras de agua en lluvias (1 %).

Por otro lado, el poliuretano (PU), que fue diseñado en 1937 por el Dr. Otto Bayer y su equipo, es uno de los plásticos más ampliamente usados en la industria y en CASE (revestimientos, adhesivos, selladores y elastómeros, por sus siglas en inglés) (Das & Mahanwar, 2020). Los principales usos del PU son: construcción, transporte, sector náutico, muebles y ropa de cama, en maquinaria, empaquetado, textiles, ropa y accesorios, electrónica, calzado, entre otros (CPI, 2012 en Das & Mahanwar, 2020). Se encontró PU en muestras de sedimento en secas (1 %) y agua en lluvias (2 %).

Las poliacrilamidas (PAM) son una familia de polímeros solubles en agua de alto peso molecular (Geraldí et al., 2016). Fueron encontradas en muestras de sedimento en secas y en agua durante lluvias (2 %). Suelen ser usadas como floculantes y espesores en la industria petrolera, en la construcción, en la recuperación de minerales en la industria minera y en el tratamiento de aguas residuales. También se les usa en la agricultura, horticultura, y en la producción de papel (Buchholz, 1992; Doble & Kumar, 2005). Igualmente, se les ha dado uso como gel ultra absorbente en laboratorios de biotecnología (electroforesis) (Arvanitidou et al., 1992; Clarke, 1987).

El politetrafluoretileno (PTFE) es un polímero de alto peso molecular y, generalmente es una sustancia no reactiva, debido a la naturaleza altamente estable de los enlaces de carbono y flúor presentes en su estructura (Crawford & Quinn, 2017). El PTFE es comúnmente conocido como Teflon®. Dentro de sus principales propiedades está su hidrofobicidad y bajo coeficiente de fricción, los cuales se deben a la alta electronegatividad de los átomos de flúor, así como su alta capacidad como aislante. Su uso más común es como revestimiento antiadherente de utensilios de cocina. También es usado como semiconductor, en algunos dispositivos médicos, como revestimiento de contenedores de productos químicos a granel, en anteojos, hojas de afeitar, y como ingrediente inerte en

pesticidas (Radulovick & Wojcinski, 2014). El PTFE fue encontrado en muestras de agua durante la temporada de lluvias (1 %).

Los polímeros acrílicos, comúnmente conocidos simplemente como acrílicos, son polímeros que contienen ésteres de ácido acrílico y metacrílico (Luan et al., 2011). La gran mayoría de los polímeros acrílicos disponibles comercialmente son copolímeros de ésteres acrílicos y metacrílicos. La polimerización puede ocurrir en solución, en emulsión o en suspensión. El polímero de calidad en suspensión suele usarse para moldear polvos. Los de grados de emulsión y solución se usan en recubrimientos y como adhesivos. Gracias a su alta resistencia a la radiación ultravioleta, al calor, al ozono, a productos químicos, al agua, a disolventes de limpieza en seco y a sus bajas tasas de endurecimiento, los acrílicos suelen ser usados como materiales de revestimiento posterior en alfombras y telas de tapicería de automóviles, cortinas para ventanas y en telas para prendas exteriores (Jalan Uddid, 2010). Así pues, el polimetilmetacrilato (PMM), que también es parte de la familia de los polímeros acrílicos, es un polímero de bajo peso molecular, con buenas propiedades mecánicas, baja toxicidad y es no biodegradable. Dicho polímero ha sido ampliamente usado en aplicaciones médicas, ya sea para ayudar en defectos craneofaciales, como cementante de huesos, prótesis dentales (Jessy & Ibrahim, 2014 en Ali et al., 2015). Se encontraron MP de acrílico en muestras de sedimento y agua durante lluvias (12 y 3 %, respectivamente).

El poliacrilonitrilo (PAN) es también un polímero de la familia de las resinas de acrílico que se crea a partir de la polimerización del acrilonitrilo. El acrilonitrilo se obtiene al hacer reaccionar propileno con amonía y en presencia de oxígeno. El monómero acrilonitrilo tiene alta toxicidad y se le reconoce como una sustancia carcinogénica, pero como polímero, el PAN, no tiene ninguna propiedad peligrosa. Comúnmente, las fibras de poliacrilonitrilo se suele usar en telas, como sustituto de la lana, para fabricar prendas para vestir o alfombras. Las fibras acrílicas también se suelen usar como precursoras en la producción de fibras de carbono y grafito, por lo que tienen amplio uso dentro de la industria de la tecnología (Britannica, 2023). Se encontró PAN en agua y sedimento durante secas (1 %).

El celofán, por su lado, es un polímero creado a partir de celulosa regenerada, que puede ser tomada de madera, cáñamo, algodón u otros materiales (McKeen, 2019). Es un polímero transparente, resistente a los olores, duro, resistente a la grasa e impermeable a los gases. Por sus características suele ser usado como material de empaque de alimentos,

dulces, entre otros (Britannica, 2019). MP de celofán fueron encontrados en muestras de sedimento y agua en secas (14 y 8 %, respectivamente).

En las muestras de sedimento recolectadas durante la temporada de secas, se observaron diez diferentes tipos de polímeros: Celofán, Poliacrilonitrilo (PAN), PET, PP, PS, PU, Policloruro de vinilideno (PVDC), RA, Rayón y RP. En las muestras tomadas respectivas a la temporada de flujo alto, se encontraron sólo seis diferentes tipos de polímeros: PET, PS, Rayón, Acrílico, Ftalato de dialilo (DAP) y PE. Esta mayor variedad de polímeros en sedimentos durante la temporada de secas que se encontró se puede deber a que, durante la temporada de secas el menor caudal puede generar condiciones más propicias para que polímeros de diferentes densidades sedimenten, mientras que, durante la temporada de lluvias, polímeros de menores densidades pueden ser resuspendidos y transportados dentro de la columna de agua río abajo.

El policloruro de vinilideno (PVDC), es un copolímero de cloruro de vinilideno (al 90% aprox.) con monómeros de cloruro de vinilo. Gracias a su excelente impermeabilidad gaseosa, se suele usar principalmente para el empaquetado de comida, incluyendo el envasado de aves, embutidos, quesos, snacks, té, café y confitería, y el envasado en atmósfera modificada de productos alimenticios (Goswani & Mangaraj, 2011).

## CONCLUSIONES

En la Cuenca del Río Baluarte, se encontraron mayores concentraciones de MP en sedimento durante la temporada de secas, respecto a la temporada de lluvias. Mientras que, no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de MP en agua superficial entre las dos temporadas del año muestreadas.

En general, tanto en agua como en sedimento, la forma predominante de PPP (posibles partículas plásticas) encontradas fueron las fibras. Los colores que dominaron fueron el azul claro, en agua, y el transparente para el sedimento. Los tamaños de PPP más frecuentes fueron de 101 a 2500  $\mu\text{m}$  en agua y de 1001 a 5000  $\mu\text{m}$  en sedimento.

En lo referente a la variedad de polímeros, en agua se encontró mayor variedad de polímeros durante la temporada de lluvias, mientras que, en sedimento, se encontró mayor variedad de polímeros durante la temporada de secas. En todos los casos, el polietileno tereftalato (PET) fue el polímero con mayor representación en este estudio. No se observó ninguna tendencia en la distribución de los microplásticos a lo largo de las secciones de las cuencas estudiadas (cuencas media y baja).

Por otro lado, se encontró alta presencia de algodón en las PPP analizadas, tanto en muestras de agua como de sedimento. La presencia de algodón en combinación con fibras de polietileno tereftalato (PET), Nylon y Rayón, puede apuntar a la descarga de aguas residuales de uso doméstico (lavado de ropa) en los ríos de la Cuenca del Río Baluarte como una fuente de contaminación muy probable.

## RECOMENDACIONES

Para futuros estudios, sería interesante idear un muestreo que esté mayormente ligado a la observación de procesos de difusión de la contaminación por microplásticos (MP), tanto temporal como espacialmente. Sería de notable utilidad la observación a mayor detalle de la evolución de las concentraciones de MP, en agua y sedimento, a lo largo de eventos de precipitación. Así mismo, sería interesante muestrear en diámetros variados de un mismo punto potencial de contaminación.

El presente estudio también puede ser enriquecido realizando el análisis de materia orgánica (MO) presente en las muestras de sedimento recabadas, para así, poder analizar la posible correlación entre las concentraciones de MP y la MO presente. De esta forma, también se podría aportar al mejor entendimiento de las correlaciones existentes entre las concentraciones de MP y otras variables físico-químicas, tales como el pH y la salinidad de los diferentes sistemas limnológicos.

Los altos porcentajes de PPP no plásticas encontrados en este estudio, tanto en agua como en sedimento, evidencian la relevancia de seguir desarrollando nuevas metodologías dentro de la investigación de la contaminación por microplásticos en las diferentes matrices estudiadas. Actualmente, se siguen explorando métodos de extracción de microplásticos que ayuden a generar resultados más satisfactorios (Reineccius et al., 2023).

Con la información que actualmente se cuenta sobre el estado del arte en la contaminación por microplásticos, se podrían comenzar a diseñar soluciones. La implementación de herramientas de bioremediación (organismos filtradores, bacterias degradadoras de plástico, micorremediación) en plantas de tratamiento de agua podrían resultar factibles. Por otro lado, siendo el embalaje el uso del 40 % del plástico producido, buscar nuevas alternativas en esta aplicación debe ser prioritario. Existen ya estudios que demuestran que micomateriales podrían ser una alternativa realmente eficiente (Sánchez-Hernández, 2023).

La evaluación del riesgo ecológico asociado a la contaminación por microplásticos es apremiante y vital para el desarrollo e implementación de legislación ambiental a favor de la protección y conservación de la biota planetaria. El establecimiento de límites permisibles de concentraciones de MP que tomen en cuenta la diversidad polimérica

existente en los ambientes naturales es urgente. Además, es apremiante el entendimiento de los mecanismos mediante los cuales los MP generan efectos nocivos en los diferentes organismos.

Previos estudios puntualizan en el hecho de que, para llegar al establecimiento de dichos límites, primero se requiere de la homogeneización de los métodos usados en el muestreo, extracción y medición de microplásticos, la implementación de mejores controles de calidad, así como mayor claridad y transparencia en los reportes emitidos (Scherer et al., 2020; Redondo-Hasselerharm et al., 2023).

## REFERENCIAS

- Abayomi, O.A., Range, P., Al-Ghouthi, M.A., Obbard, J.P., Almeer, S.H., Ben-Hamadou, R. 2017. Microplastics in coastal environments of the arabian gulf. *Mar. Pollut. Bull.* 124, 181–188.
- Ali, U., Juhanni BT, K., Karim, ABD, Buang, N.A. 2015. A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA). *Polymer Reviews*, 0:1–28.
- Alvarado-Zambrano, D., Rivera-Hernández, J.R., Green-Ruiz, C.R. 2023. First insight into microplastic groundwater pollution in Latin America: the case of a coastal aquifer in Northwest Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*. 30:73600–73611.
- Anh, N.T., Can, L.D., Nhan, T.N., Schmalz, B., Luu, T.L. 2023. Influences of key factors on river water quality in urban and rural areas: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 8.100424.
- Apetogbor, K., Pereao, O., Sparks, C., Opeolu, B. 2023. Spatio-temporal distribution of microplastics in water and sediment samples of the Plankenburg river, Western Cape, South Africa. *Environmental Pollution* 323. 121303.
- Arreola-Alarcón, I. M., Reyes-Bonilla, H., Shakti, J. S., Rodríguez-González, F., Jonathan, M. P. 2022. Seasonal tendencies of microplastics around coral reefs in selected Marine Protected National Parks of Gulf of California, Mexico. *Marine Pollution Bulletin* 175. 113333.
- Arvanitidou, D., Hoaglund, D., Smisek, D. 1992. Polyelectrolyte Gels: Properties, Preparation, and Applications. *Symposium Series 480*, R. S. Harland, R. K. Prud'homme, eds., American Chemical Society, Washington, D.C.
- Buchholz, F.L. 1992. Polyacrylamides and Poly(Acrylic Acids). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Vol. A21, VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-6940 Weinheim.
- Bukaveckas, 2009. Rivers. En: Likens, G.E. 2009. *Encyclopedia of Inland Waters*. First Edition. Ed. Elsevier Bost. p. 143-154.
- Boucher, J., Friot, D., 2017. *Primary Microplastics in the Oceans: a Global Evaluation of Sources*. IUCN, Gland, Switzerland.
- Capparelli, M.V., Molinero, J., Moulattlet, G.M., Barrado, M., Prado-Alcívar, S., Cabrera, M., Gimiliani, G., Nacato, C., Pinos-Velez, V., Cipriani-Ávila, I. 2021. Microplastics in rivers and coastal waters of the province of Esmeraldas, Ecuador. *Marine Pollution Bulletin* 173. 113067
- Carson, H.S., Colbert, S.L., Kaylor, M.J., McDermid, K.J., 2011. Small plastic debris changes water movement and heat transfer through beach sediments. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1708-1713.
- Cera, A., Cesarini, G., Scalici, M. 2020. Microplastics in Freshwater: What Is the News from the World?. *Diversity*, 12, 276.
- Coppock, R.L., Cole, M., Lindeque, P.K., Queirós, A.M., Galloway, T.S. 2017. A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments. *Environmental Pollution* 230. 829-837.
- Crawford, C.B., Quinn, B. 2017. *Microplastic Pollutants*. Chapter 4: Physiochemical properties and degradation. 57-100. Elsevier Science.
- Cruz-Salas, A. A., Alvarez-Zeferino, J. C., Ojeda-Benitez, S., Cruz-Sotelo, S. E., Vázquez-Morillas, A. 2022. Solid waste and microplastics on the beaches of Holbox island, Mexico. *Regional Studies in Marine Science* 53. 102423.

- Das, A., Mahanwar, P. 2020. A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 3. 93-101.
- Della Torre, C., Bergami, E., Salvati, A., Faleri, C., Cirino, P., Dawson, K.A., Corsi, I., 2014. Accumulation and embryotoxicity of polystyrene nanoparticles at early stage of development of sea urchin embryos *Paracentrotus lividus*. *Environ. Sci. Technol.* 48, 12302-12311.
- Ding, L., Mao, R., Guo, X., Yang, X., Zhang, Q., Yang, C. 2019. Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China. *Science of the Total Environment* 667. 427-434.
- Doble, M., Kumar, A. 2005. *Biotreatment of Industrial Effluents*. Chapter 9: Degradation of Polymers. 101-110.
- Edwards, K.N, Misleng, H.B. 2000. *Applied Polymer Science: 21st Century*. History of Coatings. 439-447.
- Effler, S.W., Perkins, M. G., Ohrazda, N., Brooks, C. M., Wagner, B. A., Johnson, D. L., Peng, F., Bennett, A. 1998. Turbidity and Particle Signatures Imparted by Runoff Events in Ashokan Reservoir, NY, *Lake and Reservoir Management*, 14:2-3, 254-265.
- Elchalakani, M., Yang, B., Mao, K., Pham, T. 2023. *Geopolymer Concrete Structures with Steel and FRP Reinforcements*. Chapter 2: Mechanical properties of fiber reinforced polymer (FRP) and steel bars. 75-135.
- Fan, Y., Zheng, K., Zhu, Z., Chen, G., Peng, X. 2019. Distribution, sedimentary record, and persistence of microplastics in the Pearl River catchment, China. *Environmental Pollution*. 251, 862–870.
- Farrell, P., Nelson, K., 2013. Trophic level transfer of microplastics: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environ. Pollut.* 177, 1-3.
- Fisher, V., Elsner, N.O., Brenke, N., Schwabe, E., Brandt, A., 2015. Plastic pollution of the Kuril-Kamchatka Trench area (NW Pacific). *Deep Sea Res. II* 111, 399-405.
- Gelardi, G., Mantellato, S., Marchon, D., Palacios, M., Eberhardt, A.B., Flatt, R.J. 2016. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Chapter 9: Chemistry of Chemical. 149-281.
- Ghinassi, M., Michielotto, A., Uguagliati, F., Zattin, M. 2023. Mechanisms of microplastics trapping in river sediments: Insights from the Arno river (Tuscany, Italy). *Science of the Total Environment* 866. 161273.
- Hanvey, J.S., Lewis, P.J., Lavers, J.L., Crosbie, N.D., Pozo, K., Clarke, B.O. 2017. A review of analytical techniques for quantifying microplastics in sediments. *Anal. Methods*, 9, 1369–1383.
- He, B., Smith, M., Egodawatta, P., Ayoko, G.A., Rintoul, L., Goonetilleke, A., 2021. Dispersal and transport of microplastics in river sediments. *Environ. Pollut.* 279, 116884. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.116884>
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C., Thiel, M., 2012. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environ. Sci. Technol.* 46, 3060-3075.
- IBM Corp. Released 2017. *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0*. Armonk, NY: IBM Corp.
- INECC-FONNOR, 2018. *Plan de Acción para el Manejo Integral de Cuencas Hídricas: Cuenca del río Baluarte*. Proyecto: Conservación de Cuencas Costeras en el Contexto del Cambio Climático. 163pp.

Ivar do Sul, J.A., Spengler, A., Costa, M.F., 2009. Here, there and everywhere. Small plastic fragments and pellets on beaches of Fernando de Noronha (Equatorial Western Atlantic). *Mar. Pollut. Bull.* 58, 1236-1238.

Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L., 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768-771.

Jonathan, M.P., Sujitha, S. B., Rodríguez-González, F., Campos Villegas, L. E., Hernández-Camacho, C. J., Sarkar, S. K. 2021. Evidences of microplastics in diverse fish species off the Western Coast of Pacific Ocean, Mexico Ocean and Coastal Management 204.105544.

Lewis, W.M. 2009. Chemical Fluxes and Dynamics in River and Stream Ecosystems. En: Likens, G.E. 2009. *Encyclopedia of Inland Waters*. First Edition. Ed. Elsevier Bost. p. 335-342.

Likens, G. E. 2009. *Biogeochemistry of inland waters*. Elsevier. Estados Unidos.

Luan, B.L., Yang, D., Liu, X.Y., Song, G.L. 2011. Corrosion of Magnesium Alloys. Chapter 15: Corrosion protection of magnesium (Mg) alloys using conversion and electrophoretic coatings. *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. 541-564.

Mainali, J., Chang, H. 2021. Environmental and spatial factors affecting Surface water quality in a Himalayan watershed, Central Nepal. *Environmental and Sustainability Indicators* 9. 100096.

Manoukain, O.S., Sardashti, N., Stedman, T., Gailiunas, K., Ojha, A., Penalosa, A., Mancuso, C., Hobert, M., Kumbar, S.G. 2018. Biomaterials for Tissue Engineering and Regenerative Medicine. *Encyclopedia of Biomedical Engineering*.

Mao, Y., Li, H., Gu, W., Yang, G., Liu, Y., He, Q. 2020. Distribution and characteristics of microplastics in the Yulin River, China: Role of environmental and spatial factors. *Environmental Pollution* 265. 115033.

Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C., 2015. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOSOR&R-48.

Mattson, M.D. 2009. Alkalinity. En: Likens, G.E. 2009. *Encyclopedia of Inland Waters*. First Edition. Ed. Elsevier Bost. p. 348-353.

McKeen, L.W. 2019. The Effects of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers (Fourth Edition). Chapter 13: Renewable Resource, Sustainable and Biodegradable Polymers. *Plastics Design Library*. 425-438.

Moore, C.J., 2008. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat. *Environ. Res.* 108, 131-139.

MSFD GES Technical Subgroup on Marine Litter, 2013. Monitoring Guidance for Marine Litter in European Seas, Draft Report. European Commission, Brussels.

Mukundan, R., Pierson, D.C., Schneiderman, E.M., O'Donnell, D.M., Pradhanang, S.M., Zion, M.S., Matonse, A.H. 2013. Factors affecting storm event turbidity in a New York City water supply stream. *Catena* 107. 80–88.

Murray, F., Cowie, P.R., 2011. Plastic contamination in the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* (Linnaeus, 1758). *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1207-1217.

Nguyen, H.T., Nguyen, T.H., Hien, T.T., Hoang, M.T. 2023. Distribution and Characteristics of Microplastics in Nhue - Day River Basin, Vietnam. *Environment and Natural Resources Journal*. 21(3): 245-255.

- Piñon-Colin, T. de J., Rodríguez-Jimenez, R., Pastrana-Corral, M. A., Rogel-Hernandez, E., Toyohiko Wakida, F. 2018. Microplastics on sandy beaches of the Baja California Peninsula, Mexico. *Marine Pollution Bulletin* 131. 63–71.
- PlasticsEurope, 2020. *Plastics - The Facts 2020: An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*.
- PlasticsEurope, 2022. *Plastics - The Facts 2022: An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*.
- Prata, J.C., da Costa, J.P., Girao, A.V., Lopes, I., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T. 2019. Identifying a quick and efficient method of removing organic matter without damaging microplastic samples. *Science of the Total Environment* 686. 131–139.
- Quesada-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.
- Radulovick, L.L., Wojcinski, Z.W. 2014. PTFE (Polytetrafluoroethylene; Teflon®). Elsevier Inc.
- Rech, S., Macaya-Caquilpan, V., Pantoja, J.F., Rivadeneira, M.M., Madariaga, D.J., Thiel, M. 2014. Rivers as a source of marine litter – A study from the SE Pacific. *Marine Pollution Bulletin* 82. 66–75.
- Redondo-Hasselerharm, P.E., Rico, A., Koelmans, A.A. 2023. Risk assessment of microplastics in freshwater sediments guided by strict quality criteria and data alignment methods. *Journal of Hazardous Materials* 441. 129814.
- Retama, I., Jonathan, M.P., Shruti, V. C., Velumani, S., Sarkar, S.K., Priyadarsi D. Roy, Rodríguez-Espinoza, P. F. 2016. Microplastics in tourist beaches of Huatulco Bay, Pacific coast of southern Mexico. *Marine Pollution Bulletin* 113. 530–535.
- Rodrigues, M.O., Abrantes, N., Gonçalves, F.J.M., Nogueira, H., Marques, J.C., Gonçalves, A.M.M. 2018. Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal). *Science of the Total Environment* 633 (2018) 1549–1559.
- Ruelas-Inzunza, J., Green-Ruiz, C., Zavaleta-Nevárez, M., Soto-Jimenez, M. 2011. Biomonitoring of Cd, Cr, Hg and Pb in the Baluarte River basin associated to a mining area (NW Mexico). *Science of the Total Environment* 409. 3527–3536.
- Sánchez-Hernández, A. 2023. La revolución futura: biorremediación y micomateriales. *Dossier. Revista de la Universidad de México*. P 81-85.
- Scherer, C., Wolf, R., Volker, J., Stock, F., Brennhold, N., Reifferscheid, G., Wagner, M. 2020. Toxicity of microplastics and natural particles in the freshwater dipteran *Chironomus riparius*: Same same but different?. *Sci. Total Environ.* 711, 134604.
- Seeger, M., Errea, M.P., Begueria, S., Arnáez, J., Mart, C., Garcia-Ruiz, J.M. 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology* 288, 299–311.
- Shruti, V. C., Jonathan, M.P., Rodríguez-Espinoza, 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.
- Shruti V.C., Kutralam-Muniasamy G. 2023. Blanks and bias in microplastic research: implications for future quality assurance. *Trends Environ Anal Chem* 3:00203.

- Simon-Sánchez, L., Grelaud, M., García-Orellana, J., Ziveri, P. 2019. River Deltas as hotspots of microplastic accumulation: The case study of the Ebro River (NW Mediterranean). *Science of the Total Environment* 687. 1186–1196.
- Simon-Sánchez, L., Grelaud, M., Lorenz, C., García-Orellana, J., Vianello, A., Liu, F., Vollertsen, J., Ziveri, P. 2022. Can a Sediment Core Reveal the Plastic Age? Microplastic Preservation in a Coastal Sedimentary Record. *Environmental Science & Technology* 2022 56 (23), 16780-16788.
- StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Tomperi, J., Isokangas, A., Tuuttila, T., Paavola, M. 2022. Functionality of turbidity measurement under changing water quality and environmental conditions. *Environmental Technology*. Vol. 43. No. 7, 1093-1101.
- Van Cauwenberghe, L., Devriese, L., Galgani, F., Robbins, J., Janssen, C.R. 2015. Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects. *Marine Environmental Research* 111. 5-17.
- Volokita, M., Abeliovich, A., Soares, M.I.M. 1996. Denitrification of groundwater using cotton as energy source. *Waf. Sci. Tech.* Vol. 34. No. 1-2. 379-385.
- Wang, J., Guo, X., Xue, J. 2021. Biofilm-Developed Microplastics As Vectors of Pollutants in Aquatic Environments. *Environ. Sci. Technol.* 55, 12780-12790.
- Wang, W.F., Ndungu, A.W., Li, Z., Wang, J., 2017. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China. *Sci. Total Environ.* 575, 1369–1374.
- Waring, R.H., Harris, R.M., Mitchell, S.C., 2018. Plastic contamination of the food chain: a threat to human health? *Maturitas* 115, 64–68.
- Wegner, A., Besseling, E., Foekema, E.M., Kamermans, P., Koelmans, A.A., 2012. Effects of nanopolystyrene on the feeding behaviour of the Blue Mussel (*Mytilus edulis* L.). *Environ. Toxicol. Chem.* 31, 2490-2497.
- Wenner, D.B., Ruhlman, M., Eggert, S. 2003. The importance of specific conductivity for assessing environmentally impacted streams. Presented at the Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference. P 3.
- Wright, S.L., Thompson, R.C., Galloway, T.S., 2013a. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environ. Pollut.* 178, 483-492.
- Xia, F., Yao, Q., Zhang, J., Wang, D. 2021. Effects of seasonal variation and resuspension on microplastics in river sediments. *Environmental Pollution* 286. 117403.

### Consultas de páginas web:

Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (20 de marzo, 2023). *polyacrylonitrile*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/polyacrylonitrile>

Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (24 de julio, 2019). *cellophane*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/technology/cellophane>

INEGI (10 octubre, 2023). Archivo histórico de localidades geoestadísticas. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/ahl/>

SEMARNAT. Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales, importante corredor biológico para aves residentes y migratorias. (12 de mayo, 2017). <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/marismas-nacionales-conmemora-su-aniversario-de-la-reserva-de-la-biosfera?idiom=es>

Tekman, M.B., Gutow, L., Bergman, M., Peter, C. Litterbase. Litterbase analysis. Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine. <https://litterbase.awi.de/> . Consultado el 30 de agosto del 2023.

NRDC. La contaminación del agua: Todo lo que necesitas saber. <https://www.nrdc.org/es/stories/contaminacion-agua-todo-lo-necesitas-saber#prevenir>. Consultado el 2 de enero del 2024.

Sánchez Orendain, A.R. La economía del algodón en Sinaloa y Sonora. El Colegio de Sonora. (16 de septiembre del 2019). <https://www.colson.edu.mx/nota.aspx?nx=1679>. Consultado el 9 de enero del 2024.

## ANEXO

*Tabla 1. Descripción de actividades antropogénicas desarrolladas en los sitios de estudio.*

Nombre de Sitio	Ubicación geográfica		Clave	Orden	Actividades antropogénicas características
	Longitud	Latitud			
Puente Poyete	-106.012592	22.834704	PUP	3	Pesquería, agricultura, asentamiento rural > 200 habs.
Apoderado	-105.935257	22.916341	APO	3	Pesquería, agricultura, asentamiento rural > 200 habs.
El Rosario	-105.849401	22.999307	RO	3	Desarrollo urbano, manufactura alimenticia, industria alimenticia sector secundario, industria de transportes de sector terciario
Cacalotán	-105.843609	23.062265	CAC	2	Agricultura
Los Arrayanes	-105.866269	23.120302	AR	2	Agricultura, ganadería
Palos Blancos	-105.919186	23.234466	PB	2	Agricultura
La Guásima	-105.964983	23.317826	UA	2	Minería, agricultura
Chupaderos	-105.953413	23.361841	CH	2	Agricultura, asentamiento rural > 200 habs.
Pánuco	-105.902067	23.426464	PA	2	Turismo, asentamiento rural > 200 habs.
El Nacaral	-105.878055	23.429105	NAC	2	Rodeado de vegetación natural y carretera
Habitas	-105.766379	23.026534	HAB	3	Agricultura, centro de recreación
Baluartes - Juntas	-105.738003	23.031412	BJ	3	Agricultura
Mayola	-105.735683	23.027496	MY	2	Minería, agricultura, ganadería
Ocotitán	-105.664349	23.012031	OCO	2	Minería, agricultura, ganadería
Huamulchitita	-105.717029	23.081882	HU	3	Minería, agricultura
Santa María	-105.669616	23.110975	SM	3	Construcción presa hidroeléctrica, agricultura
Umón - Plumosas	-105.664122	23.105383	UP	2	Pesca artesanal, agricultura

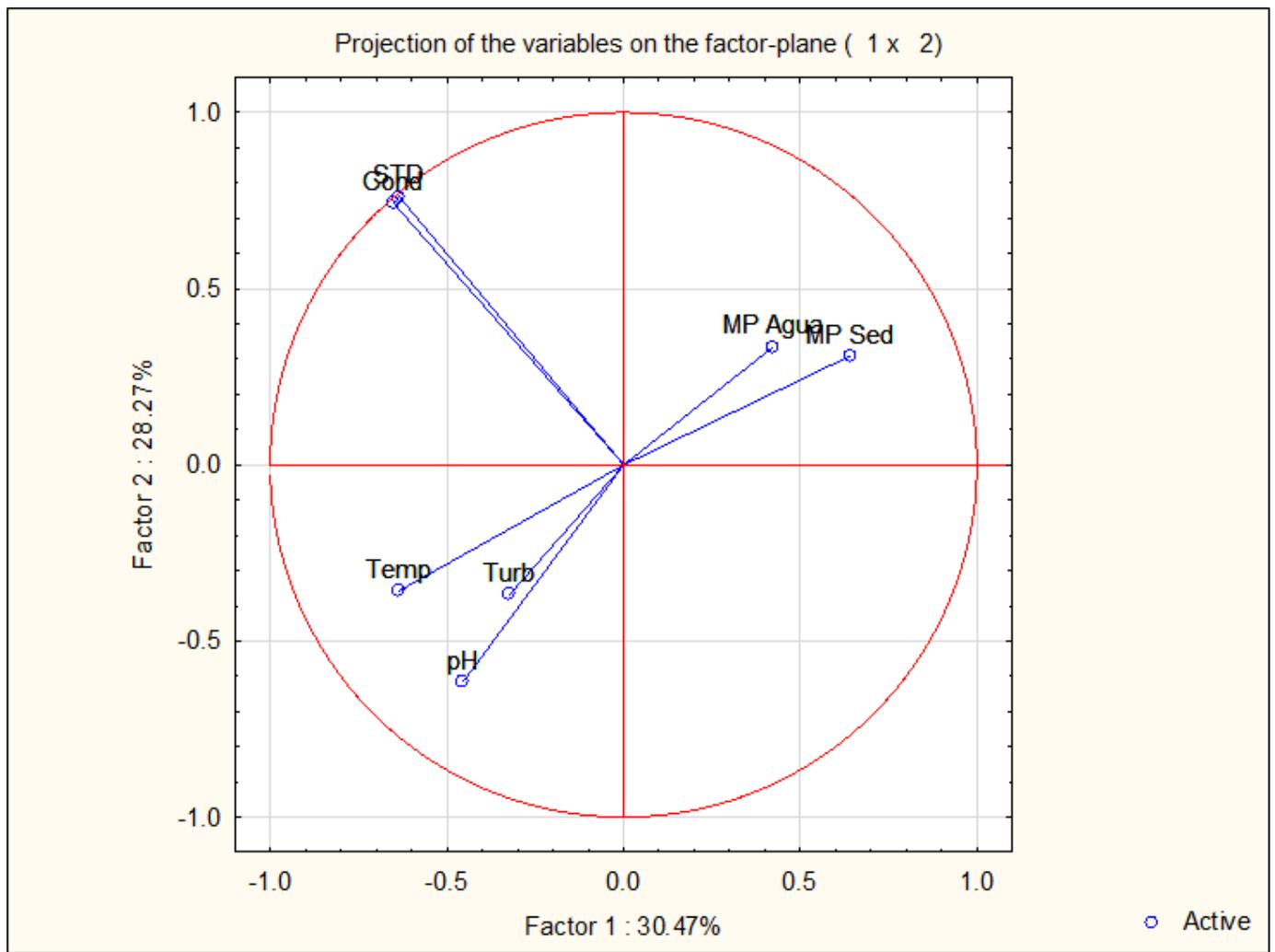


Fig. 1. Análisis de Componentes Principales para las variables físico-químicas y concentraciones de MP halladas en agua y sedimento en la CRB durante la temporada de secas.

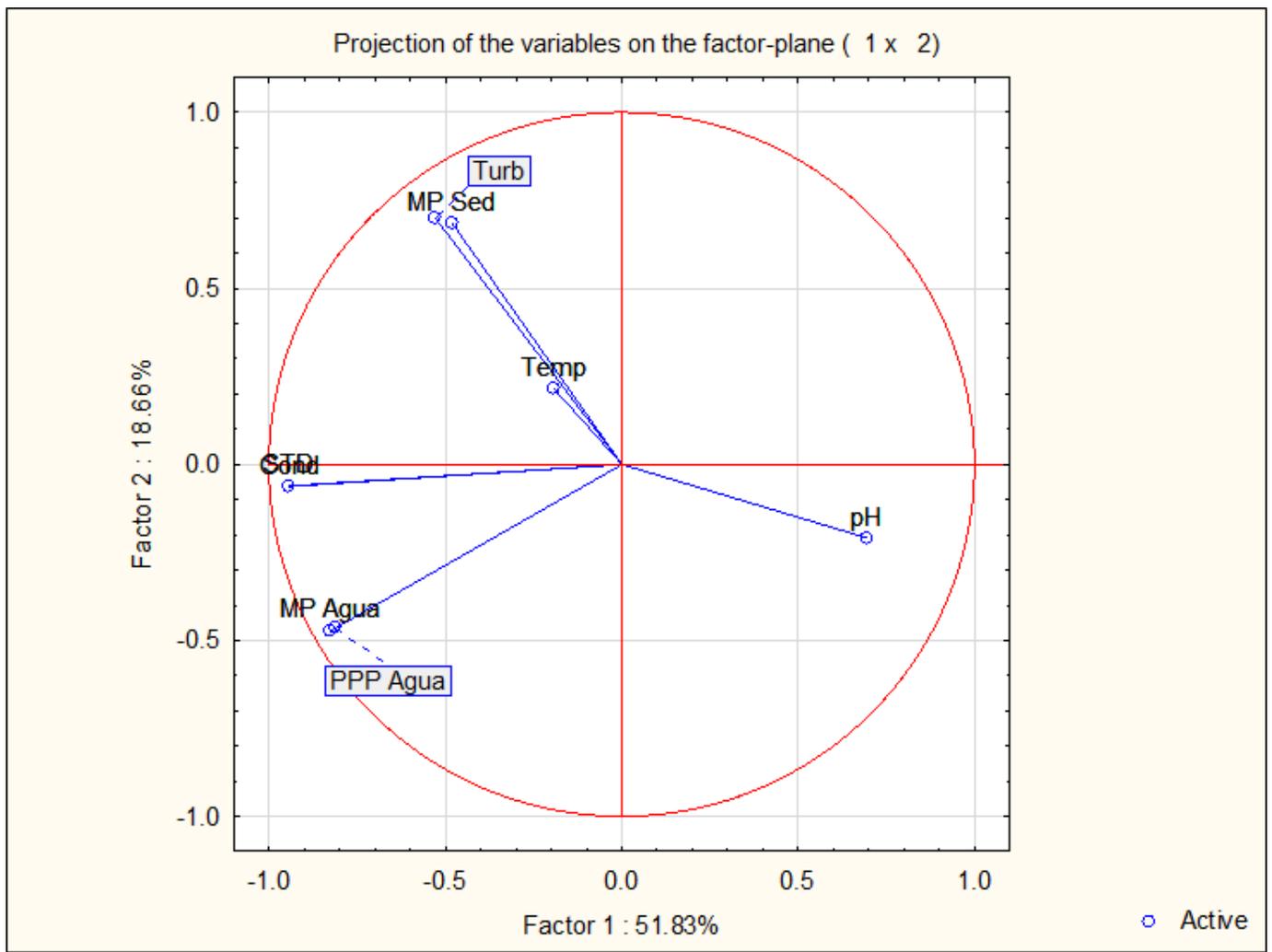


Fig. 2. Análisis de Componentes Principales para las variables físico-químicas y concentraciones de MP halladas en agua y sedimento en la CRB durante la temporada de lluvias.

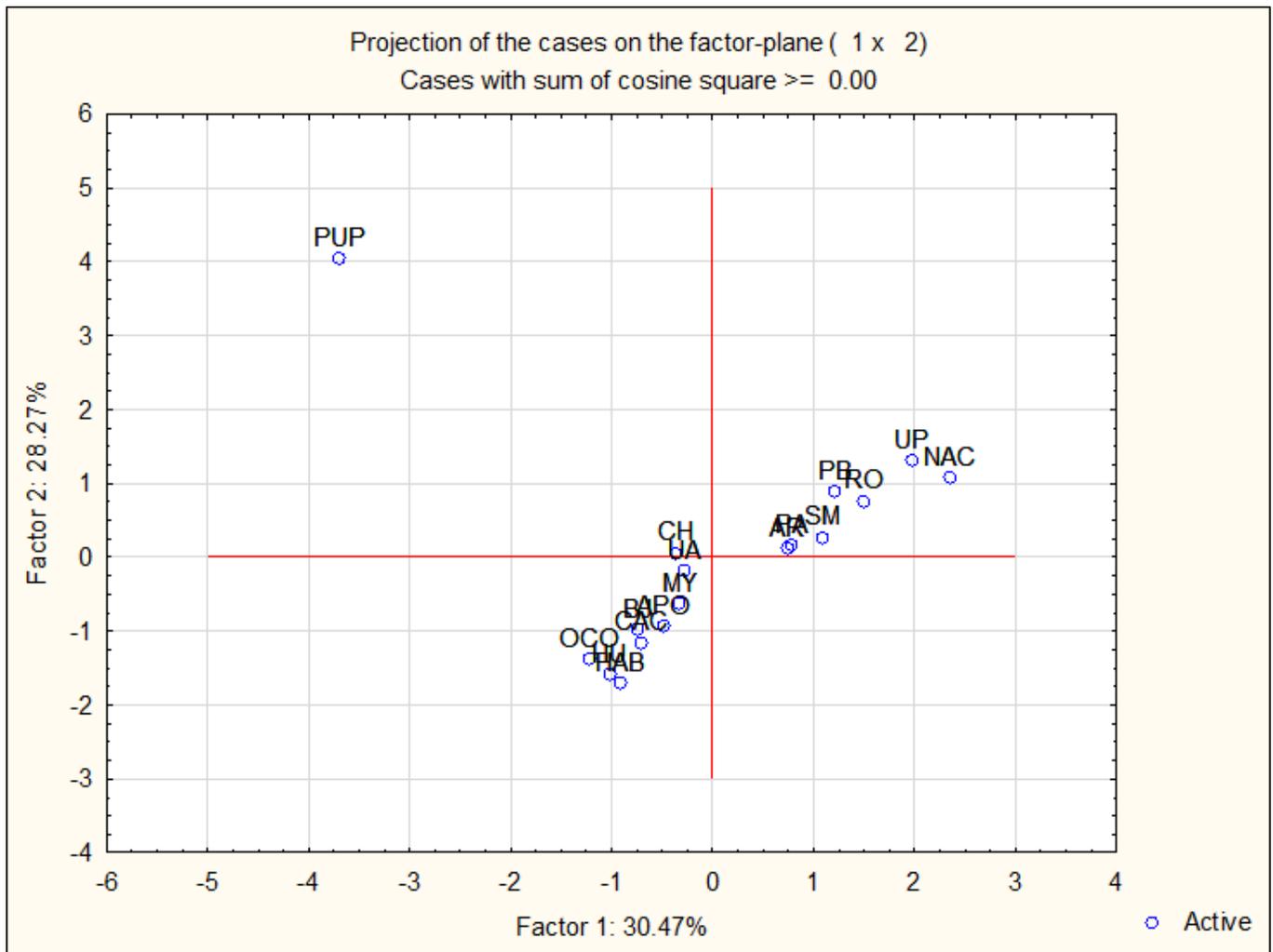


Fig. 3. Análisis de Componentes Principales por casos para las variables físico-químicas y concentraciones de MP halladas en agua y sedimento en la CRB durante la temporada de secas.

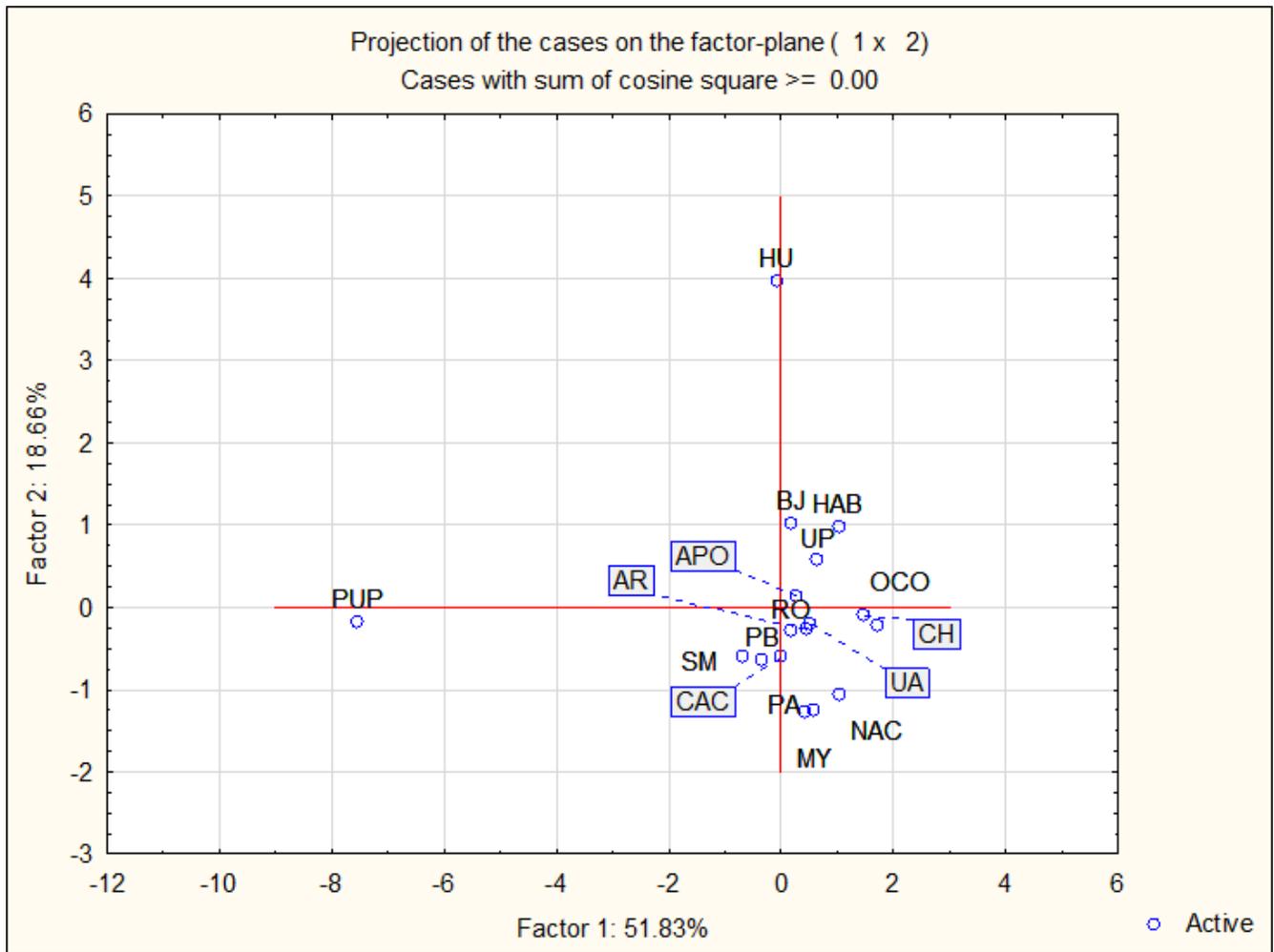


Fig. 4. Análisis de Componentes Principales por casos para las variables físico-químicas y concentraciones de MP halladas en agua y sedimento en la CRB durante la temporada de lluvias.