



Caracterización de microplásticos en sedimentos de humedales costeros  
de Chiloé y su relación con los residuos de la miticultura.

## Tesis

Entregada a La  
Universidad de Valparaíso  
En Cumplimiento Parcial De Los Requisitos  
Para Optar Al Grado De

Magister en Ciencias Biológicas Mención Biodiversidad y Conservación  
Instituto de Biología  
Facultad De Ciencias

Por

**Fernanda Patricia Vargas Castillo**

Junio, 2025

Director de Tesis:

Dra. Doris Oliva Ekelund

Co director de Tesis:

Dr. Benjamín Suárez Isla

INSTITUTO DE BIOLOGIA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE VALPARAISO

INFORME DE APROBACION  
TESIS DE MAGISTER

Se informa a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias que la Tesis de Magister

presentada por el candidato

FERNANDA PATRICIA VARGAS CASTILLO

Ha sido aprobada por la comisión de evaluación de la tesis, como requisito para optar al grado de Magíster en Ciencias Biológicas mención Biodiversidad y Conservación, en la presentación y defensa de tesis, rendida el XX de junio de 2025.

**Comisión Evaluadora de Tesis:**

Nombre de los integrantes:	Institución:	Rol en la comisión:
Prof. Doris Oliva Ekelund	Universidad de Valparaíso	Director(a)
Prof. Benjamín Suarez Isla	Universidad de Chile	Co-director(a)
Prof. Oliver Schmachtenberg	Universidad de Valparaíso	Evaluador(a) externo

*Dedicatoria:*

*A mi abuelita Nena, que a donde quiera que esté espero se sienta orgullosa de mí.*

# AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer al Centro de Investigación y Gestión de Recursos Naturales (CIGREN) y al Instituto de Biología de la Universidad de Valparaíso por facilitar el espacio de trabajo en la Facultad de muestras para procesar mis muestras. De igual manera quisiera agradecer al Programa de Magíster en ciencias Biológicas mención Biodiversidad y Conservación por el financiamiento que permitió exponer los resultados de esta investigación durante el Congreso de Ciencias del Mar 2025 y al Proyecto OIEA CHI7014 al Laboratorio de Toxinas Marinas de la Universidad de Chile por el financiamiento de esta tesis.

Este trabajo no hubiese sido posible sin la constante ayuda y orientación de los profesores Doris Oliva y en especial al profesor Benjamín Suarez, ya que ha sido clave no tan solo en desarrollo de este trabajo, sino que también en mi formación personal, otorgándome la confianza para seguir adelante cuando sentía que no podía más, dándome apoyo siempre y subiéndome el ánimo con una buena conversación y un cafecito. También, quisiera agradecer a todo el equipo del Laboratorio de Toxinas Marinas (LABTOX) de la Universidad de Chile, que se han transformado en mi segunda familia desde que llegué al laboratorio, haciéndome sentir cómoda y una más del equipo.

Finalmente quisiera agradecer a mi familia, por todo el apoyo que me han dado desde el comienzo, a mi hermana Camila, por escucharme y apoyarme cuando no estaba al cien y por darme alojamiento por tantos meses en Santiago para poder trabajar en los análisis de mis muestras. Por último, pero no menos importante, quisiera agradecer a mis mejores amigos Cristian y Dafna, por estar siempre en los mejores y peores momentos pese a la distancia. Y a todos mis amigos y gentecita que he conocido en el camino, que ha sido parte de este proceso, gracias por todo.

# INDICE DE CONTENIDOS

<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>7</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>8</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>9</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
HUMEDALES .....	13
HUMEDALES EN CHILOÉ.....	14
LA MITILICULTURA EN CHILOÉ .....	15
PLÁSTICOS .....	18
ADITIVOS.....	18
CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS.....	19
MECANISMOS DE FRAGMENTACIÓN DE PLÁSTICOS .....	19
MICROPLÁSTICOS.....	20
DISTRIBUCIÓN EN UNA BAHÍA O HUMEDAL .....	21
MICROPLÁSTICOS EN CHILE.....	22
PLÁSTICOS Y MICROPLÁSTICOS EN EL HUMEDAL DE CHULLEC .....	26
EL PROBLEMA .....	29
HIPÓTESIS.....	30
OBJETIVO GENERAL .....	30
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	30
<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>31</b>
ÁREA DE MUESTREO .....	31
EXTRACCIÓN DEL SEDIMENTO .....	32
EXTRACCIÓN DE MICROPLÁSTICOS.....	35
DIGESTIÓN DE MUESTRAS .....	35
SEPARACIÓN POR DENSIDAD .....	35
FILTRACIÓN .....	36
MICROSCOPÍA CONFOCAL RAMAN.....	37
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>40</b>
OBJETIVO ESPECÍFICO 1.....	40
OBJETIVO ESPECÍFICO 2.....	41
OBJETIVO ESPECÍFICO 3.....	52
COMPROBACIÓN INICIAL DE LA HIPÓTESIS .....	57
<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>61</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>67</b>



# INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Longline con cuerda continúa para cultivo de choritos. Tomado de Diaz et al 2014 .....	17
Figura 2 Fuentes de desechos plásticos y microplásticos en ecosistemas costeros, destacando el aporte de residuos domiciliarios y la mitilicultura descritos por Contreras et al., 2016. Elaboración propia .....	23
Figura 3 Listado de tipos de residuos que se encuentran en el humedal de Chullec. Contreras (2016) .....	26
Figura 4 Instrumentos utilizados para la industria acuícola frente al humedal de Chullec. Imagen propia .....	27
Figura 5 Residuos encontrados a lo largo del intermareal del humedal de Chullec en noviembre de 2022. Elaboración propia .....	27
Figura 6 Vista satelital del Humedal de Chullec. Fuente: Google Earth Pro .....	32
Figura 7 Puntos de muestreo en el humedal de Chullec. Elaboración propia .....	33
Figura 8 Filtros fijados en porta y cubreobjetos. Elaboración propia .....	36
Figura 9. Placas fijadas en platina de microscopio confocal Raman. Elaboración propia .....	38
Figura 10. Partículas encontradas mediante espectroscopía Raman y sus porcentajes (N = 564) .....	41
Figura 11. Partículas identificadas por espectroscopia Raman en sedimentos del humedal de Chullec.....	43
Figura 12. Polímeros identificados en los sedimentos del humedal de Chullec.....	44
Figura 13. Color de polímeros identificados en sedimentos del humedal de Chullec .....	45
Figura 14. Forma de polímeros identificados en sedimentos del humedal de Chullec .....	46
Figura 15. Fotografías de polímeros identificados en sedimentos: a) Fibra b) Fragmento c) Perla d) Film .....	47
Figura 16. Abundancia de celulosa y algodón en sedimentos del humedal de Chullec .....	48
Figura 17. Abundancia de partículas inorgánicas en sedimentos del humedal de Chullec....	49
Figura 18. Abundancia de pigmentos y tintes en los sedimentos del humedal de Chullec ....	50
Figura 19. Abundancia de polímeros en sedimentos del humedal de Chullec por nivel .....	51
Figura 20. Fotografías de las artes de pesca analizadas mediante espectroscopía Raman....	52
Figura 21. Análisis mediante espectroscopía Raman en muestras de chicote verde PP, red verde PP, saco malla azul PP, red azul PP, saco malla rojo PP y saco mala rojo PP comparadas con espectros de polipropileno de las bases de datos Slopp_e, RDWP, IRUG y CHILOE .....	54

Figura 22 Análisis mediante espectroscopía Raman en muestras de boya negra PE, boya azul PE, red negra PE y boya gris PE comparadas con espectros de polietileno de las bases de datos Slopp_e, RDWP, IRUG y CHILOE .....	55
Figura 23. Análisis mediante espectroscopía Raman en muestras de boya plumavit PS comparadas con espectros de poliestireno de las bases de datos Slopp_e, RDWP, IRUG y CHILOE .....	56
Figura 24. Espectros Raman de diferentes tipos de polímeros analizados. La numeración indica los materiales analizados: 1. corresponde a polipropileno (PP), 2. a polietileno (PE), 3. a poliestireno (PS) y 4. a policarbonato (PC). En cada caso, a) muestras obtenidas de artes de pesca, b) partículas identificadas en el sedimento .....	58
Figura 25. Espectros Raman de diferentes tipos de polímeros analizados. A) poliuretano (PU) b) acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) c) poliamida (PA) d) poliéster (PET) .....	59
Figura 26. Coeficientes de correlación (HQI) de los espectros obtenidos de los microplásticos del sedimento de las artes de pesca y las librerías de referencia de: a) PP b) PE y c) PS.....	60

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de estudios previos sobre microplásticos en sedimentos de humedales, incluyendo abundancia, profundidad de muestreo, principales polímeros detectados y método de análisis químico.....	22
Tabla 2 Ejemplos de malas prácticas y otros eventos asociados que generan desgaste en artes de pesca en el proceso productivo, que generan residuos de la mitilicultura (Tomada con modificaciones de Contreras et al., 2016) .....	28
Tabla 3 Ubicación de los puntos de muestreo en el humedal de Chullec.....	34
Tabla 4. Tipos y cantidad absoluta de partículas analizadas presentes en muestras del sedimento del humedal de Chullec .....	42
Tabla 5. Polímeros identificados mediante espectroscopía Raman.....	42
Tabla 6. Abundancia de polímeros identificados en sedimentos .....	51

# RESUMEN

Los humedales costeros del archipiélago de Chiloé, además de albergar una gran biodiversidad, son sitios clave para aves migratorias y especies bentónicas. Sin embargo, estos ecosistemas se encuentran crecientemente expuestos a la presión antrópica, especialmente por actividades acuícolas.

La presente tesis tiene como objetivo caracterizar los microplásticos (MPs) presentes en los sedimentos del humedal costero de Chullec, ubicado en la isla de Quinchao (Chiloé), y evaluar su posible origen en los residuos plásticos generados por la mitilicultura, actividad predominante en la zona.

Se diseñó un protocolo metodológico, que incluyó muestreo en 6 transectos con tres niveles de marea y tres réplicas en cada punto de muestreo, extracción de sedimento superficial (0–2 cm), digestión con peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), separación por densidad con cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ) y filtración al vacío. Las partículas extraídas fueron analizadas mediante microespectroscopía confocal Raman, técnica no invasiva que permitió la identificación química sin necesidad de preselección visual, abordando un total de 564 partículas distribuidas en 64 filtros.

Los resultados mostraron una alta heterogeneidad en la composición de partículas, predominando materiales naturales como celulosa ( $N = 128$ ) y partículas sin espectro Raman ( $N = 233$ ), pero también se identificaron 37 polímeros, principalmente polipropileno (PP), poliestireno (PS) y poliamidas (PA), que representaron el 64,8% del total de microplásticos. Se observaron principalmente en forma de fibras (48,6%) y fragmentos (40,5%), transparentes y de color.

Paralelamente, se recolectaron residuos plásticos de la mitilicultura presentes en la línea de alta marea, como cuerdas, boyas y sacos de malla, de los cuales se obtuvieron espectros Raman para la creación de una biblioteca espectral local. La comparación entre los espectros de los sedimentos y los residuos mostró una alta coincidencia ( $HQI > 85\%$ ), confirmando que los MPs encontrados provienen en gran parte de las artes de pesca utilizadas en la actividad mitilicultora.

Este estudio representa una contribución relevante a la comprensión de la contaminación por microplásticos en humedales costeros de Chile, donde aún existe escasa información científica. Asimismo, demuestra la utilidad de la micro espectroscopía confocal Raman para estudios ambientales, y destaca la necesidad urgente de implementar políticas de manejo de residuos más sostenibles en la acuicultura. Se recomienda la ampliación del análisis a otras matrices como agua y biota, así como la aplicación de esta metodología en otros sistemas estuarinos del país.

# ABSTRACT

The coastal wetlands of the Chiloé archipelago, in addition to harboring great biodiversity, are key sites for migratory birds and benthic species. However, these ecosystems are increasingly exposed to anthropogenic pressures, especially from aquaculture activities.

The objective of this thesis is to characterize the microplastics (MPs) in the sediments of the Chullec coastal wetland, located on Quinchao Island (Chiloé), and to evaluate their possible origin in plastic waste generated from mussel farming, a predominant activity in the area.

A methodological protocol was designed. Six transects with three tide levels and three replica per sampling site were performed. The surface sediment (0-2 cm) was extracted, digested with hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ), and separated by density with zinc chloride ( $ZnCl_2$ ) and vacuum filtrated. The extracted particles were analyzed by confocal Raman spectroscopy, a non-invasive technique that allowed chemical identification without the need for visual pre-selection, addressing a total of 564 particles distributed in 64 filters.

The results showed a high heterogeneity in particle composition, with predominantly natural materials such as cellulose ( $N = 128$ ) and particles without Raman spectra ( $N = 233$ ). 37 polymers were identified, mainly polypropylene (PP), polystyrene (PS) and polyamides (PA), which accounted for 64.8% of the total microplastics. They were mainly observed in the form of fibers (48.6%) and fragments (40.5%), and in transparent and white colors. At the same time, plastic residues from mussel farming were collected in the tidal line, such as ropes, buoys and mesh bags, from which Raman spectra were obtained for the creation of a local spectral library.

The comparison between the spectra of sediments and residues showed a high coincidence (HQI >85%), confirming that the MPs found come largely from the fishing gear used in mussel farming activity.

This study represents a relevant contribution to the understanding of microplastic contamination in coastal wetlands of Chile, where there is still little scarce scientific information. It also demonstrates the usefulness of confocal Raman spectroscopy for environmental studies and highlights the urgent need to implement more sustainable waste

management policies in aquaculture. The extension of the analysis to other matrices such as water and biota is recommended, as well as the application of this methodology in other estuarine systems of the country.

# INTRODUCCIÓN

## Humedales

Los humedales se definen como ecosistemas de transición entre los ambientes húmedos como playas y los ambientes secos, por lo que este tipo de ambiente no tiene una categoría específica como terrestre o acuático (Barbier et al., 1997). Sin embargo, la definición más utilizada de humedal es la de la Convención relativa de los Humedales de importancia internacional, RAMSAR, que indica que *“los humedales corresponden a extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas que pueden ser de régimen natural, como estanques de tratamientos de aguas residuales o artificiales, como lagos y ríos, y además pueden ser temporales como permanentes y que no excedan de una profundidad de seis metros”* (Secretaría de la Convención sobre los Humedales, 2021).

Las características que deben tener estos ambientes para catalogarlos como humedal son:

- Que el tipo de suelo debe ser saturado, es decir, que no drene el agua para que esta se retenga de forma temporal o permanente.
- Debe presentar un nivel de agua poco profunda.
- Tener zonas de transición entre la tierra y este sistema acuático.

Los humedales son de una gran importancia ecológica, porque realizan funciones que benefician al resto del ambiente que los rodea como el control de inundaciones y la depuración de aguas, y son importantes reservorios de diversidad biológica (especialmente como refugio y alimentación para las aves). Por lo tanto, son parte fundamental de los ciclos vitales de la gran mayoría de las especies que habitan y frecuentan en estas zonas y reponen aguas subterráneas, entre otras (Ministerio de Medio Ambiente, 2018).

En Chile, los humedales comprenden una superficie aproximada de 4,5 millones de ha, lo que representa cerca del 5,9% de todo el territorio nacional. En la Región de Los Lagos comprende una superficie de 250.923 ha (Ministerio de Medio Ambiente, 2018) y corresponde al 17,8% de todo su territorio.

## Humedales en Chiloé

El archipiélago de Chiloé, ubicado en la Región de Los Lagos en la zona sur de Chile (41°28'18"S, 72°56'12"O), tiene una extensión de 190 km y en promedio 60 km de ancho. La provincia de Chiloé posee un clima húmedo templado, fuertemente influenciado por el Océano Pacífico y suele ser muy lluvioso con precipitaciones anuales de 2.000 mm (Andres et al., 2009). Posee áreas de difícil acceso debido a su geografía dividida en tres segmentos principales, central, norte y sur. Estas zonas muestran distintas características morfológicas y geológicas, como por ejemplo rocas sedimentarias marinas, que debido a las fallas tectónicas presentes y a su actividad a lo largo del Archipiélago han generado el hundimiento de ciertas zonas en los segmentos norte y sur lo que ha generado la existencia de depósitos estuarinos (Duhart, 2000). En Chiloé existe un sistema de humedales costeros y 16 bahías podrían clasificar como humedales de importancia internacional de Ramsar (Andres et al., 2009) por albergar  $\geq 1\%$  de la población de zarapitos de pico recto y pico curvo. Dentro de este sistema se destacan 4 sitios por su abundancia de zarapitos y estos son Putemún, Pullao, Curaco de Vélez y Chullec.

La importancia del humedal marino de Chullec radica en su papel como sitio de parada para aves migratorias neárticas como el zarapito de pico recto (*Limosa haemastica*) y el zarapito de pico curvo (*Numenius phaeopus*), que recorren miles de kilómetros desde el hemisferio norte para alimentarse y descansar en este ecosistema. Además, alberga aves residentes como el cisne de cuello negro (*Cygnus melancoryphus*) y el queltehue (*Vanellus chilensis*). El humedal presenta una composición sedimentaria dominada por arenas, seguidas por gravas y limos, con una distribución granulométrica que varía desde sedimentos más gruesos en el intermareal superior hasta sedimentos más finos en el intermareal inferior. Esta característica influye directamente en la distribución de las comunidades bentónicas, que incluyen organismos como poliquetos, crustáceos y bivalvos. La relación entre los tipos de sedimento y las comunidades bentónicas es clave para entender las dinámicas tróficas del humedal, ya que muchas de estas especies constituyen presas principales para las aves migratorias (Canto, 2017; Herrera et al., 2024).

## La Mitilicultura en Chiloé

El cultivo de bivalvos está aumentando en todo el mundo, especialmente el cultivo de ostras, almejas, ostiones y choritos. Los centros de cultivos se instalan en zonas costeras, y los emplazamientos suelen elegirse en función a las condiciones ideales para estas especies y el cultivo de sus semillas (Lusher et al., 2017). En condiciones estuarinas hay especies que se cultivan suspendidas en sistemas long-line, como lo es en el caso de la mitilicultura.

La acuicultura de *Mytilus chilensis*, un mejillón comúnmente conocido como chorito, es una actividad de gran importancia comercial en Chile, representando aproximadamente el 15% de la producción mundial. Su cultivo se desarrolla en zonas intermareales y submareales poco profundas, dependiendo de la recolección de semillas en ambientes costeros que pueden estar expuestos a procesos de degradación del hábitat y a la contaminación por micro y nanoplasticos. Debido a su alimentación por filtración, los mejillones han sido ampliamente utilizados como bioindicadores de contaminación marina de numerosos contaminantes orgánicos (Wiesinger et al., 2021) ya que pueden acumularse en sus tejidos, facilitando su transferencia dentro de la red trófica marina. La exposición a micro y nanoplasticos por su parte, podría afectar su crecimiento, metabolismo y respuesta inmune, por lo que es fundamental profundizar en las investigaciones sobre sus impactos en la sostenibilidad de la mitilicultura y en la salud pública (Barría et al., 2025).

Los principales procesos de la industria de la mitilicultura se dividen en tres etapas fundamentales. En primer lugar, se encuentra la captación de semillas en el medio ambiente, las cuales posteriormente se utilizan como insumo en los centros de engorda. En estos últimos, las semillas crecen hasta convertirse en choritos de tamaño apto para la cosecha y luego son trasladados a las plantas de proceso. La segunda etapa corresponde a la industrialización o transformación de los productos. En la actualidad, la gran mayoría de la producción se destina a la elaboración de conservas y productos congelados, y también existe un mercado interno para su venta en fresco. Finalmente, se encuentra la etapa de comercialización, en la cual las empresas tienen un papel fundamental. La mayor parte de los productos se destinan a mercados externos, y las propias empresas se encargan de gestionar su comercialización. Es importante destacar que estos tres procesos son los pilares

fundamentales de la industria de la mitilicultura y su correcta ejecución garantiza la calidad y éxito en el mercado (FAO, 2020.).

La Región de Los Lagos se destaca por tener una economía basada principalmente en el turismo, la pesca y la acuicultura. Esta última ha sido la que más ha crecido en el último tiempo y dentro de esta se destaca la mitilicultura, que se concentra mayoritariamente en la provincia de Chiloé (Vivanco, 2008).

La mitilicultura es la segunda actividad acuícola que tiene una mayor producción en Chile después de la salmonicultura. La cosecha de mitílicos acumulada hasta Julio del 2024 fue de 332,9 mil t y representó al 35% del total de cosechas nacionales de moluscos. En la Región de los Lagos, el chorito (*Mytilus chilensis*) fue el molusco que representó el 35,4% de la cosecha nacional y el 98,9% del cultivo de moluscos (SUBPESCA, 2024).

Los cultivos de choritos se realizan en sistemas long-line, por lo general en sistemas de cuerda continua. El sistema de fondo está conformado por bloques de concreto a los que se unen los cabos de fondeo que pueden ser de polipropileno o nylon. En el extremo superior el cabo de fondeo se une al sistema de flotación que a su vez está compuesto por una línea madre de polipropileno y las boyas de flotación distanciadas al menos 3 m entre sí. Las boyas son de polietileno de alta densidad soplado con filtro UV. A la línea de flotación se une, la cuerda continua a la cual se fijan los choritos mediante un cabo o chicote de polipropileno. El proceso productivo se inicia con la captación de semillas en el medio para lo que se usan tiras de redes de pesca (redes anchoveteras) en desuso, o malla Raschel a las que se une un peso (piedra) envuelta en malla cebollera de polietileno de alta densidad. Las redes anchoveteras son de nylon multifilamento y las mallas Raschel de polietileno de alta densidad. Las semillas se separan de la red, y se traspasan a la cuerda continua de crecimiento. Este cabo de polipropileno se envuelve en una manga de algodón, donde se depositan las semillas. La manga de algodón se deshace a medida que pasa el tiempo y los choritos se fijan con sus bisos a la cuerda de crecimiento. Durante la cosecha los chicotes de alrededor de 50 cm de longitud que unen la línea de crecimiento a la línea madre se cortan para levantar los choritos y se desechan. Las redes peceras utilizadas en la salmonicultura son de polietileno o de poliamida y las redes loberas suelen ser de polietileno. (Figura 1) (Díaz et al., 2015).

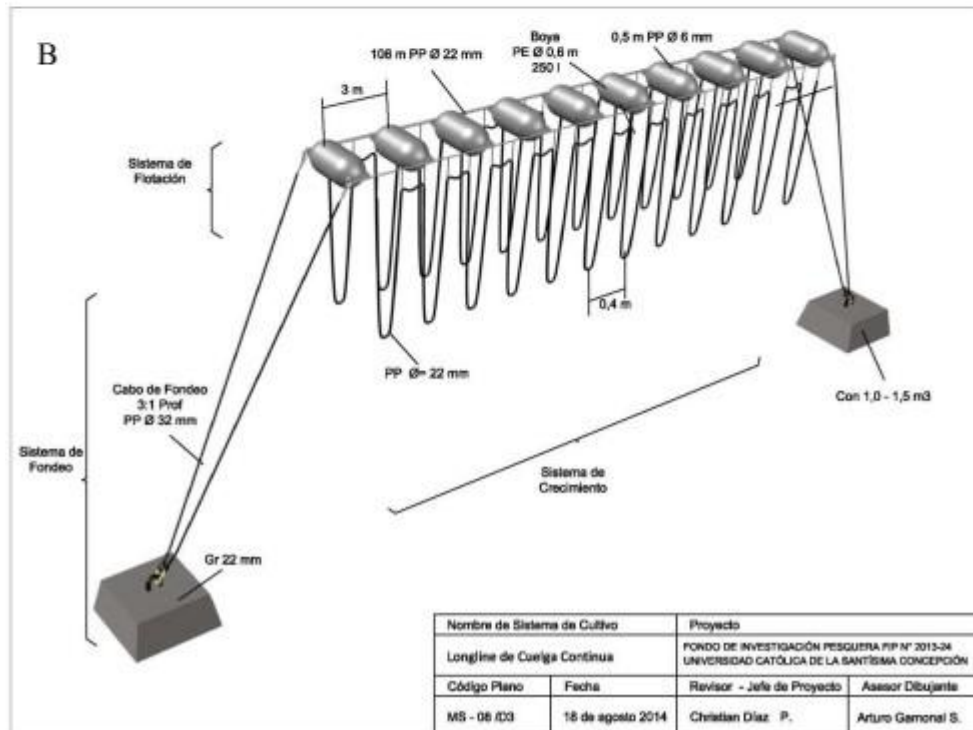
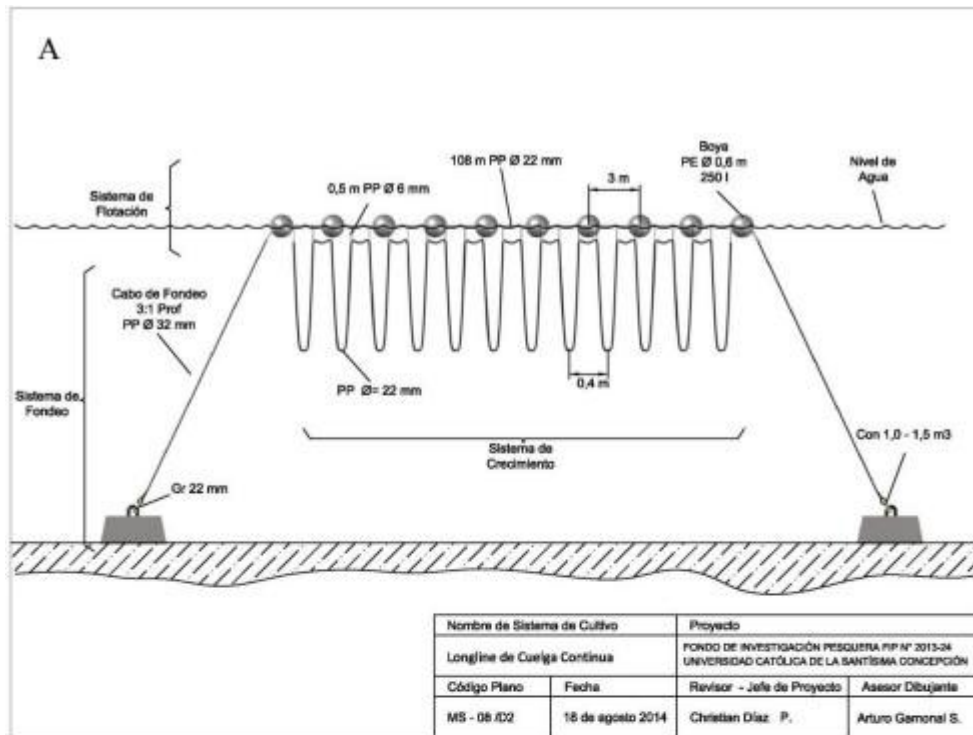


Figura 1 Longline con cuerda continua para cultivo de choritos. Tomado de Díaz et al 2015

## Plásticos

Los plásticos son parte de un gran grupo de materiales con una producción que ha ido en aumento a nivel mundial. Están compuestos por largas cadenas de polímeros que se forman a partir de elementos carbono, hidrógeno, silicio, cloro y oxígeno (Wick et al., 2013). Existen polímeros naturales como la goma, el látex entre otros, pero la mayoría son sintetizados industrialmente a partir de precursores provenientes de combustibles fósiles naturales. Los principales productos a escala mundial son polietileno (PE) y polipropileno (PP) (Majewsky et al., 2016), también policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS) y tereftalato de polietileno (PET), los cuales son componentes esenciales para la producción de objetos de uso industrial y cotidiano. El problema de los plásticos es su durabilidad y la facilidad que tienen para asentarse y adherirse en las superficies del medio. Además, pueden ingresar a distintos cuerpos de agua por deposición atmosférica o por desechos arrojados al ambiente. Sin embargo, la continua exposición al medio ambiente y a los efectos de la radiación UV, cambios de temperatura, salinidad, biofouling entre otros, lleva a su lenta pero paulatina fragmentación generándose partículas de diferentes tamaños. Entre esos productos de la degradación ambiental (*weathering*) se encuentran los micro y nanoplásticos (Thompson et al 2024).

## Aditivos

Los plásticos industriales en general y los de uso en la pesca y la acuicultura no son polímeros puros, sino que han sido modificados por la adición de compuestos orgánicos e inorgánicos incorporados durante su producción para lograr propiedades físicas específicas. Existen alrededor de 10.547 tipos de sustancias llamadas aditivos que se utilizan comúnmente en la industria de los polímeros (Wiesinger et al., 2021). La mayoría de estas sustancias no se encuentran químicamente unidas a la matriz polimérica y pueden liberarse al medioambiente durante el ciclo de vida del plástico. Son utilizadas para que los plásticos puedan adquirir propiedades específicas y apropiadas a su uso. Entre los aditivos ~~ellos~~ se encuentran tintaciones y colorantes, que aumentan su resistencia a la luz UV. También se utilizan sustancias de relleno, como sales inorgánicas, para reducir el costo final de los productos. Además, se emplean reforzantes que mejoran las propiedades mecánicas del material final como fibras de vidrio o carbono. Los estabilizantes son otro tipo de aditivo que se utilizan para evitar o reducir los efectos degradantes de la luz, el oxígeno y el calor y también se utilizan para

retardar la inflamabilidad de algunos polímeros (Thompson et al., 2004; Wiesinger et al., 2021)

## Clasificación de los plásticos

Los termoplásticos son sólidos rígidos a temperatura ambiente y se dividen en dos categorías: amorfos, como el poliestireno (PS) y el policloruro de vinilo (PVC), y semicristalinos, como el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el polietileno tereftalato (PET) y el Nylon 6,6. Estos materiales tienen masa molar finita, pueden fundirse y endurecerse de manera reversible y son solubles en solventes orgánicos. Por otro lado, los termorrígidos tienen masa molar infinita, lo que los hace infusibles e insolubles. Algunos ejemplos de termorrígidos son la resina de fenol-formaldehído (Bakelita), la resina de urea-formaldehído, la resina de melamina-formaldehído y las resinas epoxi. Los elastómeros, también conocidos como gomas vulcanizadas, son materiales elásticos que recuperan rápidamente su forma después de ser deformados. Son los únicos materiales conocidos que exhiben elasticidad incluso ante deformaciones del 1000%. Para que una goma se comporte como un elastómero, debe estar entrecruzada (Meira & Gugliotta, 2019).

## Mecanismos de fragmentación de plásticos

La fragmentación de plásticos en el ambiente (*wheathering*) ocurre principalmente a través de la fotooxidación inducida por la radiación UV solar, que debilita las cadenas poliméricas, produce oxidaciones y hace que los materiales sean más propensos a la fragmentación mecánica causada por olas, ciclos de congelamiento y descongelamiento, o interacciones con animales marinos.

En muestras gruesas, la oxidación se limita a una capa superficial delgada, que se desprende como micro y nanoplásticos bajo tensiones mecánicas. Las condiciones del agua marina, como bajas temperaturas, menor disponibilidad de oxígeno y la formación de biopelículas que bloquean la radiación UV, ralentizan la degradación, a diferencia de los plásticos expuestos en playas secas, donde las altas temperaturas y la radiación directa aceleran la fragmentación. La enorme mayoría de los microplásticos encontrados en los océanos provienen de plásticos degradados en tierra o playas, que ya presentan fisuras y grietas antes

de ingresar al agua. En condiciones de laboratorio, el envejecimiento acelerado (aging) muestra fragmentación más rápida, pero estas condiciones no reflejan necesariamente con precisión los procesos naturales, donde los plásticos desarrollan capas oxidadas que ralentizan el proceso y provocan fragilidad y agrietamiento superficial antes de la fragmentación (Liu et al 2020; Andrady, 2022).

## Microplásticos

Los microplásticos se caracterizan como partículas sólidas de plástico con un tamaño igual o inferior a 5 mm, formadas por polímeros que pueden contener aditivos funcionales y otros compuestos químicos, ya sea incorporados durante su fabricación o adquiridos en el ambiente (Thompson et al., 2024). Es posible encontrarlos en diferentes tamaños, densidades, composiciones químicas y colores (Cole et al., 2011; Hidalgo-Ruz et al., 2012). Los microplásticos se clasifican en dos grupos, primarios y secundarios. Los primarios son aquellos que son materia prima para la creación de productos derivados, como pellets y microperlas y por otro lado los secundarios, que son aquellos que resultan del desgaste, deterioro y/o descomposición de residuos plásticos de mayor tamaño que han sido desechados en el ambiente (Hanvey et al., 2017). Estos residuos son altamente persistentes en el medio ambiente (Cole et al., 2011) pero pueden fragmentarse en partículas más pequeñas ( $\leq 5$  mm), ya sea por abrasión mecánica, fotooxidación o degradación biológica generando los denominados microplásticos (MPs) y nanoplásticos (NPs;  $\leq 0,001$  mm) de tipo secundario (cuando se refiere a los dos tipos los designaremos por MNPs) (Andrady, 2011a).

A su vez, los MNPs pueden ingresar directamente al medio ambiente (MNPs del tipo primario), por descargas directas de efluentes domésticos, industriales, o descargas residuales, y se encuentran asociados a productos de limpieza, cosméticos y fibras sintéticas (Auta et al., 2017). Los MNPs pueden ser ingeridos y acumulados por diversos organismos marinos y de agua dulce tales como peces, aves e incluso mamíferos, incluyendo al ser humano (Yang et al., 2021).

## Distribución en una bahía o humedal

Los microplásticos se pueden distribuir en el espacio a través de las corrientes (Barnes et al., 2009), mareas y olas y aportan en el largo plazo en los procesos de erosión y/o deposición en estos ambientes.

Los estudios previos sobre microplásticos en humedales muestran una amplia variabilidad en la abundancia registrada, con valores que van desde 31 partículas/kg en Indonesia (Suteja et al., 2024) hasta  $24,400 \pm 5,200$  partículas/kg en España (Edo et al., 2020): Algunos estudios presentan valores extremadamente amplios, como el de China (Zhejiang), con  $1,737.6 \pm 322.3$  partículas/kg (Su et al., 2023). En Argentina, Santucci et al., 2024 reportó  $547.83 \pm 620.06$  items/kg, aunque sin especificar la proporción exacta de microplásticos respecto a otras partículas. En Irán (Rasta et al., 2020) documentó una abundancia que variaba entre 113 y 3,690 partículas/kg. Estos rangos de valores pueden representar diferencias reales entre los ecosistemas mencionados, pero pueden estar afectadas por diferencias metodológicas.

La profundidad de muestreo también varía, con algunos estudios limitados a capas superficiales (Indonesia y Ghana) y otros con mayor alcance estratigráfico, como en China (0-50 cm en el estuario Fuhe River, (Zhou et al., 2021)) y Argentina (0-30 cm, Díaz-Jaramillo et al., 2021), lo que impide comparación de la acumulación de MPs en los sedimentos.

En cuanto a la identificación química, la mayoría de los estudios emplearon técnicas como ATR-FTIR,  $\mu$ -FTIR y FTIR-SEM, que tienen limitaciones para detectar partículas menores de 100  $\mu$ m. Tampoco se analizaron todos los tipos de partículas presentes en las muestras, lo que puede generar sesgos en la caracterización (Gonçalves et al., 2025; Q. Zhou et al., 2020; Zuo et al., 2020). Los polímeros más reportados incluyen PP, PE, PET y PS, aunque algunos estudios han identificado otros como PVC y PTFE en España (Edo et al., 2020) y poliésteres modificados en Argentina (Díaz-Jaramillo et al., 2021).

A diferencia de estos trabajos, el presente estudio analizó todas las partículas presentes en los filtros sin preselección visual, obteniendo una identificación química de polímeros, compuestos inorgánicos, celulosa, algodón, tintes, pigmentos y hasta de partículas sin identificar, lo que proporciona una evaluación más representativa y menos sesgada de la contaminación por microplásticos en los sedimentos analizados. La Tabla 1 es un resumen de

los resultados de otros estudios e incluye el resultado promedio de este trabajo que se discute más adelante.

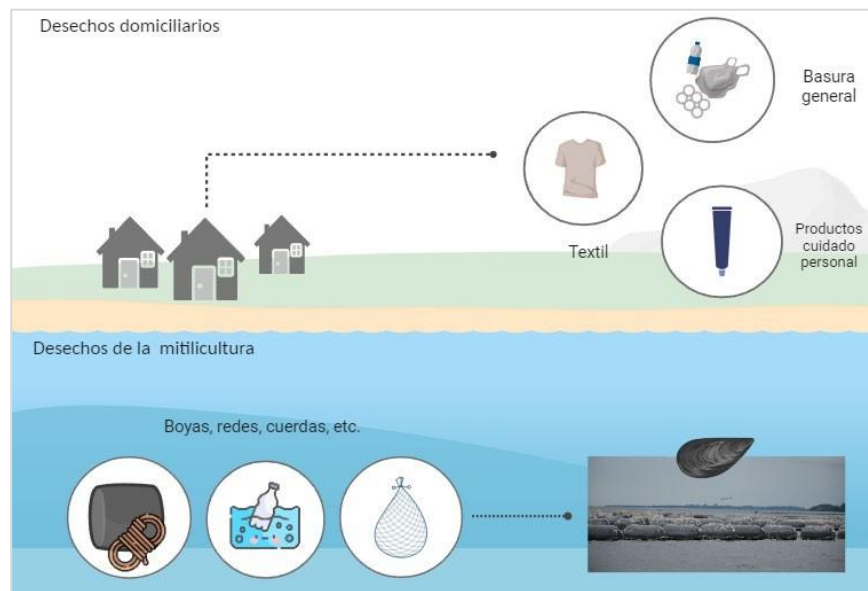
País	Profundidad sedimento (cm)	Abundancia	Principales polímeros detectados	Análisis	QC QA	Referencia
China (Zhejiang)	0-15	1.737,6 ± 322,3 partículas/kg	PP, PE, PS	μ-FTIR	SÍ	Su et al., 2023
España (Toledo)	2	24.400 ± 5.200 partículas/kg	PE, PP, PS, PVC, PA, PU, PTFE	μ-FTIR	SÍ	Edo et al., 2020
Irán	25	113-3.690 partículas/kg	PP; PE; PESt	ATR-FTIR	SÍ	Rasta et al., 2020
China	5	100 - 7900 items/kg DW	PET, PP&PE, PS	μ-FTIR	SÍ	Zuo et al., 2020
China	2	8,3 a 5.738,3 partículas/kg DS	PS, PP, PE, PET	μ-FTIR / ATR	SÍ	Zhou et al., 2020
China (Fuhe River estuary)	0-50	558 partículas/kg DS	PE, PP	FTIR	SÍ	Zhou et al., 2021
Ghana (Manglares)	ND	ND	PET, PS, PP	FTIR / u-ATR	SÍ	Gonçalves et al., 2025
Argentina	0-10; 10-20; 20-30	0 - 1.030 ± 657 partículas/kg	PE, PVC, PET, PEST, PP	ATR- FTIR	SÍ	Díaz-Jaramillo et al., 2021
Argentina (Río de la Plata)	50	547,83 ± 620,06 partículas/kg	PP, PET, PS	FTIR / SEM	SÍ	Santucci et al., 2024
Indonesia (Benoa Bay)	Sedimento superficial	31 partículas/kg DS	PP, PE, PS	μFTIR	SÍ	Suteja et al., 2024
Chile (Mar interior de Chiloé)	ND	72,2 ± 32,4 partículas/Kg DS	PET, PP, PU	FTIR	SÍ	Jorquera et al., 2022
Chile (Chullec, Chiloé)	2	69 partículas/Kg DS	PP, PE, PS, PA, PET	Raman	SÍ	Este estudio

*Tabla 1 Resumen de estudios previos sobre microplásticos en sedimentos de humedales, incluyendo abundancia, profundidad de muestreo, principales polímeros detectados y método de análisis químico.*

## Microplásticos en Chile

La contaminación por microplásticos en Chile afecta ríos, playas y aguas oceánicas, incluyendo zonas remotas como Rapa Nui y el archipiélago Juan Fernández. Estos contaminantes provienen de residuos urbanos, pesca, acuicultura y el arrastre fluvial. Se han detectado en peces, lobos marinos y otros organismos, con posibles impactos en la salud humana y los ecosistemas. Además, pueden transportar contaminantes tóxicos. Aunque Chile ha implementado regulaciones como la prohibición de bolsas plásticas, se requiere mayor compromiso del sector productivo y la sociedad para mitigar su impacto (Urbina et al., 2021).

Existe muy poca información sobre los efectos que genera el cultivo intensivo de mitílicos sobre los componentes del ecosistema marino del sur de Chile (SERNAPESCA, 2018). También se incluyen en estas fuentes los desechos de los materiales provenientes de la propia industria acuícola (Figura 2) (Contreras, 2016) productos del desgaste y pérdida de redes, boyas, cuerdas y empaques plásticos (Ocean Conservancy, 2023).



*Figura 2 Fuentes de desechos plásticos y microplásticos en ecosistemas costeros, destacando el aporte de residuos domiciliarios y la mitilicultura descritos por Contreras et al., 2016. Elaboración propia.*

Durante los años se ha observado un aumento constante en la generación de residuos plásticos a nivel mundial con 205,9 mil t en 2021 a 220,6 mil t previstos para el 2024 (Perreard et al., 2024).

De todas las regiones del país, la Región de Los Lagos tiene uno de los niveles más altos de residuos a lo largo de la costa, pasando de 1,7 unidades por m<sup>2</sup> de residuos a 3,7 unidades de residuos por m<sup>2</sup> entre 2008 y 2020. Entre los tipos de residuos encontrados, el plástico representa la mayor parte, 28,4% en 2008 y 34,6% en 2020 (Gallardo et al., 2021).

En Chile se han detectado microplásticos en diversas matrices ambientales en las que se incluyen aguas superficiales, sedimentos y organismos marinos, y las investigaciones han evidenciado su presencia en distintas zonas del país, desde islas oceánicas y la costa continental hasta los fiordos del sur (Chagnon et al., 2018; Pozo et al., 2019; Thiel et al., 2018). Los microplásticos ingresan al ecosistema marino chileno mediante varias rutas, entre ellas: por descarga de aguas residuales, ya que muchas ciudades aún realizan la liberación de aguas sin tratamiento, lo que permite que estos lleguen a ríos y mares; las corrientes oceánicas, por las corrientes de Humboldt y el Giro Subtropical del Pacífico Sur que transportan grandes cantidades de desechos plásticos hacia las costas de nuestro país. Thiel et al., 2021 examina la acumulación de residuos marinos y destaca la influencia de factores ambientales en su llegada a las costas. Identifica que la mayor parte de la basura presente en Chiloé proviene de actividades pesqueras industriales y que la acumulación de residuos fluctúa considerablemente en respuesta a la dirección e intensidad del viento.

La contaminación por microplásticos varía según la región con algunos puntos críticos identificados como en las islas oceánicas como Rapa Nui y el Archipiélago de Juan Fernández en donde se han registrado densidades superiores a 20.000 partículas/ km<sup>2</sup>. En la costa continental la concentración varía, pero en bahías urbanas con alta actividad industrial y turística presentan altos niveles. En fiordos y canales del sur de Chile se han detectado microplásticos en sectores con alta actividad acuícola, especialmente en las regiones de Aysén y Los Lagos (Paredes-Osses et al., 2021).

En la Región de Los Lagos el estudio de microplásticos en sedimentos aún es escaso. En Chiloé el estudio de Jorquera et al., 2022 evaluó la abundancia y composición de microplásticos en los sedimentos marinos. Sus resultados mostraron una concentración promedio de  $72.2 \pm 32.4$  partículas/ Kg de sedimento, con valores más altos en zonas cercanas a centros de cultivo acuícola e instalaciones industriales y portuarias. Los tipos de plásticos detectados fueron: fibras provenientes de textiles sintéticos y redes de pesca, fragmentos provenientes probablemente de la degradación de plásticos de mayor tamaño como envases y residuos industriales y películas plásticas, que están relacionadas con bolsas y envases plásticos. El análisis químico reveló que los polímeros más comunes fueron PET, usado en fibras textiles y botellas plásticas, acrilatos presentes en pinturas y adhesivos, polipropileno y poliuretano, asociados a artes de pesca, materiales de embalaje y de construcción. Además, un 45% de las fibras identificadas correspondieron a celulosa que posiblemente sea una mezcla de fibras sintéticas y naturales, provenientes de aguas residuales. También este trabajo destacó dos

factores clave que pueden contribuir a la acumulación de microplásticos en los sedimentos:

a) Una correlación positiva entre la abundancia de microplásticos y la proximidad a los centros de cultivo, lo que sugiere que esta industria es una fuente importante de contaminación con los residuos plásticos de jaulas, redes y boyas contribuyendo significativamente a la acumulación en los sedimentos. Además, b) Las corrientes marinas y la granulometría del sedimento juegan un papel fundamental en la distribución de microplásticos. Las partículas más ligeras son transportadas por las corrientes, mientras que los sedimentos más finos retienen una mayor cantidad de microplásticos.

## Plásticos y microplásticos en el humedal de Chullec

Gran parte de las artes de pesca utilizadas en la acuicultura, como por ejemplo boyas, flotadores, y redes (Figura 2) son una fuente potencial de producción de microplásticos, lo que puede generar un impacto negativo a las zonas aledañas como son los humedales (Rojo-Nieto, 2017). Contreras 2016 hizo un extenso levantamiento de los residuos de la acuicultura en el humedal de Chullec donde la caracterización de los residuos reveló que los desechos sólidos provenían en su gran mayoría de la actividad acuícola, precisamente de la mitilicultura (Figura 3). Estos fueron: redes, plumavit, cabos, boyas, sacos, mallas y bolsas industriales. También se encontraron desechos domiciliarios como ropa, botellas plásticas y basura en general (tarros, latas, entre otros) (Figuras 4 y 5). La tabla 2 evidencia las malas prácticas en la gestión de los residuos que contribuyen a la contaminación marina, y que finalmente producen una acumulación de cuerdas, boyas, redes y plumavit en el borde costero. En este mismo trabajo se sugiere la implementación de buenas prácticas para reducir la pérdida de estos materiales, asegurando su correcta sujeción, disposición y reemplazo responsable. Esto permitiría minimizar el impacto ambiental, prevenir la generación de residuos plásticos y fomentar una gestión más sostenible en la mitilicultura.



Figura 3. Listado de tipos de residuos que se encuentran en el humedal de Chullec. Tomado de Contreras (2016)



*Figura 4. Implementos utilizados para la industria acuícola frente al humedal de Chullec. Imagen propia.*



*Figura 5. Residuos encontrados a lo largo del intermareal del humedal de Chullec en noviembre de 2022. Elaboración propia*

Material utilizado	Ejemplos de malas prácticas y otros eventos asociados que generan desgaste en artes de pesca
Cuerdas	Retiro de cuerdas al limpiar la línea madre.  Cortar las cuerdas que sostienen la cuelga para ser cosechada. Retiro de cuerdas para cambiar las boyas rotas. Escape de cuerdas al atar nuevas boyas.  Escape de cuerdas al amarrar nuevas cuelgas. Dejar las cuerdas colgando en un fierro. Dejar caer cuerdas al mar.
Plumavit	Retiro de plumavit, para cambiar el sistema de flotación a boyas plásticas Dejar el plumavit en el piso de la plataforma
Boyas	Atar mal las boyas a la línea madre Dejar las boyas en el piso de la plataforma, sin ser atadas a un lugar. Descanso de lobos marinos sobre las boyas Peleas de lobos marinos
Redes	Dejar redes en el piso de la plataforma Cambio del tipo de red Eliminar redes al mar
Sacos	Dejar sacos en el piso de la plataforma Escape por acción del viento
Mallas	Dejar mallas en el piso de la plataforma

*Tabla 2 Ejemplos de malas prácticas y otros eventos asociados que generan desgaste en artes de pesca en el proceso productivo, que generan residuos de la mitilicultura (Tomada con modificaciones de Contreras et al., 2016)*

A los factores anteriores hay que agregar los flujos de los cauces de agua dulce que desembocan en este humedal y que coinciden con algunos de los transectos y niveles de este estudio. Estos flujos aportan material fluvial y arrastre de sedimentos desde la zona terrestre, lo que influye en el asentamiento de los microplásticos en los distintos transectos y niveles definidos en el humedal.

## El problema

En el último tiempo se ha visto un aumento significativo de microplásticos en ambientes estuarinos alrededor de mundo y a nivel nacional. Hasta ahora, no se ha llevado a cabo un estudio sistemático sobre la presencia, destino y distribución de microplásticos en ecosistemas marinos o terrestres en Chile. Del mismo modo, la investigación sobre la bioacumulación de estos contaminantes en entornos chilenos sigue siendo limitada, lo que resalta la necesidad de mayores esfuerzos científicos para comprender su impacto ambiental, especialmente en humedales cercanos a actividades industriales como lo es la mitilicultura. Por ello, es de suma importancia determinar el origen de los microplásticos que se encuentren en el sedimento para así evaluar su distribución espacial, composición química, su eventual asociación con las artes de pesca utilizadas por la mitilicultura frente al Humedal de Chullec y así poder desarrollar en el futuro medidas de mitigación

## Hipótesis

Al determinar la composición química de los microplásticos encontrados en los sedimentos del humedal de Chullec, será posible evaluar si su origen proviene de los residuos producidos por la mitilicultura.

## Objetivo general

Identificar la composición química de los microplásticos que se acumulan en el sedimento para identificar su distribución espacial y el posible impacto de la mitilicultura en el humedal de Chullec.

## Objetivos específicos

- Desarrollar protocolos de muestreo y análisis de microplásticos en sedimentos.
- Determinar la composición química, forma, color y tamaño de los microplásticos en los sedimentos y en residuos de la mitilicultura.
- Comparar la composición química de los microplásticos en los sedimentos con los residuos de la mitilicultura.

# METODOLOGIA

## Área de muestreo

El área de estudio corresponde al humedal costero de Chullec ( $42^{\circ}28'04.2''S$ ,  $73^{\circ}32'21.8''W$ ) (Figura 6), ubicado en la isla de Quinchao, en la Región de Los Lagos, Chile. Este humedal tiene una extensión de 52 ha, y está ubicado en una zona rural con una combinación de terrenos agrícolas, bosques y cuerpos de agua dulce. Se observan caminos sinuosos que conectan pequeñas edificaciones dispersas a lo largo del paisaje. El humedal en sí aparece como una extensión de terreno fangoso y cubierto de vegetación baja, bordeado por agua del mar en su parte inferior.

La zona presenta una transición entre áreas terrestres con vegetación, la zona intermareal y el cuerpo de agua, con la parte costera mostrando efectos de la marea. También se encuentran cauces de agua dulce cercanas a las viviendas y que desembocan en el humedal. Este tipo de ecosistema es importante para la biodiversidad local, proporcionando hábitat para diversas especies y actuando como un regulador natural del agua. Es un sistema estuarino intermareal altamente dinámico y biodiverso, caracterizado por una alta productividad, lo que crea condiciones óptimas para el crecimiento de algas y el desarrollo de larvas y juveniles de diversas especies, como los moluscos. Estas condiciones han favorecido la instalación y operación de empresas dedicadas a la mitilicultura (Contreras, 2016).



*Figura 6 Vista satelital del Humedal de Chullec. Fuente: Google Earth Pro*

## Extracción del sedimento

Utilizando la aplicación Google Earth Pro se establecieron 6 transectos, separados por una distancia de 150 [m] entre ellos, perpendiculares a la línea de la costa (Figura 7; Tabla 3).

Se definieron 3 niveles en cada uno desde 0 [m] (nivel de más alta marea), 50 [m] y 100 [m] (nivel de más baja marea). La Tabla 2 contiene la georeferenciación de cada punto de muestreo.



Figura 7 Puntos de muestreo en el humedal de Chullec. Elaboración propia

Punto de muestreo	Longitud (W)	Latitud (S)
T1N1	42°46728	73°54202
T1N2	42°46769	73°54228
T1N3	42°46812	73°54253
T2N1	42°46797	73°53973
T2N2	42°46838	73°54000
T2N3	42°46879	73°54026
T3N1	42°46907	73°53778
T3N2	42°46939	73°53824
T3N3	42°4697	73°53872
T4N1	42°47068	73°53659
T4N2	42°47084	73°53716
T4N3	42°47104	73°53773
T5N1	42°47234	73°53555
T5N2	42°47236	73°53617
T5N3	42°47234	73°53677
T6N1	42°4741	73°53612
T6N2	42°47387	73°53664
T6N3	42°47365	73°53717

*Tabla 3 Ubicación de los puntos de muestreo en el humedal de Chullec*

La zona de extracción de sedimento se marcó con una cuadrícula de 25 x 25 [cm]. Mediante una espátula metálica se extrajeron tres réplicas superficiales de aproximadamente 100 [g] de sedimento sin superar los 2 [cm] de profundidad.

Las muestras se almacenaron en recipientes de aluminio y se rotularon con la codificación NXTY(Z), donde X corresponde al nivel de 1 a 3, donde 1 corresponde al punto de más alta marea, Y corresponde al número del transecto de 1 a 6 y (Z) el número de réplica. Las muestras de sedimento recolectadas se secaron a 60 °C por 24 horas y luego se almacenaron a temperatura ambiente envueltas en papel aluminio.

Además, se recolectaron mesoplásticos de los residuos encontrados a lo largo del humedal. Se hizo un recorrido a por la línea de más alta marea, pasando por todos los transectos, para buscar y recolectar residuos de artes de pesca que estuviesen en la orilla, con un bisturí se extrajo una submuestra y cada uno fue envuelto en papel aluminio y rotulado con el nombre al cual correspondía el objeto. Los fragmentos fueron montados en un portaobjeto, cada uno con la ayuda de cinta adhesiva de doble contacto para fijarlos y analizar sus espectros mediante espectroscopía Raman.

### Extracción de microplásticos

El método para procesar las muestras de sedimento y extraer las partículas de microplásticos se basó en el protocolo de la Red de Investigación de Estresores Marinos – Costeros en Latinoamérica y el Caribe (REMARCO) (Barrientos et al., 2024) facilitado por el Dr. Benjamín Suarez y su equipo del Laboratorio de Toxinas Marinas (LABTOX) de la Universidad de Chile y en los estudios de Bellasi et al., 2021.

### Digestión de muestras

Se introdujeron 10 g de sedimento, previamente secado en estufa, en un vaso de precipitados (pp) de 250 [mL]. Se adicionaron 10 [mL] de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% de forma lenta (alícuotas de 2 [mL]). Se añadieron 10 [mL] adicionales de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se realizó agitación manual con una bagueta por 5 min y luego la suspensión se dejó en reposo cubierta con papel aluminio por 24 h. Posteriormente, se agregaron 20 [mL] de agua destilada, se agitó la suspensión de manera manual por 10 min y se llevó a un horno marca Memmert por 24 h (< 50 °C).

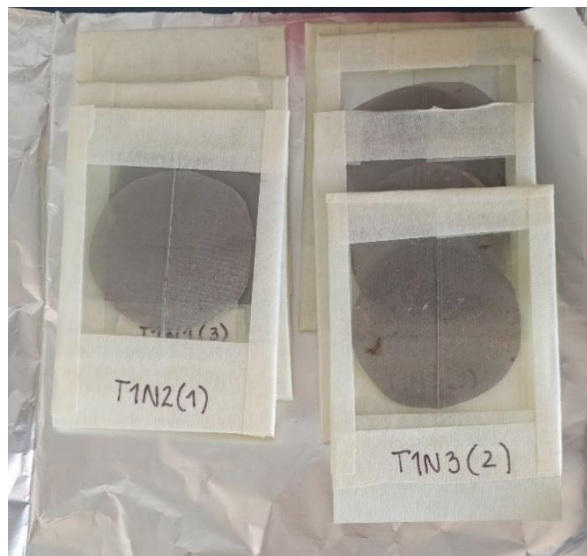
### Separación por densidad

Siguiendo los métodos de extracción y separación por densidad de microplásticos en sedimento revisados por Bellasi, 2021 y Sánchez, 2018 se preparó una solución de ZnCl<sub>2</sub> con densidad de 1,6 cm<sup>3</sup> para separar los microplásticos del sedimento.

Se agregaron 200 [mL] a los vasos pp que contenían cada muestra de sedimento digerido. Luego se agitó manualmente con una bagueta por 5 a 10 min, para luego dejar decantar por 24 h a temperatura ambiente.

## Filtración

Para recuperar las partículas flotantes de la suspensión se utilizó un sistema de filtración al vacío con filtros metálicos de acero inoxidable GKD Gerb. Kufferath AG Metallweberstr (46 mm de diámetro y 25  $\mu\text{m}$  de apertura) y un matraz Kitasato. El sobrenadante se vertió lentamente en el embudo de filtración y se aplicó vacío para acelerar el proceso, asegurando que las partículas se depositen en el filtro. Posteriormente, se enjuagaron las paredes del embudo y el filtro con agua destilada para eliminar residuos. Luego, el filtro se retiró con pinzas metálicas y se transfirió a placas Petri de vidrio, cubriéndolo inmediatamente para evitar contaminación. Los filtros se etiquetaron de acuerdo con la codificación NXTY(Z) y se secaron a 40°C por 24 h. Los filtros ya secos se montaron sobre dos cubre y portaobjetos fijados con cinta adhesiva de papel (Figura 8).



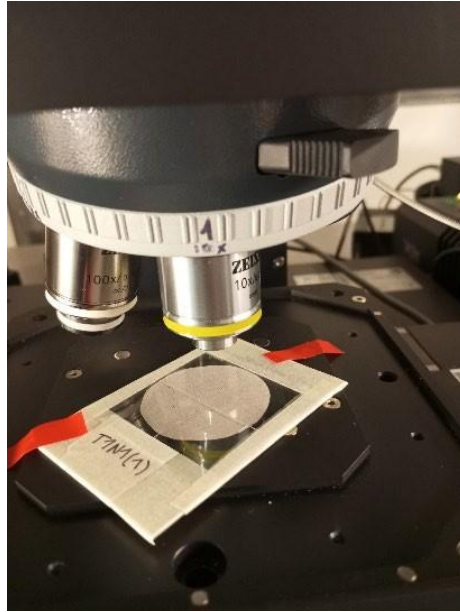
*Figura 8 Filtros fijados en porta y cubreobjetos. Elaboración propia*

Para poder verificar la presencia de partículas los filtros fueron examinados con la ayuda de un estereomicroscopio Nikon modelo Eclipse E200 equipado con una cámara digital modelo Nikon DS-fi1.

### Microscopía confocal Raman

La microscopía Raman se basa en la dispersión inelástica de la luz, un fenómeno en el que un fotón de alta energía choca con un enlace en una molécula y transfiere parte de su energía a una vibración molecular (Larkin, 2011). Como resultado de esa interacción luz-materia, el fotón dispersado (que "rebota") puede perder energía (dispersión de Stokes) o ganarla (dispersión anti-Stokes) produciéndose un corrimiento de su frecuencia (el llamado corrimiento Raman o Raman shift). Este cambio es característico de los enlaces químicos afectados y de su entorno en una molécula. El diagrama que resulta de graficar la intensidad de la emisión Raman vs la frecuencia es el espectro Raman, que es característico para cada molécula. Este proceso depende en gran medida de la polarizabilidad de los enlaces en una molécula, lo que lo hace especialmente útil para identificar enlaces no polares y simétricos. En un experimento típico, se emplea un láser monocromático para iluminar la muestra, y la luz dispersada se filtra cuidadosamente para eliminar la intensa dispersión elástica de Rayleigh. Así, solo se detectan los fotones Raman, cuya intensidad está directamente relacionada con la concentración de las moléculas y con la cuarta potencia de la frecuencia del láser. Por esta razón, la elección de la fuente de excitación es un factor clave en la técnica. Entre sus principales ventajas, la microscopía Raman requiere poca o ninguna preparación de la muestra y permite analizar materiales en distintos estados sólido, líquido o gaseoso sin dañarlos. Además, cuando se combina con espectroscopia FT-Raman, se pueden detectar bandas complementarias en el infrarrojo cercano, lo que ayuda a reducir interferencias por fluorescencia y mejora la sensibilidad del análisis (Larkin, 2011).

El total de las muestras (54) pertenecientes a los 6 transectos muestreados del humedal del Chullec fueron analizadas en un microscopio Raman confocal marca Witec (Oxford Witec GmbH, Ulm, Alemania) modelo Alpha 300R en conjunto con el software Project 6.1. Los portaobjetos con los filtros fueron montados en la platina del microscopio y fijadas con la ayuda de cinta adhesiva (Figura 9).



*Figura 9. Placas fijadas en platina de microscopio confocal Raman. Elaboración propia*

Para la identificación química de las partículas presentes en las muestras de sedimento, se utilizó el microscopio confocal Raman que está equipado con un láser de longitud de onda de 532 nm, una rejilla (grating) con densidad de ranura de 1000 líneas por mm, una cámara CCD sobre-enfriada (-51 °C) y un espectrofotómetro de rendimiento ultra alto. Los espectros Raman de muestras ambientales se obtuvieron con una resolución espectral de  $1 \text{ cm}^{-1}$  entre 0 y  $3700 \text{ cm}^{-1}$ . Se utilizaron objetivos Zeiss de 10x (EC Epiplan NA 0,25), 20x (EC Epiplan-Neofluar, NA 0,4), 50x (EC Epiplan-Neofluar, NA 0,8) y 100x (EC Epiplan-Neofluar, NA 0,9 ELWD). El tiempo de integración fue de 0,5 s con 20 a 40 acumulaciones.

Para obtener espectros Raman de manera semi-automática se utilizó el software ParticleScout (versión 6.2) integrado al sistema de tratamiento de imágenes del microscopio confocal Raman. Se genera desde un sector del filtro una imagen digital compuesta mediante la función de unión de imágenes (Stitching) y de promedio de niveles de enfoque (Autofocus). Luego el software Particle Scout genera una imagen virtual de los fragmentos presentes, establece sus dimensiones y su ubicación en el plano (X, Y) en la imagen. El software utiliza las coordenadas X, Y para controlar la platina y ubicar secuencialmente los fragmentos bajo el objetivo y la luz del láser para adquirir los respectivos espectros Raman. La identificación de los espectros obtenidos se realizó mediante el software True Match que compara los espectros experimentales con los contenidos en las librerías de espectros de referencia.

Los espectros Raman obtenidos de manera manual se midieron desde distintos puntos de un mismo fragmento (4 a 6 puntos) con diferentes ajustes de foco y potencia de iluminación del láser (1 a 8 mW, normalmente 5 mW) para minimizar la fluorescencia. En el caso de las artes de pesca se tomaron 6 espectros por muestra que fueron comparados separadamente con espectros de tres librerías de referencia: IRUG (Peggie & The National Gallery, 2007; Price et al., 2009), SLoPP y SLoPP-E (Munno et al., 2020), RDSP y RDWP (Dong et al., 2020) y con una librería local (CHILOÉ) generada del análisis de microplásticos de muestras de arena playas y de muestras de tejido de choritos de cultivo, ambas de la provincia de Chiloé. Se obtuvieron los respectivos HQI (Hit Quality Index) que indican el grado de coincidencia con los espectros de referencia. Los resultados se informaron como promedios +/- desviación estándar. En algunos casos se utilizó la librería comercial Japan ST Dyes, Pigments & Stains Database. L60015 (Japan ST Dyes).

En este estudio se describen en primer lugar los resultados sobre los diferentes tipos de partículas presentes en las muestras de sedimento y su identificación química, indicando sus cantidades absolutas sin extrapolación a número de partículas por Kg de sedimento seco.

Cómo se analizó el 100% del área de filtración efectiva, el número absoluto de partículas identificadas por Raman se multiplicó por 100 bajo la suposición que la muestra analizada de 10 g es representativa de lo que se hallaría en 1 Kg de sedimento seco. Esto es solo una aproximación dado que el número de partículas totales encontradas por filtro es inferior a 100, número mínimo sugerido en el trabajo de los trabajos de Cowger et al., 2024.

Los resultados obtenidos fueron registrados en una tabla, donde se detallaron los datos de los espectros junto con observaciones sobre las partículas las que fueron fotografiadas con la ayuda del mismo software. Paralelamente, se hizo el análisis de las artes de pesca de material plástico encontradas en el humedal y sus cercanías para poder crear una biblioteca de espectros locales y así comparar la composición química de los microplásticos presentes en el humedal con la de estos residuos.

# RESULTADOS

Objetivo específico 1 : Desarrollar protocolo de muestreo y análisis de microplásticos en sedimentos.

A través de la revisión de literatura disponible y, en particular, al protocolo de extracción y análisis de muestras elaborado en el marco de proyectos regionales del OIEA (RLA 7025 y RLA 7028) y su aplicación en el Laboratorio de Toxinas Marinas de la Universidad de Chile, fue posible adaptar y desarrollar un protocolo integral para la extracción y análisis de microplásticos y otras partículas presentes en sedimentos de humedales costeros (ver Metodología). Este protocolo incluyó el diseño y ejecución del muestreo en terreno, el procesamiento detallado de las muestras en laboratorio, la separación de partículas y el análisis de estas mediante espectroscopía Raman para su identificación química. Se adaptaron cuidadosamente los procedimientos a las condiciones específicas del sitio de estudio, así como a los materiales, equipos y reactivos disponibles, garantizando su viabilidad tanto en el campo como en laboratorio. Además, se incorporaron controles de calidad para optimizar la recuperación de partículas y minimizar la contaminación. Este protocolo representa una metodología reproducible que puede servir como modelo para futuros estudios sobre microplásticos en otros humedales y ecosistemas similares, y contribuir significativamente al desarrollo de metodologías estándar para el análisis de microplásticos en sedimentos.

Se destaca que, a diferencia de numerosos trabajos anteriores (ver Tabla 1), en esta tesis la información corresponde a partículas, fibras y films que fueron identificadas cada una por espectroscopía Raman o que, en algunos casos, mostraron espectros Raman aún no identificados. Además, se incluyeron las partículas analizadas que no generaron espectros Raman o que mostraron un alto grado de fluorescencia que impidió poder separar el espectro Raman (N= 233). El número total de partículas identificadas por espectroscopía Raman (N = 331) fueron detectadas en 64 filtros, de un total de 564 partículas analizadas.

Objetivo específico 2 : Determinar la distribución espacial, composición química, forma y color de los microplásticos en los sedimentos y en residuos de la mitilicultura.

En la Figura 10 y Tabla 4 se muestra la heterogeneidad en los tipos de partículas analizadas por espectroscopía Raman presentes en 54 filtros (N = 564). Los números corresponden a las cantidades absolutas de partículas encontradas en los 64 filtros. Se observa una clara prevalencia de partículas que no arrojaron espectros Raman (233), materiales naturales y una proporción menor de contaminantes identificables como polímeros (N = 37) y pigmentos (N = 19). También muestra que el grupo de celulosa y algodón es uno de los más abundante (N = 128), mientras que las partículas inorgánicas (n = 96) y partículas con espectros no identificados (NI) (N = 51) tienen una contribución relevante pero menor. Estos datos subrayan la absoluta necesidad de obtener una identificación química de las partículas presentes en una muestra ambiental, antes de llegar a conclusiones sobre el grado de contaminación por microplásticos.

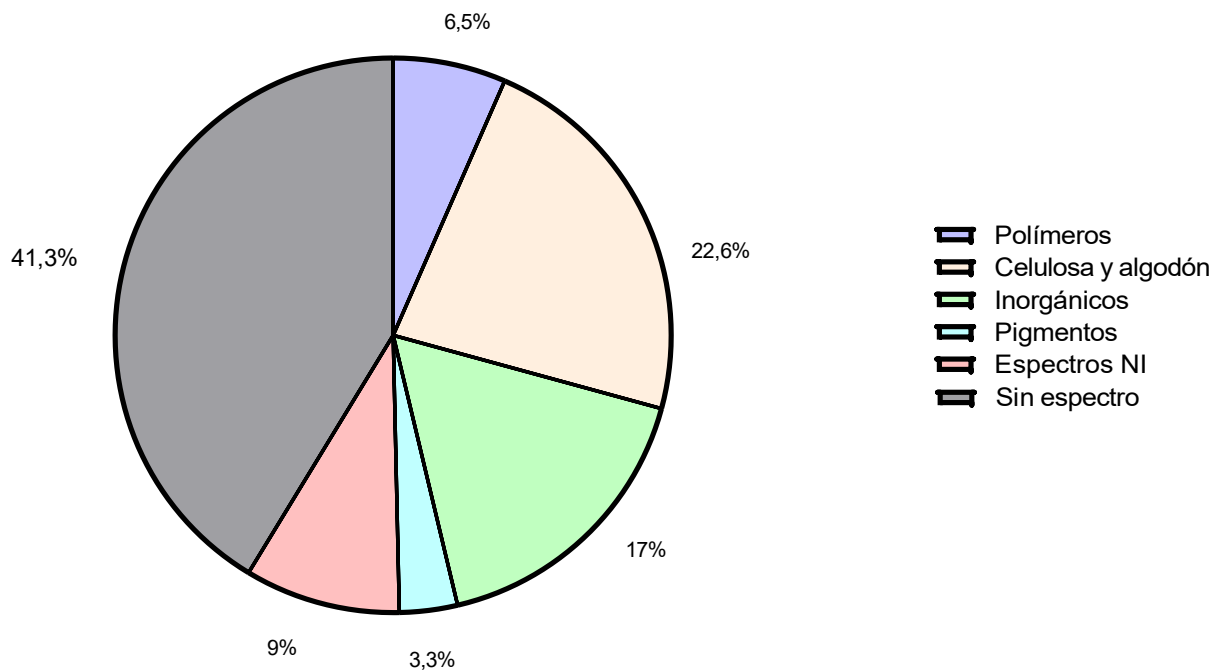


Figura 10. Partículas encontradas mediante espectroscopía Raman y sus porcentajes (N = 564)

Tipos de Partículas	Cantidad	Cantidad / kg
Polímeros	37	68
Celulosa y algodón	128	237
Inorgánicos	96	178
Pigmentos	19	35
Espectros NI	51	94
Sin espectros	233	431
<b>Total</b>	<b>564</b>	<b>1043</b>

*Tabla 4. Tipos y cantidad absoluto y por kilogramo de partículas analizadas presentes en muestras del sedimento del humedal de Chullec.*

Polímero	Cantidad
PA (Poliamida)	8
PS (Poliestireno)	8
PE (Polietileno)	2
PET (Polietileno tereftalato)	7
ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno)	1
PP (Polipropileno)	8
PU (Poliuretano)	3
<b>Total</b>	<b>37</b>

*Tabla 5. Polímeros identificados mediante espectroscopía Raman*

La Figura 11 muestra la cantidad de partículas identificadas mediante espectroscopía Raman en los sedimentos del humedal de Chullec, clasificadas en cada categoría de polímeros, materiales inorgánicos, pigmentos, celulosa y algodón, y partículas con espectros Raman sin identificar por limitaciones de las bases de datos disponibles (N = 51). La mayoría de esas partículas muestran espectros con bandas bajo los 1000 cm<sup>-1</sup> que pueden corresponder a minerales o pigmentos.

En el grupo de polímeros, el polipropileno (PP) es el más abundante (N = 8) al igual que el poliestireno (PS; N = 8) y las poliamidas (PA; N = 8). El poliéster (PET; N = 7) se encuentra dentro de los menos representados junto al poliuretano (PU; N = 3), el polietileno (PE; N = 2), el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS; N = 1), lo que refleja una diversidad limitada pero

significativa de plásticos en los sedimentos. Entre la celulosa y el algodón, destaca ampliamente la celulosa (N = 114), en comparación con el algodón, que tiene una representación mucho menor (N = 14). En las partículas inorgánicas predomina el Sui-sho (N= 64), seguido por compuestos como Titanium White (N = 10), Barium White (N = 7) y sodalita (N = 7). Otros compuestos inorgánicos como calcita (N = 4) y el yeso (Gypsum) (N = 1) son los que se encuentran en menor proporción. En los pigmentos y tintes, el Pigment Violet (N = 7) y Ivory black (N = 4) son los más destacados, aunque en cantidades muy bajas, mientras que otros pigmentos como Pigment Blue (N = 2), el Pigment Red 07 (N = 1), Basalt powder black (N = 1), Chromium oxide green (N = 1) y Cobalt Blue (N = 1) son los menos frecuentes.

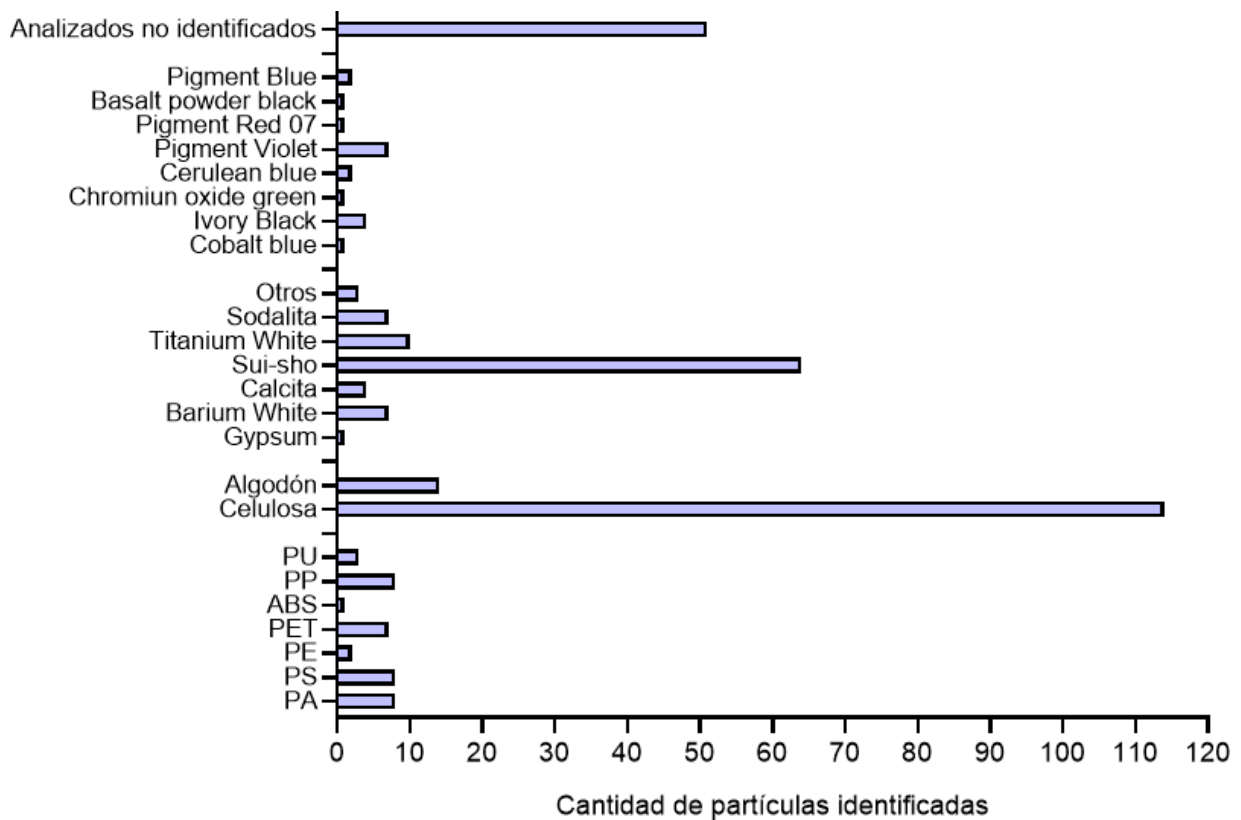


Figura 11. Partículas identificadas por espectroscopia Raman en sedimentos del humedal de Chullec

La Figura 12 y tabla 5 muestra que el polipropileno (PP), el poliestireno (PS) y las poliamidas (PA) son los polímeros más abundantes, representando cada uno el 21,6% del total, seguido por polietileno tereftalato (PET) con un 18,9%. Mientras que el poliuretano (PU) alcanza el 8,1% y el polietileno (PE) representa el 5,4%. Finalmente, el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) es el menos frecuente, con solo un 2,7%. Esto sugiere que los polímeros más comunes en los sedimentos del humedal de Chullec son el PP, PA y PS (64,8% del total).

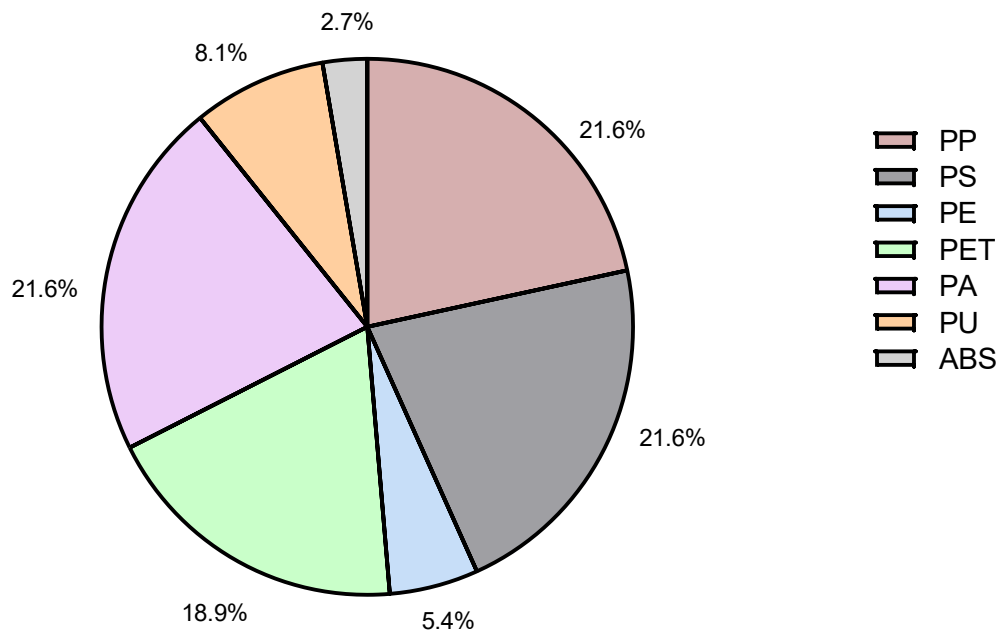


Figura 12. Polímeros identificados en los sedimentos del humedal de Chullec

La Figura 13 muestra la distribución de colores de los polímeros identificados por espectroscopía Raman en los sedimentos del humedal de Chullec. Predominan los polímeros transparentes que representan el 56,7% del total (N= 21), seguido por el color blanco, con un 29,7% (N = 7). En menor proporción se encuentran los polímeros de color azul y amarillo, con 10,8% y 2,7%, respectivamente (N = 4 y 1). Los colores corresponden a pigmentos o tintaciones incorporados durante la producción industrial y confirman su origen artificial.

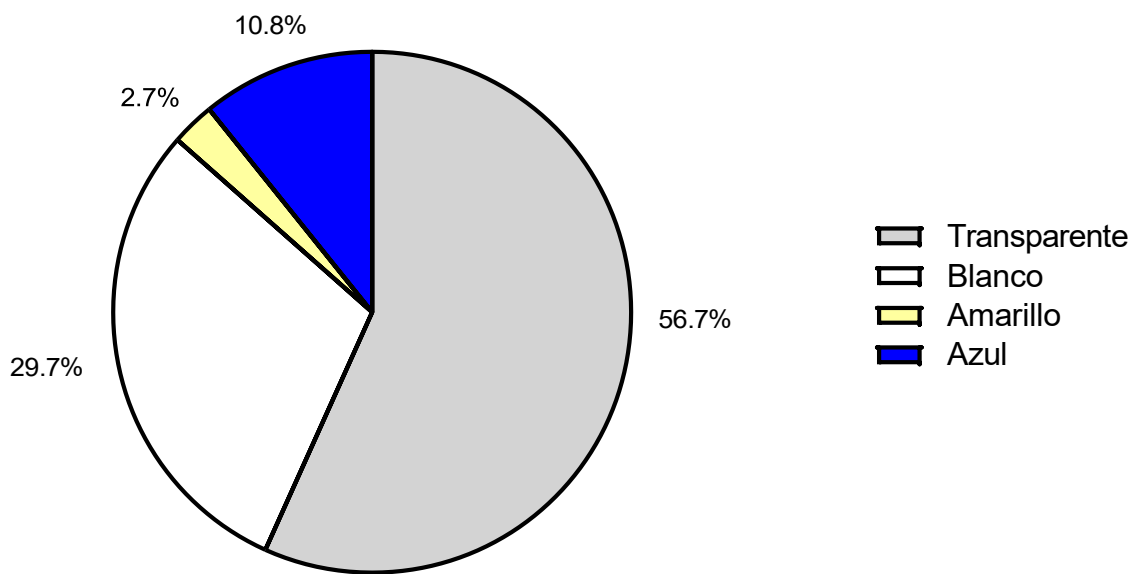


Figura 13. Color de polímeros identificados en sedimentos del humedal de Chullec

La Figura 14 presenta las formas de los polímeros identificados en los sedimentos del humedal de Chullec. Predominan las fibras representando el 48,6% del total (N = 18) y se observan fragmentos, con un 40,5% (N = 15). Las perlas y films son las menos frecuentes, con un 8,1% (N = 4) y un 2,7% (N = 1), respectivamente. Estos resultados destacan que las fibras son la forma más común encontrada en los sedimentos. La Figura 14 muestra ejemplos de las formas de polímeros identificados por espectroscopía Raman.

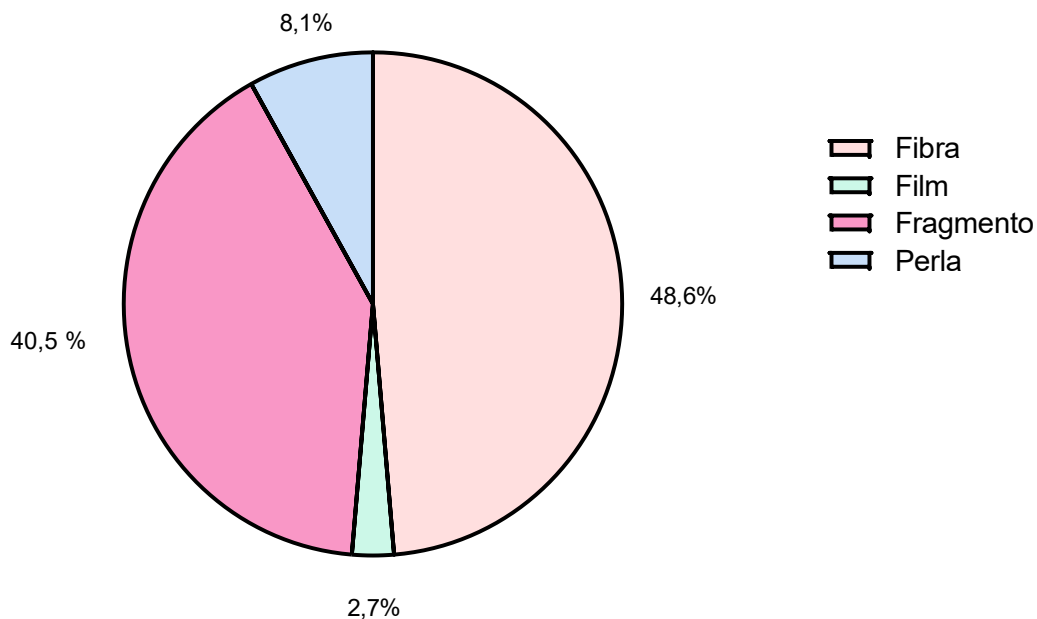
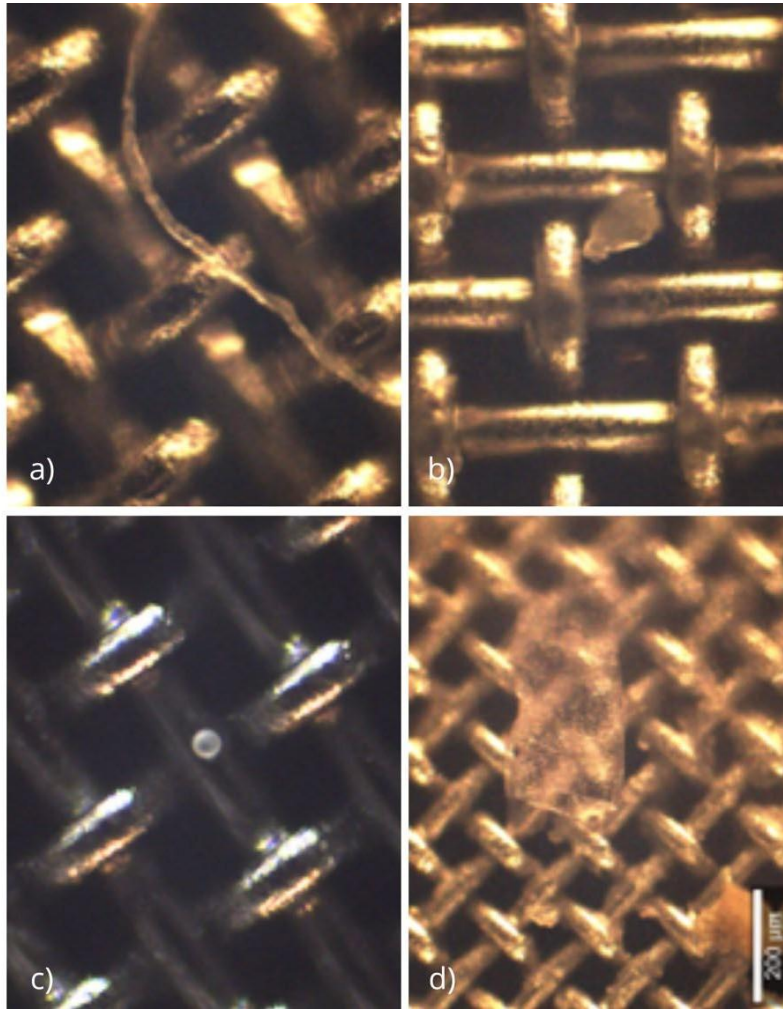
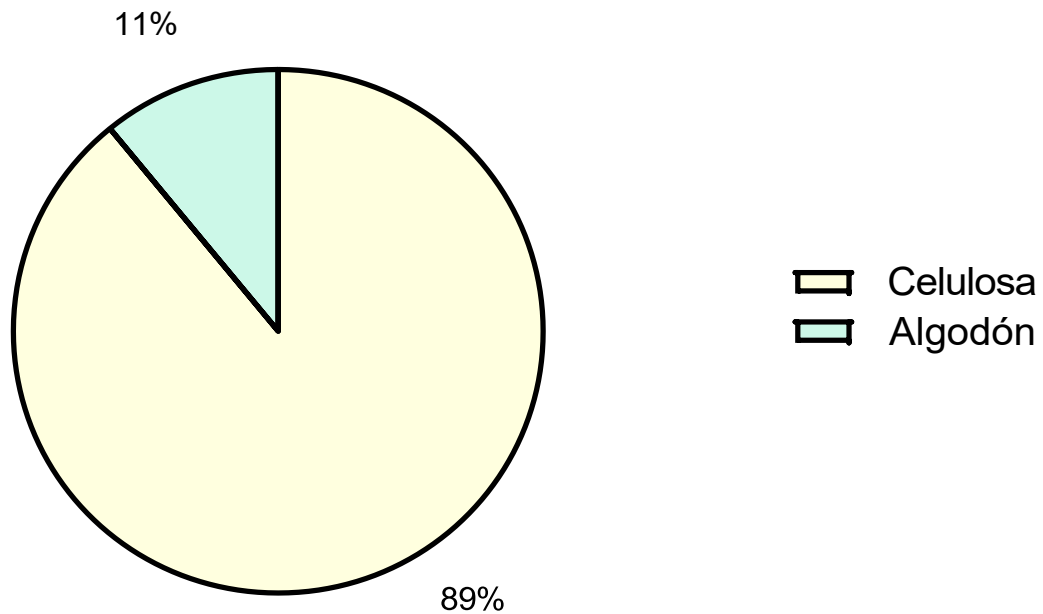


Figura 14. Forma de polímeros identificados en sedimentos del humedal de Chullec



*Figura 15. Fotografías de polímeros identificados en sedimentos: a) Fibra b) Fragmento c) Perla d) Film. La malla del filtro es de 25  $\mu\text{m}$*

La Figura 16 muestra que la celulosa es el componente predominante del total de partículas identificadas en el sedimento (N = 331), representando el 34,4% (N = 114), mientras que el algodón constituye solo el 4,2% (N = 14) restante.



*Figura 16. Abundancia de celulosa y algodón en sedimentos del humedal de Chullec*

En la Figura 17 muestra la variedad de tipos de partículas inorgánicas presentes, donde el componente predominante entre ellas es el Sui-sho representando el 66.7% del total de las partículas inorgánicas (N = 64), luego se encuentra el Titanium White alcanzando un 10,4% (N = 10) siendo el segundo más abundante, mientras que el Barium White y Sodalite representan el 7,3% cada uno (N = 7). Finalmente se encuentran los menos abundantes que corresponden a Calcita con un 4,2% (N = 4), otros compuestos con un 3,1% (N = 3) y yeso (gypsum) con un 1% (N = 1).

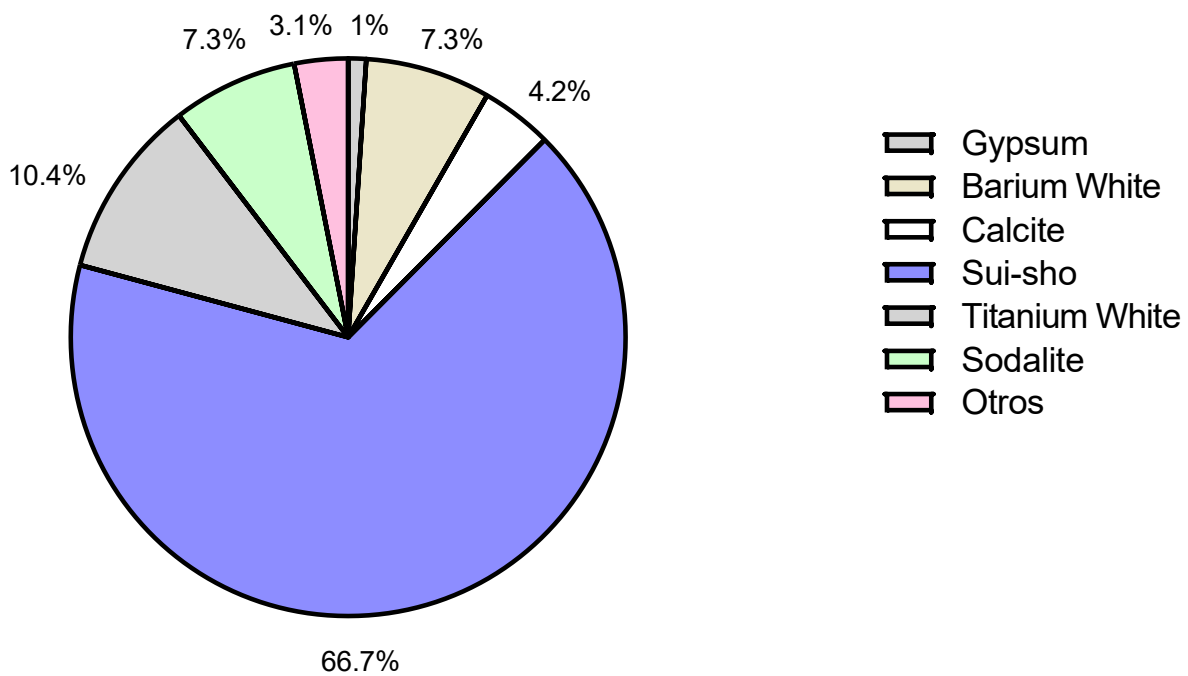


Figura 17. Abundancia de partículas inorgánicas en sedimentos del humedal de Chullec

La Figura 18 muestra la heterogeneidad en los tipos de pigmentos y tintes en las partículas presentes, donde el Pigment Violet representa el 36,8% del total de ellas (N = 7), siendo la más predominante, seguido por el Ivory Black con un 21% (N = 4) y el Cobalt Blue con un 10,5% (N = 2). Mientras que el Pigment blue, el Pigment red y Basalt powder black se encuentran en la misma proporción con un 5,2% cada uno (1).

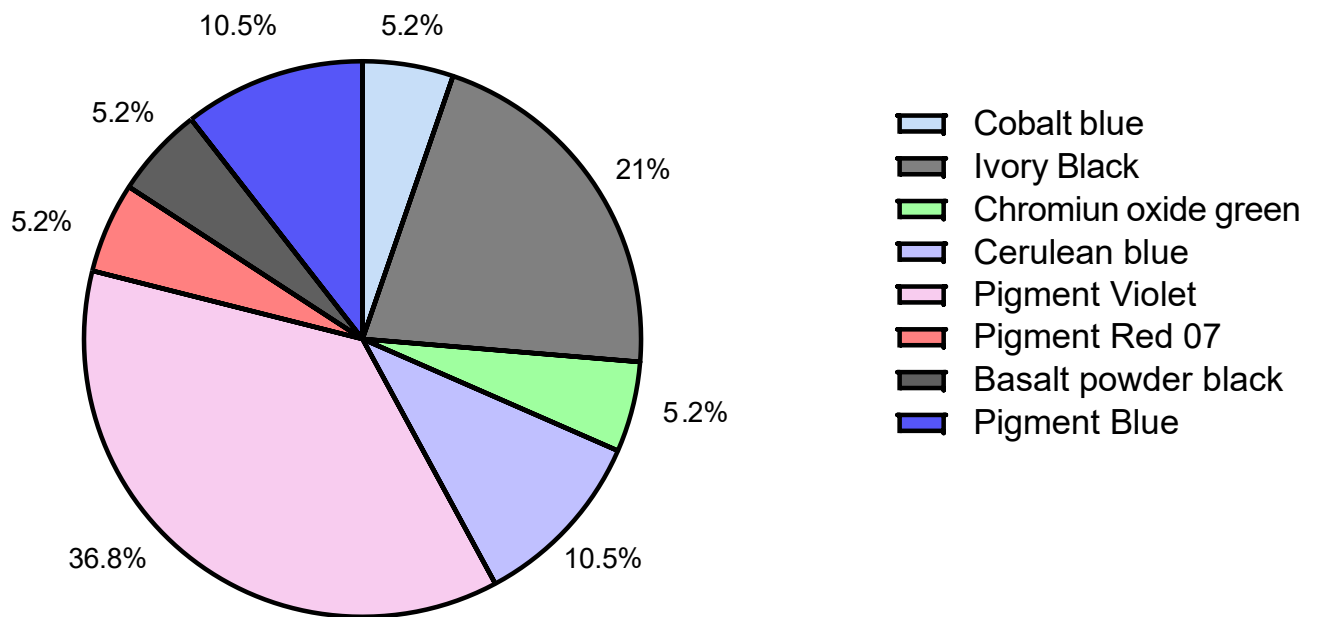


Figura 18. Abundancia de pigmentos y tintes en los sedimentos del humedal de Chullec

La Figura 19 y Tabla 4 muestran la abundancia de polímeros identificados por espectroscopia Raman (N = 37) en sedimentos del humedal de Chullec por nivel desde la línea de más alta marea (Nivel 1) a la más baja (Nivel 3). Se refleja una mayor acumulación de polímeros en los niveles extremos, Nivel 1 (N = 15) y Nivel 3 (N = 12) con un 40,5% y 32,4% respectivamente, mientras que el Nivel 2 presenta una menor abundancia con un 27% (N = 10). Sin embargo, debido a los valores obtenidos, no es posible establecer diferencias en la distribución de polímeros entre transectos y niveles, por lo que la figura y su tabla se presentan únicamente como referencia informativa.

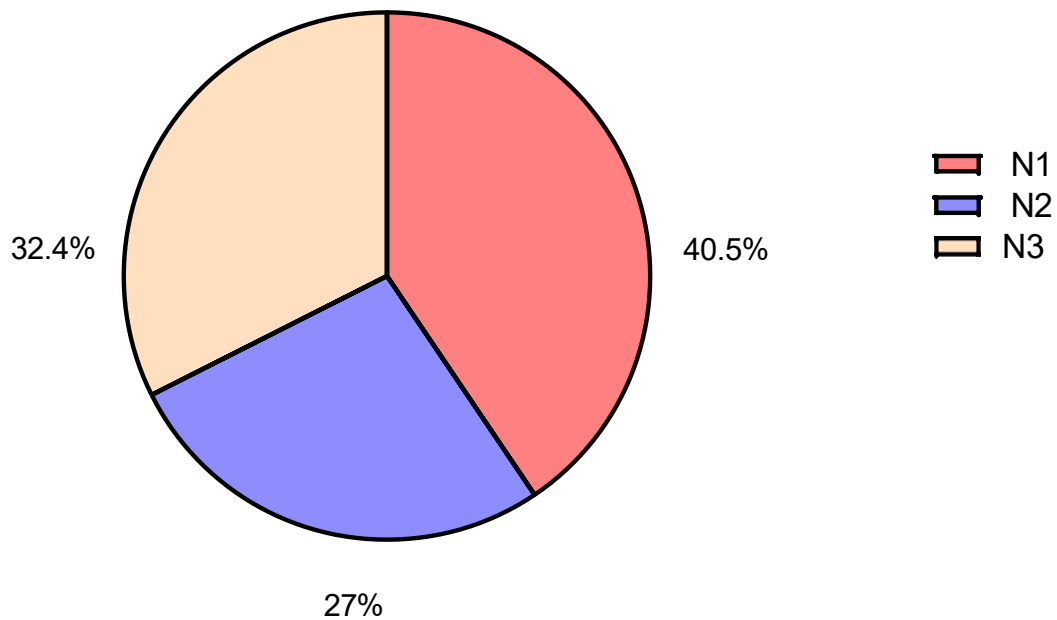


Figura 19. Abundancia de polímeros en sedimentos del humedal de Chullec por nivel

Nivel	Nº polímeros
1	15
2	10
3	12

Tabla 6. Abundancia de polímeros identificados en sedimentos

Objetivo específico 3 : Comparar la composición química de los microplásticos en los sedimentos con la de los residuos de la mitilicultura.

1. Construcción de una librería local de espectros Raman de artes de pesca.

Se construyó una librería de espectros locales obtenidos de las artes de pesca recolectadas a lo largo de la línea de más alta marea del humedal de Chullec con el fin de compararlos con los espectros de microplásticos hallados en los sedimentos. Se incluyeron fragmentos de una boya de Plumavit (PS), de boyas azules, negras y grises, de sacos de malla roja y azul, redes verdes y negras, de cuerdas y chicotes verdes. En cada fragmento de arte de pesca se tomaron seis espectros en distintos puntos de su superficie, para verificar variabilidad y corroborar su composición química. Adicionalmente se fotografiaron todos los fragmentos de artes de pesca como se muestran en la Figura 19.

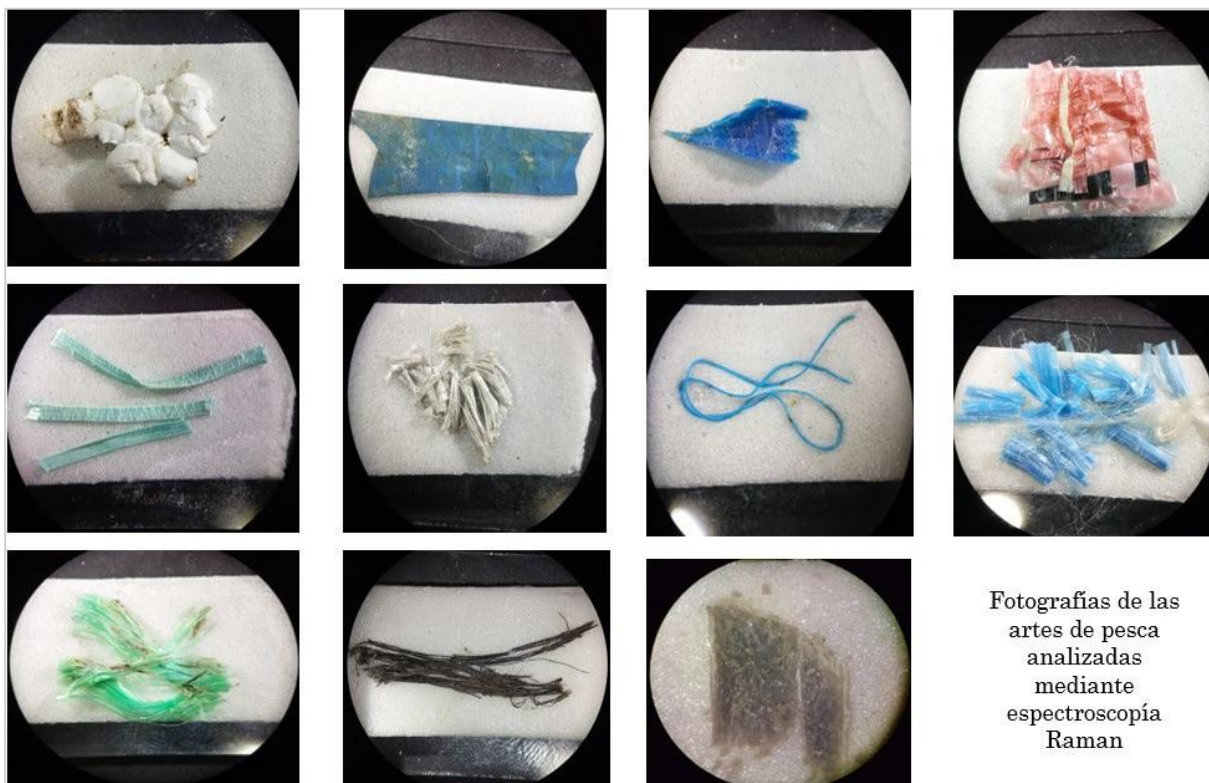


Figura 20. Fotografías de las artes de pesca analizadas mediante espectroscopía Raman

Se definió un HQI (Hit Quality Index, coeficiente de correlación, generado por el software True Match del microscopio Raman) mayor al 85%. Este valor es una medida de la similitud del espectro de la muestra con el que se encuentra presente en las librerías utilizadas. En el caso de espectros fuertemente afectados por los efectos de la exposición ambiental (*weathering*) (espectros ABS y PA, Figura 25 (b y c)) se compararon visualmente las bandas del sector 2500 a 3100  $\text{cm}^{-1}$  (vibraciones enlaces C-H) y las presentes en el sector del "fingerprint" de polímeros (800 a 1600  $\text{cm}^{-1}$ )

## 2. Comparación de los espectros Raman de artes de pesca con librerías de referencia.

Como se describe en la Metodología, se tomaron 6 espectros en cada arte de pesca que fueron comparados separadamente con las librerías de acceso gratuito IRUG (Pigmentos y tinciones), SLoPP-E, RDWP (polímeros) y con una librería local (CHILOÉ) generada del análisis de microplásticos por LABTOX de muestras de arena de playas y de muestras de tejido de choritos de cultivo, ambas de la provincia de Chiloé desde el año 2022. Las librerías SLoPP-E y RDWP contienen espectros de polímeros "weathered". La librería IRUG contiene algunos espectros de polímeros representativos. Del mismo modo se tomaron entre 4 y 6 espectros en cada partícula de polímero de los sedimentos. Este número de espectros por partícula es necesario por la variabilidad de la respuesta Raman en partículas de muestras ambientales.

El análisis por espectroscopia Raman de las artes de pesca denominadas Chicote verde, red verde, cuerda, saco malla azul, red azul y saco malla roja mostró que se trataba de polipropileno (PP) acompañado de pigmentos como aditivo. La Figura 21 muestra los coeficientes de correlación (HQI; promedio  $\pm$  D.S.) obtenidos por comparación con los espectros de las librerías de referencia SLoPP-E, RDWP, IRUG y CHILOE. Los valores son consistentemente altos para la mayoría de estas artes de pesca, superando el 85% de correspondencia en el chicote verde, red verde, cuerda y saco malla roja. Sin embargo, se observa que saco malla y red azules presentan HQIs menores al 80% y con mayor variabilidad. Esto puede reflejar el efecto de *weathering* sobre esos polímeros y la dificultad consiguiente de obtener un mejor ajuste por las alteraciones de los espectros Raman en esas condiciones. También influyen el origen y el tipo de muestras *weathered* que se incluyen en las librerías de referencia como es el caso de la librería RDWP cuyas muestras fueron obtenidas desde un vertedero cerca de la ciudad china de Wuhan.

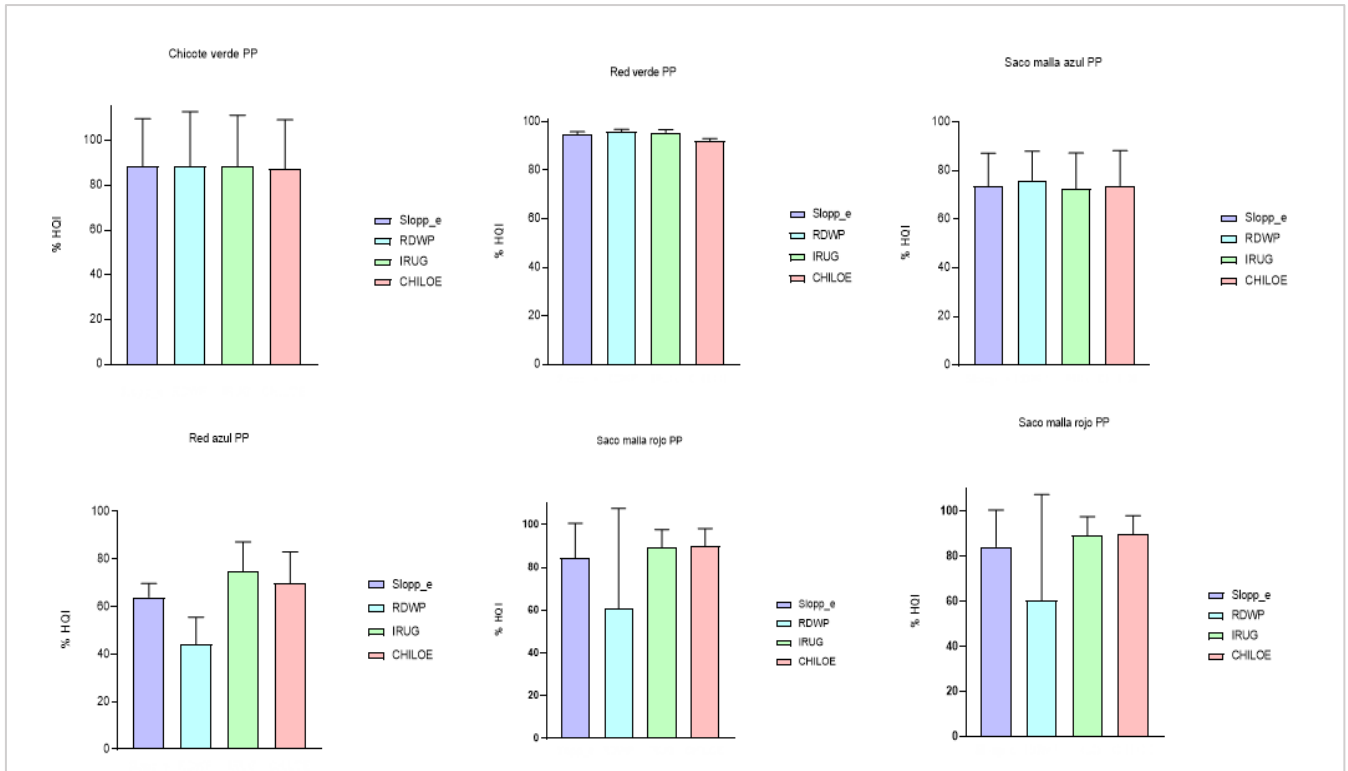


Figura 21. Análisis mediante espectroscopía Raman en muestras de chicote verde PP, red verde PP, saco malla azul PP, red azul PP, saco malla rojo PP y saco mala rojo PP comparadas con espectros de polipropileno de las bases de datos Slopp\_e, RDWP, IRUG y CHILOE

El análisis por espectroscopia Raman de las artes de pesca boya negra, boya azul nueva, red negra y boya gris mostró que se trataba de polietileno. La Figura 22 muestra los coeficientes de correlación (HQI; promedio +/- D.S.) obtenidos por comparación con los espectros de las librerías de referencia SLoPP-E, RDWP, IRUG y CHILOE. Los valores son consistentemente altos para la mayoría de estas artes de pesca, superando el 85% de correspondencia y una baja variabilidad.

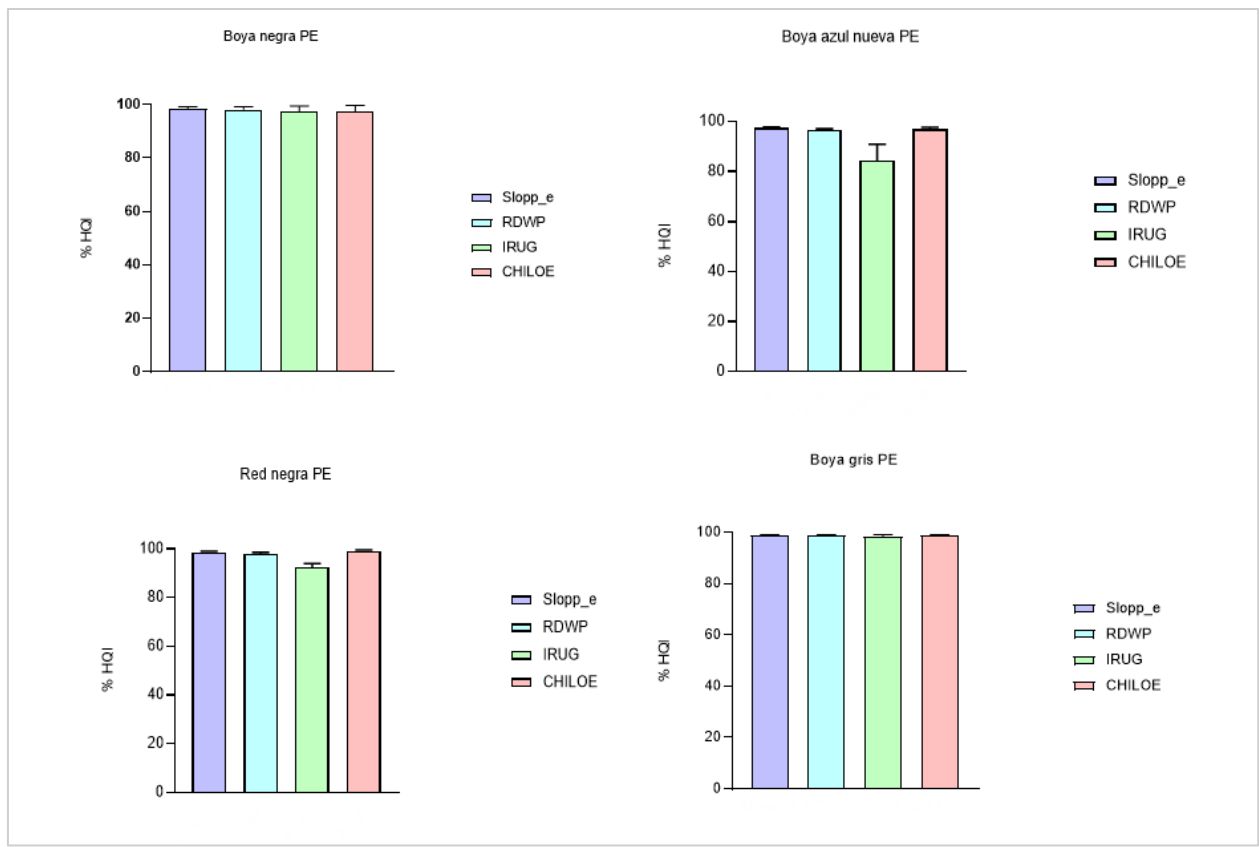


Figura 22 Análisis mediante espectroscopía Raman en muestras de boya negra PE, boya azul PE, red negra PE y boya gris PE comparadas con espectros de polietileno de las bases de datos Slopp\_e, RDWP, IRUG y CHILOE

El análisis por espectroscopia Raman del arte de pesca "boya de Plumavit" mostró que se trataba de poliestireno (PS). La Figura 23 muestra los coeficientes de correlación (HQI; promedio +/- D.S.) obtenidos por comparación con los espectros de las librerías de referencia SLoPP-E, RDWP, IRUG y CHILOE. Se observan valores HQI igual o mayores al 90% y con baja variabilidad. Por otro lado, RDWP tiene el porcentaje más bajo, cercano al 60%, y muestra una mayor dispersión en comparación con las otras librerías.

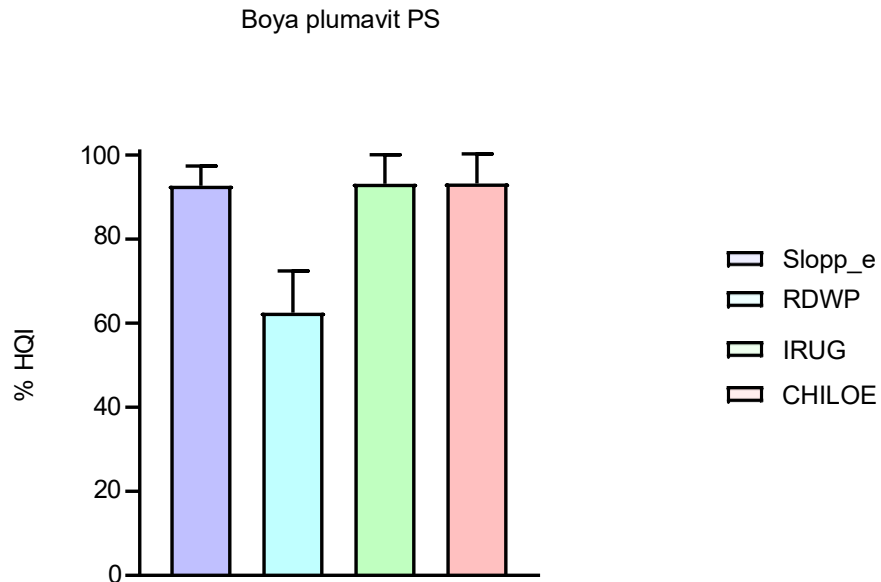


Figura 23. Análisis mediante espectroscopía Raman en muestras de boya plumavit PS comparadas con espectros de poliestireno de las bases de datos SLoPP\_e, RDWP, IRUG y CHILOE

## Comprobación inicial de la hipótesis

Una vez identificados los espectros Raman de los microplásticos (MPs) de los sedimentos se procedió a abordar la hipótesis. Para ello se compararon los coeficientes de correlación (HQI) de los espectros obtenidos de los microplásticos del sedimento con los espectros de las artes de pesca y las librerías espectrales de referencia (CHILOE, Slopp\_e, RDWP, IRUG y ARTES DE PESCA FV CHULLEC) (Figuras 24 y 25).

La Figura 26 muestra los coeficientes de correlación de los espectros de 8 partículas de sedimento identificadas como polipropileno (PP) comparados con los espectros de las artes de pesca respectivas y con las librerías de referencia. Para ello se analizaron en True Match todos los espectros obtenidos de las 8 partículas del PP con la librería local y las de referencia. Se obtuvo un valor de HQI para cada espectro de partículas del sedimento y de ellos se obtuvo un promedio con su D.S. Para este polímero se observa que los valores de HQI son cercanos al 90% de correspondencia en todas las librerías analizadas (ARTES DE PESCA FV CHULLEC, CHILOE, SLoPP-E, RDWP e IRUG) con baja variabilidad.

Se realizó un procedimiento similar con los coeficientes de correlación de 6 partículas identificadas como poliestireno (PS) y de 2 partículas identificadas como polietileno (PE). Los resultados muestran valores uniformemente altos, superiores al 80% de correspondencia, en las mismas categorías.

Este análisis que se realizó para otros polímeros que muestran efectos de las alteraciones ambientales (*weathering*) (Figura 25) genera resultados originales que sugieren que las partículas identificadas en los sedimentos tienen como probable origen la degradación y fragmentación de las artes de pesca para el cultivo de choritos más prevalentes en el humedal de Chullec.

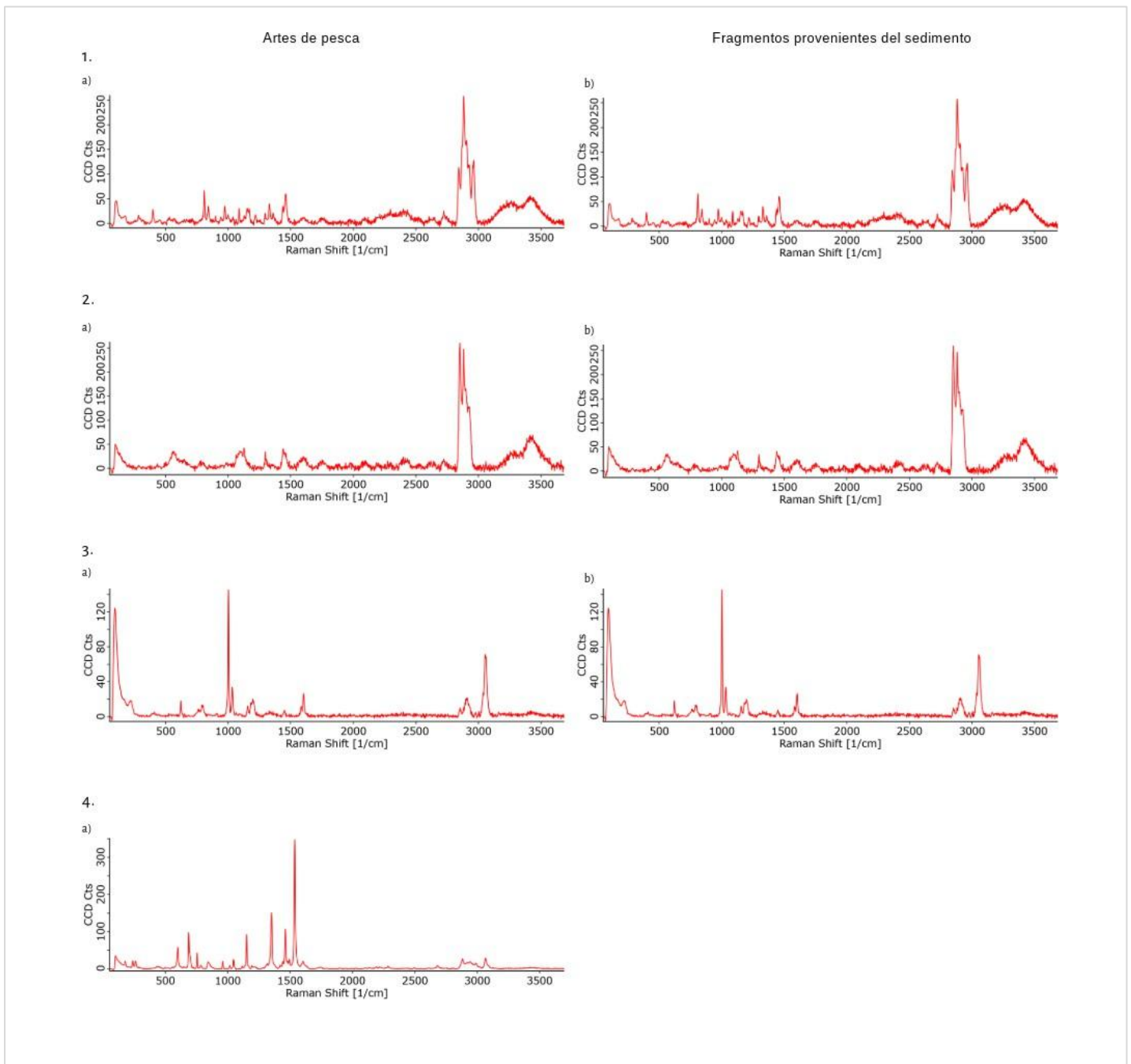


Figura 24. Espectros Raman de diferentes tipos de polímeros analizados. La numeración indica los materiales analizados: 1. corresponde a polipropileno (PP), 2. a polietileno (PE), 3. a poliestireno (PS) y 4. a policarbonato (PC). En cada caso, a) muestras obtenidas de artes de pesca, b) partículas identificadas en el sedimento.

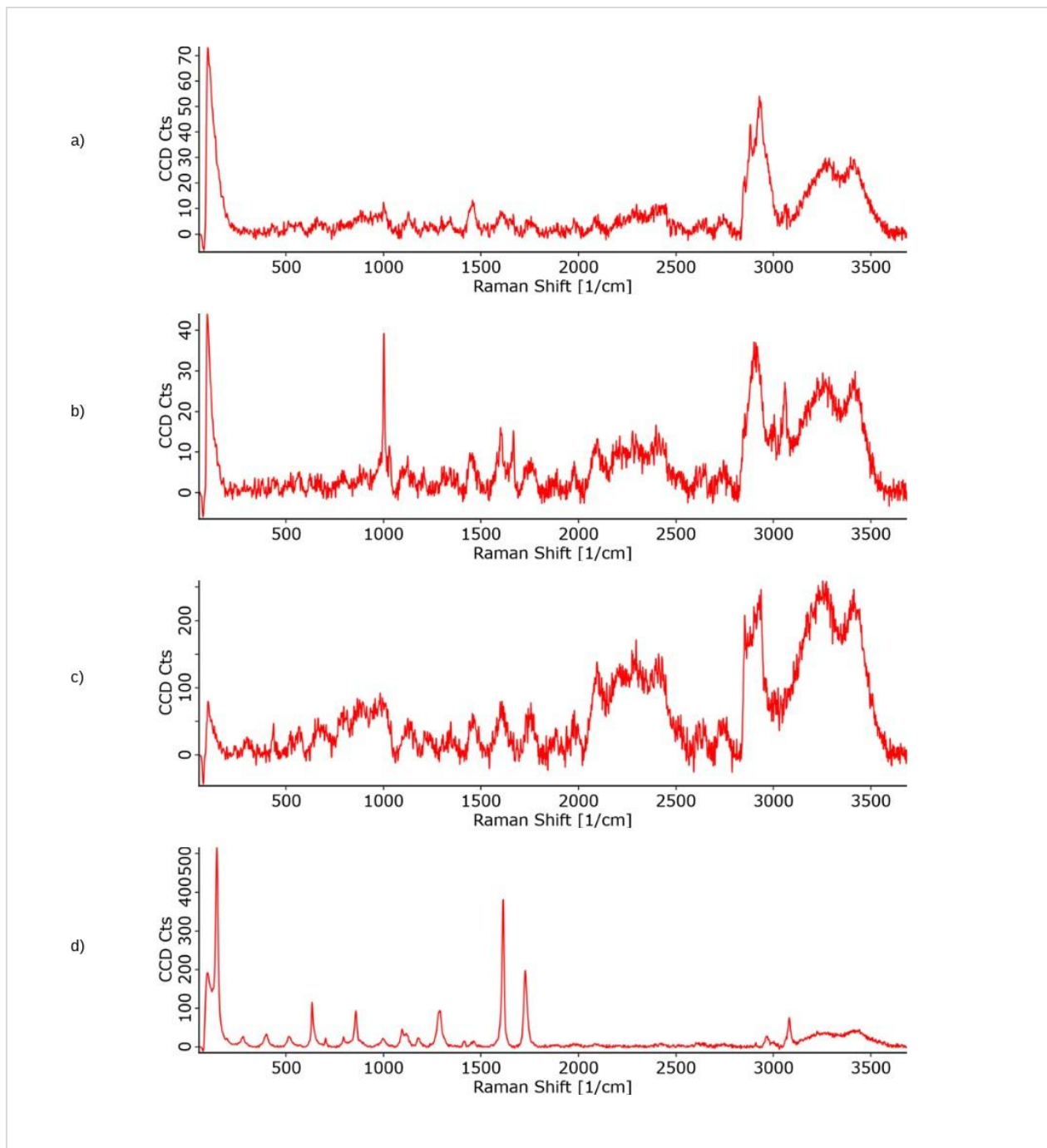


Figura 25. Espectros Raman de diferentes tipos de polímeros analizados. A) poliuretano (PU) b) acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) c) poliamida (PA) d) poliéster (PET). Los espectros a), b) y c) muestran alteraciones que se atribuyen a los efectos del weathering, pero es posible indentificarlos

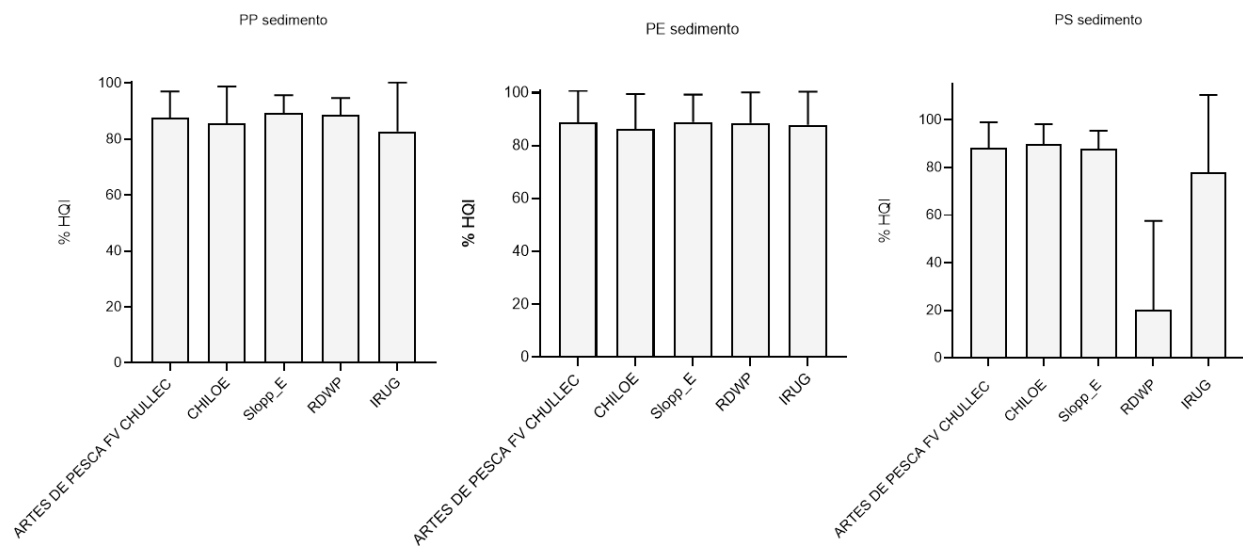


Figura 26. Coeficientes de correlación (HQI) de los espectros obtenidos de los microplásticos del sedimento de las artes de pesca y las librerías de referencia de: a) PP b) PE y c) PS

# DISCUSIÓN

El presente estudio se desarrolló con el objetivo general de identificar la composición química de los microplásticos que se acumulan en el sedimento del humedal de Chullec para identificar su distribución espacial y el posible impacto de la mitilicultura. Por lo anterior, se planteó la hipótesis de que al caracterizar químicamente los MPs en los sedimentos, sería posible establecer si su origen estuviese asociado a los materiales utilizados en esta actividad productiva. Para abordar este objetivo general, se estructuró el estudio en torno a tres objetivos específicos, que se discuten a continuación.

Se lograron avances significativos en la etapa de diseño experimental y en la selección y adaptación de metodologías, pero la experiencia obtenida confirma que hay que avanzar hacia un protocolo estandarizado. Brander et al., 2020 enfatiza la necesidad de contar con protocolos estandarizados para el análisis de microplásticos en sedimentos y otras matrices debido a varios factores críticos. En primer lugar, los microplásticos son contaminantes ubicuos presentes en diversos ambientes (agua, sedimento, aire, tejidos), lo que incrementa el riesgo de contaminación cruzada o de fondo durante la toma, procesamiento y análisis de muestras. La ausencia de métodos armonizados complica la comparabilidad de resultados entre laboratorios, dificultando la generación de datos confiables y reproducibles a escala global. Además, muchos grupos de investigación han desarrollado sus metodologías a través del ensayo y error, sin una base común validada por la comunidad científica. Por ello, el establecer estándares de control de calidad (QA/QC) es fundamental para evitar falsos positivos y lograr una evaluación rigurosa del riesgo ambiental asociado a los microplásticos.

Una revisión exhaustiva de la literatura permitió identificar los métodos comúnmente utilizados para la extracción de microplásticos. Para el proceso de digestión de la materia orgánica presente en las muestras de sedimento se utilizó  $H_2O_2$  al 30% (Liu et al., 2022) Como técnica de separación de partículas del sedimento fue elegida la separación por densidad utilizando una solución saturada de  $ZnCl_2$  (Liu et al., 2022; Sánchez, 2018) y posteriormente se eligió la filtración al vacío para la recuperación de partículas, debido a su efectividad reportada en estudios anteriores.

Por otro lado, la manera en que se realizó la fijación de los filtros ya secos resultó adecuada, ya que los porta y cubre objetos no interfirieron en la observación y análisis mediante

espectroscopía Raman, por lo que se recomienda para futuros estudios fijar de esa manera los filtros.

El análisis de las partículas con espectroscopía Raman fue muy efectiva y versátil para poder identificar la composición de ellas y de los mismos residuos, ya que entregó una alta resolución y especificidad en la identificación de diferentes polímeros, celulosas, calcitas, pigmentos y otros materiales sin espectros conocidos. Los espectros desconocidos (N=41) mostraron en su mayoría propiedades de compuestos inorgánicos pero su identificación requerirá el uso de una base de datos más completa.

Es muy importante destacar aquí que, a diferencia de la mayoría de los estudios que aplican una selección visual previa de las partículas a analizar, esta investigación implementó un enfoque sin preselección visual, lo que permitió un análisis completo y sin sesgos. Esta metodología permitió identificar exitosamente 331 partículas mediante espectros Raman, y documentar 233 partículas adicionales que no generaron espectro o presentaron fluorescencia elevada, evidenciando la complejidad técnica del análisis de MPs en muestras ambientales degradadas (Cowger et al., 2021).

Dentro de las implicaciones para este objetivo radica en la identificación de los puntos críticos y necesarios tanto en los métodos de muestreo como los de análisis de microplásticos en sedimento y en otras matrices. Hermsen et al., 2018 propone aplicar un método de evaluación de calidad de los análisis que considera diez criterios: método y estrategia de muestreo, tamaño de la muestra, procesamiento y almacenamiento, preparación del laboratorio, condiciones de aire limpio, controles negativos, controles positivos, tipo de componente analizado, tratamiento de datos y presentación de resultados. Este sistema de evaluación podría aplicarse para tener un mayor control en la calidad de los datos, como también facilitar una estandarización y fiabilidad de procedimientos para permitir interpretaciones correctas de los resultados.

Los hallazgos de este estudio constituyen resultados originales que sugieren que las partículas identificadas en los sedimentos tienen como probable origen la degradación y fragmentación de las artes de pesca más prevalentes en el humedal de Chullec, lo que confirmaría la hipótesis de este trabajo.

En cuanto a la cantidad total de microplásticos encontrados, esta fue muy baja en comparación con estudios similares realizados en otros ecosistemas costeros y estuarinos. Mientras que en este trabajo se identificaron 68 partículas/kg de microplásticos mediante espectroscopía Raman, estudios como el de Edo et al., 2020 en estuarios de España reportan concentraciones de hasta  $24.400 \pm 5.200$  partículas/kg, y Su et al., 2023 en sedimentos de China informan valores en torno a  $1.737 \pm 322$  partículas/kg. Incluso en sistemas productivos del Atlántico sur como el estudiado por Santucci et al., 2024, se alcanzaron promedios de  $547 \pm 620$  ítems/kg. Asimismo, investigaciones realizadas en zonas costeras de Chiloé como la de Jorquera et al., 2022 han reportado abundancias considerablemente mayores, entre 270 y 1.210 partículas/kg, lo que resalta las diferencias asociadas al tipo de ambiente, grado de urbanización y presión antrópica. Estas diferencias podrían deberse, en parte, al menor nivel de urbanización directa del humedal de Chullec y a la predominancia de una única actividad productiva localizada. Además, uno de los factores que también podría explicar la baja abundancia de microplásticos hallados en el sedimento del humedal de Chullec es la realización de operativos de limpieza en la zona. Durante diciembre de 2022, la Municipalidad de Curaco de Vélez, en colaboración con voluntarios, estudiantes y empresas locales, organizó actividades de recolección de residuos en sectores costeros como Chullec, logrando retirar más de 300 kg de basura, principalmente plásticos, latas y cartones. Estas acciones enfocadas en la protección de los humedales y sus pasarelas de avistamiento pudieron contribuir significativamente a la reducción de la carga superficial de residuos plásticos en el ecosistema (Cortés Lehuei, 2022). No obstante, también es relevante considerar que muchos estudios previos aplican criterios de conteo basados en identificación visual o FTIR-ATR en lugar de espectroscopía Raman, lo que podría sobreestimar la cantidad real de polímeros plásticos (Cowger et al., 2024; Lusher et al., 2017). Asimismo, el enfoque más conservador y riguroso adoptado en este estudio pudo haber reducido el conteo de partículas sin espectro definido, priorizando la calidad de la identificación por sobre la cantidad aparente.

Por otro lado, la baja cantidad de partículas encontradas podría reflejar también un proceso de limpieza reciente por acción de mareas o escorrentías, o una dinámica sedimentaria que no favorece la acumulación prolongada de microplásticos. Esto invita a considerar la necesidad de estudios estacionales o repetitivos para evaluar la variabilidad temporal de la carga de MPs en este tipo de humedales.

Se logró una caracterización detallada de los MPs en sedimentos y residuos de la mitilicultura en términos de su composición química, forma y color. Los polímeros más frecuentes fueron PP, PS, PA, PET, PE, PU y ABS, todos materiales típicos de redes, cuerdas, boyas y sacos utilizados en faenas acuícolas nacionales, similares a los reportados en otros países (Andrady, 2011b; Galgani et al., 2021). Las formas predominantes fueron fibras (48,6%) y fragmentos (40,5%), con colores mayormente blancos, transparentes y azulados, característicos de partículas generadas por fragmentación secundaria (Koelmans et al., 2016). En este contexto, se destaca que las fibras de celulosa y algodón detectadas podrían atribuirse al material utilizado para fijar las semillas de mejillón a la línea madre, el cual se disuelve posteriormente durante el cultivo. La distribución espacial de estas partículas mostró una mayor acumulación en los extremos de los transectos (niveles 1 y 3), posiblemente influenciada por las mareas y el flujo fluvial, lo que se alinea con estudios realizados en otros humedales y estuarios (Dris et al., 2018; Mahon et al., 2017).

Una de las principales fortalezas metodológicas fue la aplicación de espectroscopía Raman sin selección visual previa, permitiendo identificar partículas plásticas incluso en estados avanzados de degradación, y reduciendo la posibilidad de sesgos por la inclusión de partículas "no plásticas" por apariencia. Esto permitió obtener una imagen más realista y representativa de la contaminación por MPs en el sedimento del humedal incluyendo la identificación de partículas inorgánicas y otros contaminantes, aportando al fortalecimiento de protocolos estandarizados recomendados por la literatura internacional (Cowger et al., 2024).

La construcción de una librería espectral local basada en residuos plásticos recolectados en el humedal permitió realizar una comparación directa entre los espectros de MPs en sedimentos y los de los materiales utilizados en la mitilicultura. Esta comparación arrojó altos coeficientes de similitud (HQI > 85%) para polímeros como PP, PE y PS, siendo esto una fuerte evidencia de que una fracción importante de los MPs hallados en los sedimentos tiene su origen en los residuos de la mitilicultura. Este hallazgo es coherente con estudios anteriores realizados en zonas costeras del sur de Chile, donde se ha documentado que la fragmentación de redes, cuerdas y sacos genera una fuente constante de microplásticos en el entorno marino (Hinojosa & Thiel, 2009).

La integración metodológica entre el análisis ambiental y la trazabilidad espectroscópica representa un avance significativo en la comprensión de las fuentes locales de contaminación por plásticos. Además, refuerza la necesidad de implementar medidas de mitigación y mejora

en el manejo de residuos acuícolas, incluyendo el uso de materiales biodegradables, la recolección de residuos flotantes y la fiscalización efectiva en centros de cultivo (Buschmann et al., 2009; Thiel et al., 2021). En conjunto, los resultados de estos tres objetivos permiten respaldar empíricamente la hipótesis planteada, aportando evidencia clara sobre la relación entre la composición de los MPs en el sedimento y los residuos generados por la mitilicultura local.

Un aspecto relevante en el análisis de microplásticos es el tamaño de las partículas, ya que los fragmentos más pequeños suelen tener mayor biodisponibilidad y potencial de interacción con organismos acuáticos. En el estudio de Liu et al. (2022), mediante espectroscopía microconfocal Raman de escaneo multipunto (MCmRSS), se detectó que aproximadamente el 67% de las partículas presentes en sedimentos costeros del Mar de China Oriental alcanzaron concentraciones promedio de  $91.000 \pm 55.000$  ítems/kg, lo que pone en evidencia la subestimación potencial que generan metodologías con menor resolución espectral.

Finalmente, al contrastar los resultados obtenidos en este estudio con antecedentes internacionales, se observó que los valores de abundancia reportados en la literatura son altamente variables, desde 31 partículas/kg en humedales urbanos de Indonesia (Suteja et al., 2024) hasta más de 24.000 partículas/kg en estuarios españoles (Edo et al., 2020). Sin embargo, gran parte de estas diferencias pueden atribuirse a la diversidad de técnicas de muestreo, profundidades de extracción, reactivos utilizados o criterios de clasificación de partículas. Muchos de estos estudios también aplican criterios de exclusión visual antes del análisis químico, lo cual puede reducir la exactitud de los resultados (Lusher et al., 2017).

En comparación a trabajos previos, esta tesis aplicó un enfoque más riguroso, analizando todas las partículas en los filtros sin preselección visual, y empleando espectroscopía Raman para la identificación química, lo cual aumentó considerablemente la resolución analítica y la confiabilidad de la asignación de polímeros. Sin embargo, no se llevaron cabo pruebas preliminares con muestras de sedimento fortificadas con microplásticos para determinar el porcentaje de recuperación lo cual pudo ser importante para conocer la efectividad in situ de los métodos elegidos.

Adicionalmente, la construcción de una librería espectral propia basada en residuos acuícolas locales permitió establecer relaciones directas entre los MPs encontrados y las fuentes específicas de contaminación, lo cual es escasamente abordado en la literatura previa. En

conjunto, estos elementos refuerzan el valor innovador del presente estudio y su potencial para contribuir al desarrollo de metodologías más representativas y aplicables en ecosistemas similares.

# CONCLUSIONES

A través de un protocolo metodológico riguroso, que evitó la preselección visual y utilizó microespectroscopía Raman para la caracterización de las partículas, fue posible obtener una identificación química inequívoca de 331 partículas, de las cuales 37 fueron clasificadas como microplásticos, con una predominancia de polipropileno (PP), poliestireno (PS) y poliamidas (PA), materiales ampliamente usados en redes y cuerdas acuícolas. En cuanto a su morfología, se observó que las formas más comunes fueron fibras (48,6%) y fragmentos (40,5%), mientras que films y perlas fueron poco frecuentes.

La comparación espectral entre los microplásticos hallados en sedimentos y los residuos acuícolas recolectados evidenció una alta coincidencia (HQI >85%), respaldando la hipótesis de que los residuos de la mitilicultura son una fuente relevante de MPs en el humedal estudiado. Estos resultados subrayan el impacto local de actividades productivas sobre ecosistemas de alto valor ecológico y refuerzan la necesidad de incorporar criterios de sostenibilidad y manejo de residuos en la acuicultura.

A pesar de la baja abundancia total de microplásticos encontrada en comparación con otros estudios nacionales e internacionales, este hallazgo debe interpretarse considerando los protocolos de limpieza que se realizan periódicamente en el sector, lo que sugiere que la contaminación podría estar subestimada.

Asimismo, este trabajo confirma la importancia de utilizar técnicas analíticas de alta resolución, como la espectroscopía Raman, para garantizar la precisión en la identificación de microplásticos en matrices ambientales complejas.

A futuro, sería relevante implementar monitoreos estacionales para evaluar la variabilidad temporal de la contaminación por MPs y comprender mejor la influencia de los factores hidrodinámicos, como mareas y escorrentías, en su redistribución.

También, se sugiere ampliar el enfoque de investigación a otras matrices ambientales del humedal, como biota bentónica y agua superficial, para evaluar rutas de transferencia de microplásticos en la red trófica local. Desde una perspectiva de gestión ambiental, es crucial avanzar hacia la implementación de planes de manejo de residuos en la mitilicultura,

incluyendo la adopción de materiales biodegradables, estrategias de retiro de residuos abandonados y programas de monitoreo ambiental asociados a las concesiones acuícolas.

En conclusión, este estudio aporta una base científica sólida para el entendimiento de la contaminación por microplásticos en humedales costeros del sur de Chile, proporcionando lineamientos que pueden fortalecer tanto la investigación futura como la formulación de políticas públicas orientadas a la protección y conservación de estos ecosistemas vulnerables.

# BIBLIOGRAFÍA

- Andrady, A. L. (2011a). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Andrady, A. L. (2022). Weathering and fragmentation of plastic debris in the ocean environment. In *Marine Pollution Bulletin* (Vol. 180). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113761>
- Andres, B. A., Johnson, J. A., Valenzuela, J., Morrison, R. I. G., Espinosa, L. A., & Ross, R. K. (2009). Estimating Eastern pacific coast populations of Whimbrels and Hudsonian Godwits, with an emphasis on Chiloé Island, Chile. *Waterbirds*, 32(2), 216–224. <https://doi.org/10.1675/063.032.0202>
- Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
- Barbier, E. B., Acreman, M., & Knowler, D. (1997). Valoración económica de los humedales. In *Communications*. <https://doi.org/2940073252>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Barría, C., Balasch, J. C., Brandts, I., Oliva, D., Iriarte, J. L., & Teles, M. (2025). Immunological responses, oxidative stress, and histopathological effects of nanoplastics on commercially relevant mussel species: A review. In *Journal of Hazardous Materials Advances* (Vol. 17). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100540>
- Barrientos, E. E., Carrasco Palma, D., Costa Muniz, M., Díaz-Jaramillo, M., González, M., Helguera Pedraza, Y., Lozoya Azcárate, J. P., ObandoMadera, P. S., Ontiveros Cuadras, J. F., Purca Cuicapusa, S., Ramírez Álvarez, N., Ríos Mendoza, L. M., Ruiz-Fernández, A. C., & Saldarriaga-Vélez, J. F. (2024). *Determinación de la abundancia de microplásticos en arenas de playa*. *Red de*

*Investigación de Estresores Marinos - Costeros en Latinoamérica y El Caribe - REMARCO.* <https://remarco.org/>

- Bellasi, A., Binda, G., Pozzi, A., Boldrocchi, G., & Bettinetti, R. (2021a). The extraction of microplastics from sediments: An overview of existing methods and the proposal of a new and green alternative. *Chemosphere*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130357>
- Brander, S. M., Renick, V. C., Foley, M. M., Steele, C., Woo, M., Lusher, A., Carr, S., Helm, P., Box, C., Cherniak, S., Andrews, R. C., & Rochman, C. M. (2020). Sampling and Quality Assurance and Quality Control: A Guide for Scientists Investigating the Occurrence of Microplastics Across Matrices. *Applied Spectroscopy*, 74(9), 1099–1125. <https://doi.org/10.1177/0003702820945713>
- Buschmann, A. H., Cabello, F., Young, K., Carvajal, J., Varela, D. A., & Henríquez, L. (2009). Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: Analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. *Ocean & Coastal Management*, 52(5), 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.03.002>
- Canto, A. (2017). *Estudio de la relación entre las aves migratorias neárticas Numenius phaeopus y Limosa haemastica con la comunidad bentónica de fondos blandos y los sedimentos distribuidos en el humedal de Chullec, Chiloé.*
- Chagnon, C., Thiel, M., Antunes, J., Ferreira, J. L., Sobral, P., & Ory, N. C. (2018). Plastic ingestion and trophic transfer between Easter Island flying fish (*Cheilopogon rapanouiensis*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) from Rapa Nui (Easter Island). *Environmental Pollution*, 243, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.042>
- Contreras, C. (2016). *Diseño de un plan de manejo integral de residuos sólidos generados por la industria de la mitilicultura en la Costa Este de la Isla de Quinchao, Chiloé.*
- Cortés Lehuei, V. (2022). *Operativos de limpieza en Curaco de Vélez logran recuperar más de 300 kilos de basura. Diario Sostenible.*

- [https://www.diariosostenible.cl/noticia/actualidad/2022/12/Operativos-de-Limpieza-En-Curaco-de-Velez-Logran-Recuperar-Mas-de-300-Kilos-de-Basura](https://www.diariosostenible.cl/noticia/actualidad/2022/12/operativos-de-limpieza-en-curaco-de-velez-logran-recuperar-mas-de-300-kilos-de-basura).
- Cowger, W., Markley, L. A. T., Moore, S., Gray, A. B., Upadhyay, K., & Koelmans, A. A. (2024). How many microplastics do you need to (sub)sample? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116243>
- Díaz, C. (2015). *ESTUDIO DE EMPLAZAMIENTO DE ÁREAS DE ACUICULTURA DE PEQUEÑA ESCALA EN LA ZONA SUR (VI A XIV REGIONES)*.
- Díaz-Jaramillo, M., Islas, M. S., & Gonzalez, M. (2021). Spatial distribution patterns and identification of microplastics on intertidal sediments from urban and semi-natural SW Atlantic estuaries. *Environmental Pollution*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116398>
- Dong, M., Zhang, Q., Xing, X., Chen, W., She, Z., & Luo, Z. (2020). Raman spectra and surface changes of microplastics weathered under natural environments. *Science of the Total Environment*, 739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139990>
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., & Tassin, B. (2018). Synthetic and non-synthetic anthropogenic fibers in a river under the impact of Paris Megacity: Sampling methodological aspects and flux estimations. *Science of the Total Environment*, 618, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.009>
- Duhart, P. (2000). *Geología de la Isla Grande de Chiloé, X Región de Los Lagos, Chile*.
- Edo, C., González-Pleiter, M., Tamayo-Belda, M., Ortega-Ojeda, F. E., Leganés, F., Fernández-Piñas, F., & Rosal, R. (2020). Microplastics in sediments of artificially recharged lagoons: Case study in a Biosphere Reserve. *Science of the Total Environment*, 729. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138824>
- FAO DOCUMENTO TÉCNICO DE PESCA Y ACUICULTURA *Clasificación y definición ilustrada de los artes de pesca*. (n.d.).
- Galgani, F., Brien, A. S., Weis, J., Ioakeimidis, C., Schuyler, Q., Makarenko, I., Griffiths, H., Bondareff, J., Vethaak, D., Deidun, A., Sobral, P., Topouzelis, K., Vlahos, P., Lana, F., Hasselov, M., Gerigny, O., Arsonina, B., Ambulkar, A., Azzaro, M., & Bebianno, M. J. (2021). Are litter, plastic and microplastic quantities increasing in the ocean? *Microplastics and Nanoplastics*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s43591-020-00002-8>

- Gallardo, C., Outeiro, L., Galilea, L., & Thiel, M. (2021). Temporal trends of anthropogenic marine debris on Chilean beaches: From 2008 to 2020. *Marine Pollution Bulletin*.
- Gonçalves, G. R. L., Koomson, A., Aggrey-Fynn, J., Nyarko, B. K., & Narayanaswamy, B. E. (2025). Invisible Peril: Assessing microplastic pollution in Ghanaian mangroves. *Marine Pollution Bulletin*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117361>
- Hermesen, E., Mintenig, S. M., Besseling, E., & Koelmans, A. A. (2018). Quality Criteria for the Analysis of Microplastic in Biota Samples: A Critical Review. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 52, Issue 18, pp. 10230–10240). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01611>
- Herrera, P., Canto, A., Núñez, F., Orellana, M., & Oliva, D. (2024). Seasonal changes in the structure of bird assemblages in tide-dominated marine coastal wetlands of Chiloe Archipelago (Chilean Northern Patagonia, South America). *Polar Biology*, 47(3), 193–207. <https://doi.org/10.1007/s00300-023-03220-x>
- Hinojosa, I. A., & Thiel, M. (2009). Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 58(3), 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.10.020>
- Japan ST Dyes, P. & S. Database. L. 1. 884 R. spectra of selected dyes, pigments, stains and indicators. (n.d.). *Japan ST Dyes, Pigments & Stains Database*. Japan ST Dyes, Pigments & Stains Database. L60015 1.884 Raman Spectra of Selected Dyes, Pigments, Stains and Indicators. <https://www.stjapan.de/Spectra-Databases/Raman-Spectra-Databases/>.
- Jorquera, A., Castillo, C., Murillo, V., Araya, J., Pinochet, J., Narváez, D., Pantoja-Gutiérrez, S., & Urbina, M. A. (2022). Physical and anthropogenic drivers shaping the spatial distribution of microplastics in the marine sediments of Chilean fjords. *Science of the Total Environment*, 814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152506>
- Larkin, P. J. (2011). *Infrared and Raman Spectroscopy: Principles and Spectral Interpretation*.
- Liu, D., Zheng, Y., Chen, L., & Wen, D. (2022). Prevalence of small-sized microplastics in coastal sediments detected by multipoint confocal micro-Raman spectrum scanning. *Science of the Total Environment*, 831. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154741>

- Lusher, Amy., Hollman, P. C. H. ., & Mendoza-Hill, Jeremy. (2017). *Microplastics in fisheries and aquaculture : status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Mahon, A. M., Officer, R. A., Nash, R., & O'connor, I. (2017). *Scope, Fate, Risks and Impacts of Microplastic Pollution in Irish Freshwater Systems*.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13353.60005>
- Majewsky, M., Bitter, H., Eiche, E., & Horn, H. (2016). Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC). *Science of the Total Environment*, 568, 507–511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.017>
- Meira, G., & Gugliotta, L. (2019). *Polímeros. Introducción a su caracterización y a la ingeniería de la polimerización. Capítulo 1*.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2018). *Plan Nacional de Humedales 2018-2022*. 33.
- Munno, K., De Frond, H., O'donnell, B., & Rochman, C. M. (2020). Increasing the Accessibility for Characterizing Microplastics: Introducing New Application-Based and Spectral Libraries of Plastic Particles (SLoPP and SLoPP-E). *Analytical Chemistry*, 92(3), 2443–2451.  
<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b03626>
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*.
- Ocean Conservacy. (2023). *INTERNATIONAL COASTAL CLEANUP*.  
[https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20241007/20241007163532/iccannualreport2024\\_digital.pdf](https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20241007/20241007163532/iccannualreport2024_digital.pdf)
- Paredes-Osses, E., Pozo, K., Opazo-Capurro, A., Bahamonde, P., & Cabrera-Pardo, J. R. (2021). Microplastics Pollution in Chile: Current Situation and Future Prospects. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 9). Frontiers Media S.A.  
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.796989>
- Peggie, D., & The National Gallery. (2007). *Infrared and Raman Users Group Spectral Database. Infrared and Raman Users Group*. Peggie, David, and The National Gallery, London. "INR00361, Baltic Amber." Ed. Beth A. Price, Boris Pretzel and Suzanne Quillen Lomax. Infrared and Raman Users Group Spectral Database. Infrared and Raman Users Group, 2007. Web.  
<[www.Irug.Org](http://www.Irug.Org)>.

- Perreard, S., Boucher, J., Gallato, M., Gomis, M. I., Mazzatorta, P., Gaboury, A., & Voirin, N. (2024). *Plastic over shoot day 2024*.
- Pozo, K., Gomez, V., Torres, M., Vera, L., Nuñez, D., Oyarzún, P., Mendoza, G., Clarke, B., Fossi, M. C., Bains, M., Příbylová, P., & Klánová, J. (2019). Presence and characterization of microplastics in fish of commercial importance from the Biobío region in central Chile. *Marine Pollution Bulletin*, *140*, 315–319. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.025>
- Price, B. A., Pretzel, B., & Quillen Lomax, S. (2009). *Infrared and Raman Users Group Spectral Database*. Price, Beth A., Boris Pretzel and Suzanne Quillen Lomax, Eds. Infrared and Raman Users Group Spectral Database. 2007 Ed. Vol. 1 & 2. Philadelphia: IRUG, 2009. Infrared and Raman Users Group Spectral Database. Web. 20 June 2014. <[www.Irug.Org](http://www.Irug.Org)>.
- Rojo-nieto, E. (2017). *Basuras marinas , plásticos y microplásticos orígenes , impactos y consecuencias* (Issue January).
- Sánchez, L. (2018). *Evaluación de la presencia de microplásticos en peces comerciales, agua y sedimento del estuario de Tecolutla, Veracruz*. Secretaría de la Convención sobre los Humedales. (2021). *PERSPECTIVA MUNDIAL SOBRE LOS HUMEDALES*.
- Su, X., Liu, M., Yuan, J., Huang, X., Lu, Z., Xu, J., & He, Y. (2023). Potential risk of co-occurrence of microplastics and chlorinated persistent organic pollutants to coastal wetlands: Evidence from a case study. *Environmental Pollution*, *320*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121087>
- SUBPESCA. (2024). *Informe sectorial de pesca y acuicultura, Subpesca 2024*.
- Suteja, Y., Purwiyanto, A. I. S., Purbonegoro, T., & Cordova, M. R. (2024). Spatial and temporal trends of microplastic contamination in surface sediment of Benoa Bay: An urban estuary in Bali-Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, *202*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116357>
- Thiel, M., Lorca, B. B., Bravo, L., Hinojosa, I. A., & Meneses, H. Z. (2021). Daily accumulation rates of marine litter on the shores of Rapa Nui (Easter Island) in the South Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, *169*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112535>
- Thiel, M., Luna-Jorquera, G., Álvarez-Varas, R., Gallardo, C., Hinojosa, I. A., Luna, N., Miranda-Urbina, D., Morales, N., Ory, N., Pacheco, A. S., Portflitt-Toro, M., & Zavalaga, C. (2018). Impacts of marine plastic pollution from continental coasts to subtropical gyres-fish, seabirds, and other vertebrates in the SE

- Pacific. In *Frontiers in Marine Science* (Vol. 5). Frontiers Media S.A.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00238>
- Thompson, R. C., Courtene-Jones, W., Boucher, J., Pahl, S., Raubenheimer, K., & Koelmans, A. A. (2024). Twenty years of microplastic pollution research-what have we learned? In *Science (New York, N.Y.)* (Vol. 386, Issue 6720, p. eadl2746). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). *Lost at Sea: Where Is All the Plastic?* [www.sciencemag.org/cgi/content/full/304/5672/838/](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/304/5672/838/)
- Urbina, M. A., Luna-Jorquera, G., Thiel, M., Acuña-Ruz, T., Amenábar Cristi, M. A., Andrade, C., Ahrendt, C., Castillo, C., Chevallier, A., Cornejo-D'Ottone, M., Correa-Araneda, F., Duarte, C., Fernández, C., Galbán-Malagón, C., Godoy, C., González-Aravena, M., Hinojosa, I. A., Jorquera, A., Kiessling, T., ... Vargas, E. (2021). A country's response to tackling plastic pollution in aquatic ecosystems: The Chilean way. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 31(2), 420–440. <https://doi.org/10.1002/aqc.3469>
- Vivanco, M. B. (2008). Descripción del sector mitilicultor en la región de Los Lagos, Chile: evolución y proyecciones. *Taller Técnico Regional de La FAO, 20-24 de Agosto de 2007, Puerto Montt, Chile*, 189–198.
- Wick, A. F., Daniels, W. L., Orndorff, Z. W., & Alley, M. M. (2013). Organic matter accumulation post-mineral sands mining. *Soil Use and Management*, 29(3), 354–364. <https://doi.org/10.1111/sum.12058>
- Wiesinger, H., Wang, Z., & Hellweg, S. (2021). Deep Dive into Plastic Monomers, Additives, and Processing Aids. *Environmental Science and Technology*, 55(13), 9339–9351. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00976>
- Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., & Wu, C. (2021). Microplastics in freshwater sediment: A review on methods, occurrence, and sources. *Science of the Total Environment*, 754, 141948.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141948>
- Zhou, Q., Tu, C., Fu, C., Li, Y., Zhang, H., Xiong, K., Zhao, X., Li, L., Waniek, J. J., & Luo, Y. (2020). Characteristics and distribution of microplastics in the coastal mangrove sediments of China. *Science of the Total Environment*, 703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134807>
- Zhou, Z., Zhang, P., Zhang, G., Wang, S., Cai, Y., & Wang, H. (2021). Vertical microplastic distribution in sediments of Fuhe River estuary to Baiyangdian

Wetland in Northern China. *Chemosphere*, 280.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130800>

Zuo, L., Sun, Y., Li, H., Hu, Y., Lin, L., Peng, J., & Xu, X. (2020). Microplastics in mangrove sediments of the Pearl River Estuary, South China: Correlation with halogenated flame retardants' levels. *Science of the Total Environment*, 725.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138344>