

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Identificación de microplásticos de la Cuenca del Lago de
Atitlán por medio de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de
Fourier con Reflexión Total Atenuada

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

María Fernanda Mollinedo Cordero

para optar por el grado académico de Licenciada en Química

Guatemala

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Identificación de microplásticos de la Cuenca del Lago de
Atitlán por medio de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de
Fourier con Reflexión Total Atenuada

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

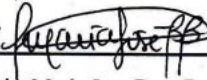
María Fernanda Mollinedo Cordero

para optar por el grado académico de Licenciada en Química

Guatemala

2024

Vo. Bo.:

(f) 
Lic. Maria Jose Bran Bonilla

Tribunal examinador:

(f) 
Lic. Maria Jose Bran Bonilla

(f) 
Ing. Ingrid Yurrita Pocasangre

(f) 
M.A. Irma Patricia Oyellana

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de junio de 2024

PREFACIO

Quiero empezar agradeciendo a Dios, por darme la oportunidad de estudiar una carrera que me apasiona y por guiarme en cada paso del camino.

Agradezco a mi padre, Haroldo Mollinedo, por proporcionarme lo necesario para estudiar, por su apoyo y su amor incondicional. Además, por ser un ejemplo de que el esfuerzo, la disciplina y el amor son esenciales para superar momentos difíciles.

A mi madre, María Cordero, por apoyarme, cuidarme y demostrarme su amor en cada año de mi carrera, especialmente en los momentos más desafiantes. Su apoyo y cuidado han sido pilares fundamentales en mi vida.

A mi hermana, María Mollinedo, por su apoyo, cuidado y consejos a lo largo de mi carrera, desempeñando con amor el rol de hermana mayor.

Agradezco a mi asesora, María José Bran, por su orientación y consejos durante el desarrollo de esta tesis y por ser una gran profesora.

A Moisés Ortiz, por el amor, paciencia, apoyo y compañía, que han sido fundamentales para seguir adelante.

Por último, me agradezco a mí misma por ser una mujer que persigue sus sueños, transformándolos en metas a través de la responsabilidad, compromiso y esfuerzo.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| PREFACIO | V |
| LISTA DE CUADROS..... | VII |
| LISTA DE FIGURAS..... | VIII |
| RESUMEN | XII |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. OBJETIVOS | 2 |
| III. JUSTIFICACIÓN | 3 |
| IV. MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| A. MICROPLÁSTICOS | 4 |
| B. CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS..... | 4 |
| C. CLASIFICACIÓN DE MICROPLÁSTICOS | 6 |
| D. IDENTIFICACIÓN DE MICROPLÁSTICOS CON FTIR..... | 11 |
| E. CUENCA DEL LAGO DE ATITLÁN | 12 |
| V. ANTECEDENTES | 14 |
| VI. MARCO CONTEXTUAL..... | 17 |
| VII. METODOLOGÍA | 18 |
| A. HIPÓTESIS | 18 |
| B. VARIABLES..... | 19 |
| C. ANÁLISIS EXPERIMENTAL | 20 |
| VIII. RESULTADOS..... | 23 |
| IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 30 |
| X. CONCLUSIONES | 34 |
| XI. RECOMENDACIONES..... | 35 |
| XII. BIBLIOGRAFÍA..... | 36 |
| XIII. ANEXOS..... | 40 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Variables para la identificación de los polímeros de los que se componen los microplásticos analizados. | 19 |
| Tabla 2. Distribución de frecuencias para la identificación de polímeros muestreados en el mes de septiembre de 2022. | 23 |
| Tabla 3. Distribución de frecuencias para la identificación de polímeros muestreados en el mes de noviembre de 2022. | 24 |
| Tabla 4. Distribución de frecuencias de la identificación de polímeros según su forma en septiembre de 2022. | 25 |
| Tabla 5. Distribución de frecuencias de la identificación de polímeros según su forma en noviembre de 2022. | 26 |
| Tabla 6. Identificación y clasificación del polímero por mes de recolección y matriz de las muestras de microplásticos. | 40 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Reacción de polimerización por adición para el polietileno | 6 |
| Figura 2. Reacción de polimerización por condensación de poliéster..... | 7 |
| Figura 3. Reacción de polimerización por apertura de anillo de la lactona..... | 7 |
| Figura 4. Configuración de la cadena del polipropileno..... | 8 |
| Figura 5. Estructura química del polipropileno | 9 |
| Figura 6. Estructura química del poliestireno..... | 9 |
| Figura 7. Estructura química del polimetacrilato de metilo..... | 10 |
| Figura 8. Estructura química del tereftalato de polietileno..... | 10 |
| Figura 9. Estructura química del policloruro de vinilo..... | 10 |
| Figura 10. Estructura química del nylon 6,6..... | 11 |
| Figura 11. Estructura química del rayón..... | 11 |
| Figura 12. Volcanes en la Cuenca del Lago de Atitlán | 13 |
| Figura 13. Puntos de muestreo en investigación por USAC, CEA y AMSCLAE | 16 |
| Figura 14. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados en las matrices muestreadas en septiembre de 2022. | 27 |
| Figura 15. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados de las matrices muestreadas en noviembre de 2022..... | 27 |
| Figura 16. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados en las matrices muestreadas en septiembre y noviembre de 2022. | 28 |
| Figura 17. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados para cada forma muestreadas en septiembre de 2022. | 28 |
| Figura 18. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados para cada forma muestreadas en noviembre de 2022..... | 29 |
| Figura 19. Espectro infrarrojo de fragmento azul S.1-01 de sedimentos. | 46 |
| Figura 20. Espectro infrarrojo de fragmento blanco S.1-02 de sedimentos. | 46 |
| Figura 21. Espectro infrarrojo de fragmento celeste S.1-03 de sedimentos. | 47 |
| Figura 22. Espectro infrarrojo de espuma blanca S.1-02 de sedimentos..... | 47 |
| Figura 23. Espectro infrarrojo de espuma café S.1-02 de sedimentos..... | 48 |
| Figura 24. Espectro infrarrojo de espuma café S.1-05 de sedimentos..... | 48 |
| Figura 25. Espectro infrarrojo de fibra amarilla S.1-05 de sedimentos..... | 49 |
| Figura 26. Espectro infrarrojo de fibra amarilla S.1-04 de sedimentos..... | 49 |
| Figura 27. Espectro infrarrojo de fibra morada S.1-03 de sedimentos..... | 50 |
| Figura 28. Espectro infrarrojo de fibra blanca S.1-01 de sedimentos. | 50 |
| Figura 29. Espectro infrarrojo de fibra morada S.1-01 de sedimentos..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 30. Espectro infrarrojo de film transparente S.1-05 de sedimentos. | 51 |
| Figura 31. Espectro infrarrojo de film café S.1-05 de sedimentos. | 52 |
| Figura 32. Espectro infrarrojo de film transparente S.1-04 de sedimentos. | 52 |
| Figura 33. Espectro infrarrojo de film transparente S.2-01 de sedimentos. | 53 |
| Figura 34. Espectro infrarrojo de film amarillo S.2-02 de sedimentos. | 53 |
| Figura 35. Espectro infrarrojo de film café S.2-02 de sedimentos. | 54 |
| Figura 36. Espectro infrarrojo de film transparente S.2-05 de sedimentos. | 54 |
| Figura 37. Espectro infrarrojo de film verde S.2-05 de sedimentos. | 55 |
| Figura 38. Espectro infrarrojo de fragmento rojo S.2-02 de sedimentos..... | 55 |
| Figura 39. Espectro infrarrojo de fragmento anaranjado S.2-03 de sedimentos..... | 56 |
| Figura 40. Espectro infrarrojo de fragmento celeste S.2-01 de sedimentos. | 56 |
| Figura 41. Espectro infrarrojo de fragmento azul S.2-05 de sedimentos. | 57 |
| Figura 42. Espectro infrarrojo de espuma amarilla S.2-02 de sedimentos. | 57 |
| Figura 43. Espectro infrarrojo de espuma amarilla S.2-03 de sedimentos. | 58 |
| Figura 44. Espectro infrarrojo de espuma blanca S.2-04 de sedimentos..... | 58 |
| Figura 45. Espectro infrarrojo de espuma blanca S.2-04 de sedimentos..... | 59 |
| Figura 46. Espectro infrarrojo de fibra amarilla S.2-01 de sedimentos..... | 59 |
| Figura 47. Espectro infrarrojo de fibra blanca S.2-01 de sedimentos. | 60 |
| Figura 48. Espectro infrarrojo de fibra celeste S.2-01 de sedimentos. | 60 |
| Figura 49. Espectro infrarrojo de fibra transparente S.2-02 de sedimentos. | 61 |
| Figura 50. Espectro infrarrojo de fibra negra S.2-02 de sedimentos. | 61 |
| Figura 51. Espectro infrarrojo de fibra morada S.2-04 de sedimentos..... | 62 |
| Figura 52. Espectro infrarrojo de fibra verde S.2-04 de sedimentos. | 62 |
| Figura 53. Espectro infrarrojo de fibra A.1-06 de ríos. | 63 |
| Figura 54. Espectro infrarrojo de fibra 2 A.1-06 de ríos. | 63 |
| Figura 55. Espectro infrarrojo de fibra A.1-07 de ríos. | 64 |
| Figura 56. Espectro infrarrojo de fibra 2 A.1-07 de ríos. | 64 |
| Figura 57. Espectro infrarrojo de film A.1-06 de ríos. | 65 |
| Figura 58. Espectro infrarrojo de film A.1-07 de ríos. | 65 |
| Figura 59. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-06 de ríos. | 66 |
| Figura 60. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-07 de ríos. | 66 |
| Figura 61. Espectro infrarrojo de fragmento 2 A.1-07 de ríos. | 67 |
| Figura 62. Espectro infrarrojo de fibra azul A.2-06 de ríos..... | 67 |
| Figura 63. Espectro infrarrojo de fibra roja A.2-07 de ríos. | 68 |
| Figura 64. Espectro infrarrojo de fragmento verde A.2-06 de ríos. | 68 |
| Figura 65. Espectro infrarrojo de fragmento celeste A.2-06 de ríos. | 69 |
| Figura 66. Espectro infrarrojo de fragmento azul A.2-06 de ríos..... | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 67. Espectro infrarrojo de fragmento transparente A.2-07 de ríos..... | 70 |
| Figura 68. Espectro infrarrojo de film A.1-01 de agua superficial..... | 70 |
| Figura 69. Espectro infrarrojo de film A.1-02 de agua superficial..... | 71 |
| Figura 70. Espectro infrarrojo de film A.1-04 de agua superficial..... | 71 |
| Figura 71. Espectro infrarrojo de espuma A.1-01 de agua superficial. | 72 |
| Figura 72. Espectro infrarrojo de espuma A.1-02 de agua superficial. | 72 |
| Figura 73. Espectro infrarrojo de espuma 2 A.1-02 de agua superficial. | 73 |
| Figura 74. Espectro infrarrojo de espuma A.1-04 de agua superficial. | 73 |
| Figura 75. Espectro infrarrojo de espuma 2 A.1-04 de agua superficial. | 74 |
| Figura 76. Espectro infrarrojo de fibra A.1-02 de agua superficial..... | 74 |
| Figura 77. Espectro infrarrojo de fibra A.1-03 de agua superficial..... | 75 |
| Figura 78. Espectro infrarrojo de fibra 2 A.1-03 de agua superficial..... | 75 |
| Figura 79. Espectro infrarrojo de fibra A.1-04 de agua superficial..... | 76 |
| Figura 80. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-01 de agua superficial..... | 76 |
| Figura 81. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-02 de agua superficial..... | 77 |
| Figura 82. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-04 de agua superficial..... | 77 |
| Figura 83. Espectro infrarrojo de fragmento 2 A.1-04 de agua superficial..... | 78 |
| Figura 84. Espectro infrarrojo de microesfera A.1-01 de agua superficial..... | 78 |
| Figura 85. Espectro infrarrojo de microesfera A.1-04 de agua superficial. | 79 |
| Figura 86. Espectro infrarrojo de espuma café A.2-04 de agua superficial. | 79 |
| Figura 87. Espectro infrarrojo de espuma blanca A.2-04 de agua superficial..... | 80 |
| Figura 88. Espectro infrarrojo de fibra azul A.2-01 de agua superficial. | 80 |
| Figura 89. Espectro infrarrojo de fibra azul A.2-02 de agua superficial. | 81 |
| Figura 90. Espectro infrarrojo de fibra rosada A.2-05 de agua superficial. | 81 |
| Figura 91. Espectro infrarrojo de fibra negra A.2-03 de agua superficial..... | 82 |
| Figura 92. Espectro infrarrojo de fragmento negro A.2-01 de agua superficial..... | 82 |
| Figura 93. Espectro infrarrojo de fragmento verde A.2-02 de agua superficial..... | 83 |
| Figura 94. Espectro infrarrojo de fragmento transparente A.2-02 de agua superficial. | 83 |
| Figura 95. Espectro infrarrojo de fragmento azul A.2-02 de agua superficial. | 84 |
| Figura 96. Espectro infrarrojo de fragmento azul A.2-03 de agua superficial. | 84 |
| Figura 97. Espectro infrarrojo de fragmento transparente A.2-04 de agua superficial. | 85 |
| Figura 98. Espectro infrarrojo de fragmento rosado A.2-04 de agua superficial. | 85 |
| Figura 99. Espectro infrarrojo de fragmento amarillo A.2-04 de agua superficial..... | 86 |
| Figura 100. Espectro infrarrojo de fragmento blanco A.2-05 de agua superficial. | 86 |
| Figura 101. Espectro infrarrojo de fragmento azul A.2-05 de agua superficial. | 87 |
| Figura 102. Espectro infrarrojo de microesfera transparente A.2-04 de agua superficial..... | 87 |
| Figura 103. Espectro infrarrojo de microesfera blanca A.2-04 de agua superficial..... | 88 |

| | |
|---|----|
| Figura 104. Espectro infrarrojo de microesfera negra A.2-04 de agua superficial..... | 88 |
| Figura 105. Espectro infrarrojo de microesfera transparente A.2-05 de agua superficial..... | 89 |
| Figura 106. Visualización de los tipos de microplástico analizados. | 89 |
| Figura 107. Comparación visual de los diferentes tipos de microplástico. | 90 |
| Figura 108. Frascos con muestras de microplásticos..... | 90 |

RESUMEN

La espectroscopía infrarroja con el accesorio de reflexión total atenuada (ATR) es una técnica muy utilizada para el análisis de microplásticos, ya que permite la identificación del tipo de polímero del que se compone. Debido a esto, se utilizó la técnica de FTIR-ATR para determinar los polímeros a los que pertenecen los microplásticos en forma de espuma, fibra, film, fragmento y microesfera recuperados en el mes de septiembre y noviembre del año 2022 en muestras de sedimentos, agua superficial y ríos de la cuenca del Lago de Atitlán, así como, determinar el tipo de polímero predominante en las diferentes formas mencionadas de cada matriz y determinar si la proporción de polímeros encontrados en los diferentes meses de recolección son iguales. Para esto se utilizó el espectrómetro de un solo rango Frontier IR con un accesorio universal ATR. Las mediciones se hicieron en el rango de 4000 a 380 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} . Los resultados mostraron que el polímero que tiene mayor frecuencia, tanto en el mes de septiembre como en el mes de noviembre, es el polipropileno isotáctico y se presentaba con mayor abundancia en la forma de fibras y fragmentos. Esta frecuencia significativa se puede atribuir a la alta resistencia y rigidez que le brinda la estructura isotáctica que evitan su rápida degradación. Además, se observó una mayor frecuencia de microplásticos en noviembre, lo cual puede relacionarse con las condiciones climáticas que afectan en la actividad hidrológica de la Cuenca del Lago de Atitlán, afectando el transporte y deposición de microplásticos. Debido a esto, se recomienda implementar estrategias de gestión de desechos efectivas, campañas de concientización y la regulación en algunas actividades humanas con el fin de reducir la liberación de microplásticos en las fuentes de agua de la Cuenca del Lago de Atitlán.

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito medioambiental, los microplásticos han emergido como una preocupación de salud, ya que su presencia en cuerpos de agua puede afectar negativamente el ecosistema acuático y la salud de las personas que dependen de estas fuentes de agua. Estos se producen como resultado de la degradación de plásticos e incluso se producen directamente en diferentes industrias, como en la cosmética, lo cual puede influir negativamente en la salud por la acumulación de los mismo en el organismo. Asimismo, la composición química del polímero puede variar, incluyendo materiales como el polipropileno, poliestireno, polietileno, polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad, polimetacrilato de metilo, tereftalato de polietileno, policloruro de vinilo, nylon, celulosa, entre otros (Velandia, 2017; Lenaker, Corsi y Mason, 2020).

Debido a su amplia variedad, es importante identificar el polímero que constituyen los microplásticos. De esta manera se pueden conocer sus efectos en la salud y su posible causa de acumulación en los sistemas acuáticos. Este trabajo se enfoca en analizar los microplásticos, con tamaños de 1 mm a 5 mm, recuperados de la Cuenca del Lago de Atitlán con el equipo de FTIR-ATR, con el fin de determinar los polímeros principales que componen los microplásticos en sus diferentes formas (fibra, film, fragmento, espuma y microesfera). Además, se busca clasificar los polímeros según su predominancia en las muestras analizadas. Por último, determinar si la proporción de polímeros encontrados en los diferentes meses de recolección es igual. Este estudio permitirá tener una mayor comprensión sobre la problemática de microplásticos en la Cuenca del Lago de Atitlán y proporcionará información relevante para futuras decisiones de conservación medioambiental y gestión de residuos.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Determinar los polímeros de los que se componen los microplásticos en forma de espuma, fibra, film, fragmento y microesfera recuperados en el mes de septiembre y noviembre del año 2022 en muestras de sedimentos, agua superficial y ríos de la Cuenca del Lago de Atitlán.

B. Objetivos específicos

1. Determinar el tipo de polímero predominante en las formas de microplásticos de cada matriz de la Cuenca del Lago de Atitlán en los diferentes meses de recolección.
2. Determinar si la proporción de polímeros encontrados en los diferentes meses de recolección son iguales.

III. JUSTIFICACIÓN

La acumulación de microplásticos en aguas representa una preocupación ambiental creciente en los últimos años, debido a que los plásticos se han detectado en aguas superficiales de todo el mundo, probablemente siendo la forma más abundante de basura marina (Yonkos, et al., 2014). Esto está relacionado con la utilización de plásticos de un solo uso y productos desechables que son difíciles de reciclar y muestran una baja capacidad de degradación. De igual forma, se relaciona con el mal manejo de desechos o bien, por la fabricación directa de los microplásticos en procesos industriales. Estos residuos de microplásticos se someten a procesos de erosión física y química en ambientes acuáticos, presentando un potencial efecto tóxico sobre los organismos vivos. La magnitud y naturaleza de esta toxicidad varía según el tipo de microplástico, por lo cual, es importante determinar el tipo de polímero que los constituye. Esto, a su vez, es importante para una mejora en la gestión y control de sus efectos químicos y toxicológicos en la flora y fauna de las fuentes de agua (Pastor y Agulló, 2019).

Se pretende abordar este problema medioambiental y analizar microplásticos de la Cuenca del Lago de Atitlán, con el fin de identificarlos y comparar su acumulación en dos diferentes épocas de recolección de las muestras de microplásticos. De esta manera, el trabajo podrá establecer las bases para futuros controles, como al desarrollo de estrategias de conservación del Lago de Atitlán y gestión de recursos en la región.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Microplásticos

Los microplásticos son un problema emergente de la contaminación. Son partículas de tamaño de 0.3 mm a 5.0 mm que provienen de la degradación de plástico y se encuentran en diversos colores, tamaños y composición química, además, su distribución geográfica, temporal y espacial puede variar. Los microplásticos pueden presentarse en forma de fibra, fragmento, espuma, microesfera o film y pueden partir de fuentes primarias y secundarias. (Yonkos, et al., 2014; Rosas, Gonzáles y Pollet. 2022).

Las fuentes primarias para la formación de microplásticos se basa en la producción directa, principalmente en forma de microesfera, con el fin de ser utilizado en la industria cosmética y de cuidado personal o bien, como materia prima en producción de plásticos, como la granza para la producción de artículos moldeados. Mientras que, las fuentes secundarias se producen por una mala gestión de residuos plásticos o fibras de mayor tamaño que sufren una degradación química o física, como, por ejemplo, el lavado de ropa sintética (Pastor y Agulló, 2019).

Los microplásticos pueden introducirse en los sistemas marinos debido a factores como: núcleos de población adyacente, desembocaduras de ríos, corrientes oceánicas dominantes y fenómenos meteorológicos. Una vez en los ecosistemas acuáticos, estos funcionan como sustratos para la sorción de diversos contaminantes, incluidos los contaminantes orgánicos persistentes (COPs), como PCB y PBDE, o metales como el plomo y cobre. De igual forma, los plásticos pueden acumular organismos y funcionar para transportar especies invasoras o pueden ser ingeridos por seres vivos. Esto último puede causar la liberación de químicos que componen los plásticos o de contaminantes absorbidos dentro del organismo del ser vivo y acumularse a lo largo de la cadena alimentaria (Yonkos, et al., 2014).

B. Contaminación por microplásticos

Los polímeros comerciales en su mayoría son sintéticos, debido a que estos tienen una mayor rentabilidad y facilidad de producción. Sin embargo, son una parte significativa del problema de la contaminación. Según Seymour y Carraher (2021) la industria del polímero sintético en Estados Unidos experimenta el crecimiento más acelerado, ya que produce 20 millones de toneladas al año. Debido a esto, hay una alta acumulación de polímeros, que se descomponen en microplásticos alrededor del mundo.

La contaminación por microplásticos es un problema que afecta las aguas a nivel mundial, ya que los plásticos son la basura que predomina en los océanos. Según Guasti (2022) de ocho millones de toneladas de residuos sólidos que se vierten en el océano cada año, 90% son plásticos. De esta forma, los residuos plásticos llegan a los ecosistemas, afectando la flora y fauna acuática.

Los microplásticos, además de ser bioacumulativos, presentan efectos tóxicos que se producen al absorber sustancias y toxinas durante su manufactura o depósito en las aguas, como, por ejemplo, la acumulación de insecticidas, herbicidas y fertilizantes. Además, pueden actuar como vehículos de especies invasoras y adsorber en su superficie contaminantes como BPCs (bifenilos policlorados), HAPs (hidrocarburos aromáticos policíclicos) o DDT (dicloro difenil tricloroetano) o incluso, pueden incorporar compuestos químicos como plastificantes, aditivos o metales pesados a la fauna acuática. Entre los efectos tóxicos que estos pueden producir se encuentra el aumento en los indicadores de estrés oxidativo, alteraciones en la transcripción y expresión de genes que conducen a un daño genético, alteraciones por disrupción endócrina e incluso bajas tasas de fecundidad (Pastor y Agulló, 2019; Guasti, 2022).

De igual forma, según estudios realizados por Zarus, et al. (2021) los humanos podemos sufrir daños en la salud al consumir microplástico, como el aumentar la probabilidad de desarrollar cáncer colorrectal y hepático. Debido a estas preocupaciones crecientes, se han tomado medidas para reducir los desechos de plásticos, sin embargo, los métodos son inadecuados o no son aplicados en los sistemas de recolección, reciclado y disposición de residuos urbanos e industriales, pues de los 300 millones de toneladas producidas de plástico, menos del 30% es reciclado, por lo que seguirá siendo la principal basura de los océanos. El 35% de microplásticos proviene de la industria textil, 30% de las llantas de los autos, 25% del polvo de ciudades y 5% de señales de tránsito, pinturas, productos de limpieza e higiene personal (Aranda, 2022).

En los cuerpos de agua, una de las principales fuentes de microplásticos son las aguas residuales de plantas industriales, debido a que estos no son removidos en su totalidad por su tamaño milimétrico y, son liberados a los ríos, lagos y océanos como parte de los efluentes. También puede deberse a la escorrentía de zonas urbanas, rellenos sanitarios y áreas industriales o al viento que mueve y mezcla las partículas de plástico livianas dentro de los cuerpos de agua (Sarria y Gallo, 2016).

Asimismo, las fuentes de contaminación en el agua dulce incluyen principalmente desechos de plástico que son vertidos directamente, desechos industriales y aguas residuales, pesca, ropa sintética y materiales de embalaje, como envoltorios o espuma de empaque protectora (Othman, et al. 2023).

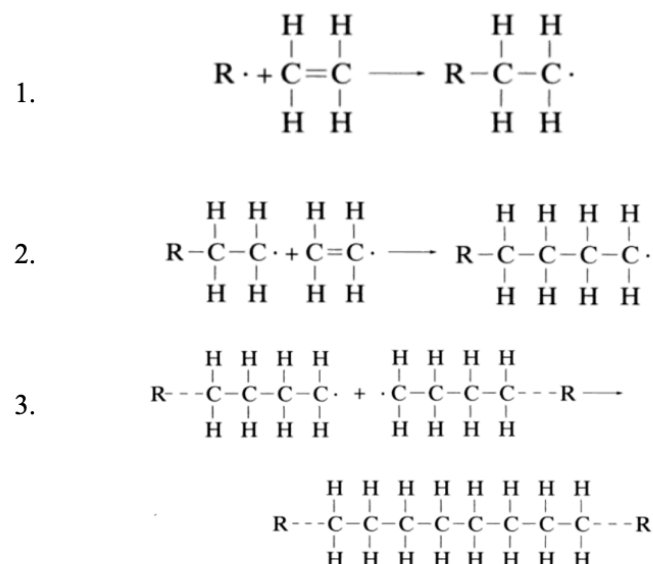
C. Clasificación de microplásticos

Los productos de plástico se fabrican de diferentes materiales poliméricos, por lo que cada uno tiene una densidad específica, dependiendo del tipo de polímero. Debido a esto, se encuentran microplásticos a diferentes niveles de profundidad en las fuentes de agua, ya sea en el fondo o a niveles menores, hasta encontrarlos a flote en la superficie (Aranda, 2022).

Los polímeros son moléculas de gran tamaño que se componen de moléculas más pequeñas, las cuales se llaman monómeros y se unen mediante el proceso de polimerización. La longitud de la cadena del polímero viene dada por el número de unidades monoméricas que se repiten en la cadena y se le llama el grado de polimerización. El proceso de polimerización se puede clasificar de manera general como polimerización de condensación, adición y por apertura de anillos.

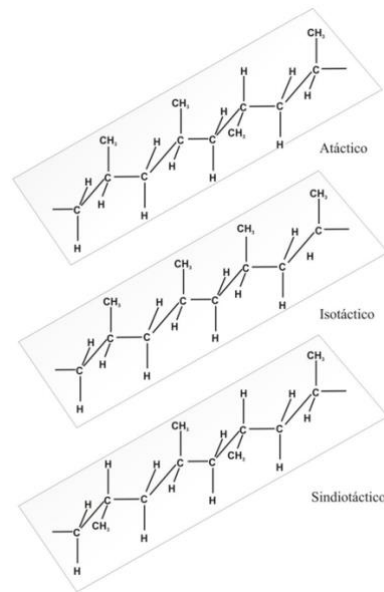
En la formación del polímero, la condensación tiene lugar entre dos moléculas polifuncionales que reaccionan entre sí para producir una molécula polifuncional mayor, con la eliminación de agua o alcohol. Mientras que la adición implica reacciones de cadena en las que se distingue la etapa de iniciación, propagación y terminación, donde el portador de la cadena puede ser un ion o un radical libre. La mayor parte de los polímeros formados por adición poseen uniones covalentes de átomos de carbono en la cadena principal, sin embargo, algunos polímeros poseen uniones de heteroátomos en la cadena (Velandia, 2017; Billmeyer, 2020).

Figura 1. Reacción de polimerización por adición para el polietileno



(Callister, 1996).

Figura 4. Configuración de la cadena del polipropileno.



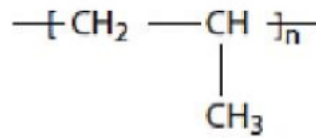
(Beltrán y Marcilla, 2011).

La Figura 4 muestra las configuraciones: atáctico, isotáctico y sindiotáctico para la cadena del polipropileno.

Los polímeros pueden ser comercializados en una variedad de formas, tales como fibras o plásticos. Las fibras son materiales que forman filamentos largos y delgados, por lo que tienen principal aplicación en la industria textil, mientras que, el plástico puede ser moldeado a presión para crear diferentes objetos o, pueden ser usados como pinturas o recubrimientos. Las partículas de microplásticos pueden identificarse en diferentes polímeros, tales como polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno (PE), polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polimetacrilato de metilo (PMMA), tereftalato de polietileno (PET), policloruro de vinilo (PVC), nylon, rayón, entre otros. (Velandia, 2017; Lenaker, Corsi y Mason, 2020).

El polipropileno (PP), $-(CH(CH_3)-CH_2)_n-$, se obtiene de la polimerización del propileno. Por su estructura, es un polímero vinílico en el cual uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido otro grupo metilo. Se utiliza para la producción o construcción de piezas que necesitan resistencia química, peso ligero y fricción suave, debido a que es un plástico que se puede hacer por el proceso de termoformado. Además, es utilizado para empaquetado de alimentos, textiles, platos, pajillas o en procesos industriales, como para conducciones de agua potable o aguas residuales (Amaya, Facundo y Sánchez, 2018).

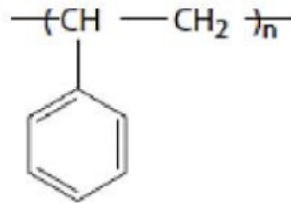
Figura 5. Estructura química del polipropileno



(Newell, 2010).

El poliestireno (PS), $-(\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-\text{CH}_2)_n-$, es obtenido a partir del estireno. Es un termoplástico que se utiliza principalmente para la fabricación de cajas, recipientes, envases o aislantes térmicos. Por otro lado, el polietileno (PE), es un polímero de cadena repetitiva de etileno, $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$, se compone de átomos de carbono e hidrógeno y posee propiedades resistentes al impacto, abrasión y es químicamente inerte (Atkins y Jones, 2006; Cardona, Lavernia, Alcerro, 2010).

Figura 6. Estructura química del poliestireno

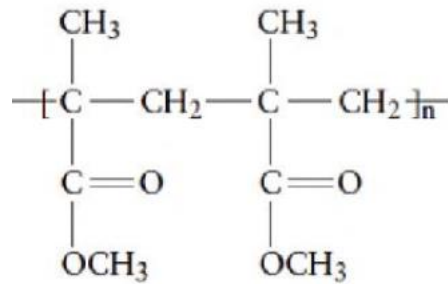


(Newell, 2010).

El polietileno de baja densidad (LDPE) es un polímero ramificado que se deriva del petróleo. Tiene propiedades que le dan resistencia química y baja permeabilidad al vapor de agua. Se utiliza principalmente en bolsas de basura. Mientras que, el polietileno de alta densidad (HDPE) es un polímero lineal con una cristalinidad relativamente alta en comparación al polietileno de baja densidad. Se utiliza principalmente en embalajes y contenedores (Coreño y Méndez, 2010; Ararat y Murillo, 2016).

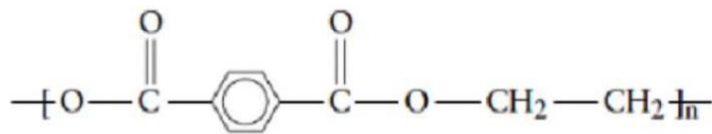
El polimetacrilato de metilo (PMMA) es un polímero versátil que se obtiene a partir del metacrilato de metilo como monómero por medio de polimerización radical. Se utiliza en juguetes, empaques, recubiertos, pinturas e incluso en la industria médica como suturas, prótesis o adhesivos dentales. Por otro lado, el tereftalato de polietileno (PET) se elabora mediante la esterificación directa del ácido tereftálico o a partir de la transesterificación del dimetil tereftalato. Tiene propiedades de dureza y resistencia al impacto, por lo que es muy utilizado en empaques de alimentos y bebidas, fibra textil y frascos para medicamentos (Romero, 2005; Gonzáles, et al. 2021).

Figura 7. Estructura química del polimetacrilato de metilo



(Newell, 2010).

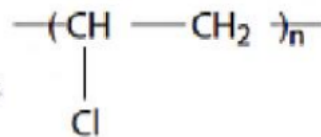
Figura 8. Estructura química del tereftalato de polietileno



(Newell, 2010).

El policloruro de vinilo (PVC), $-(\text{CHCl}-\text{CH}_2)_n-$, pertenece al grupo de resinas vinílicas y se obtiene por polimerización de moléculas de cloruro de vinilo, resultantes de la reacción del ácido clorhídrico sobre acetileno en presencia de un catalizador. Es similar al polietileno, pero con un átomo de cloro en vez de un átomo de hidrógeno. Principalmente son utilizados para tuberías y revestimientos de cables, sin embargo, ha surgido una preocupación al uso del PVC debido a su contaminación por dioxinas cloradas que se forman por la combustión (Gomella y Guerrée, 1973; Atkins y Jones, 2006).

Figura 9. Estructura química del policloruro de vinilo

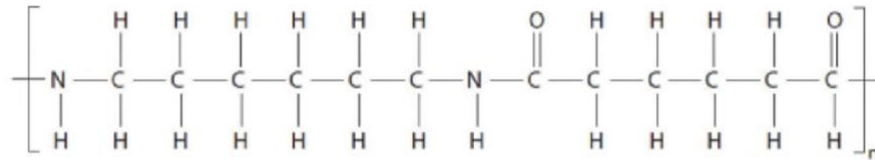


(Newell, 2010).

Las fibras de nylon son poliamidas que se separan mediante la reacción entre diácidos y diaminas. Se pueden identificar especificando el número de átomos de carbono de los monómeros de los que proviene el nylon. La poliamida más común es el nylon 6, que puede encontrarse en variantes como 6,6 y 6,5 y 6,9. En el nylon 6,6 se presentan grupos de amida polares en el esqueleto que facilitan la interacción de cadenas adyacentes que experimentan enlace de hidrógeno. El nylon se utiliza principalmente en la industria textil para la fabricación de fibras flexibles o cuerdas para la industria

marina, en la industria doméstica para la fabricación de las cedras de los cepillos o también como componentes de automóviles, como los cables internos (Carrasquero, 2004; Newell, 2010).

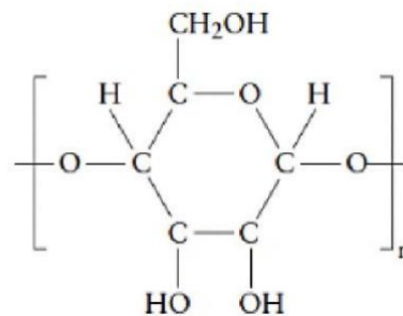
Figura 10. Estructura química del nylon 6,6



(Newell, 2010).

Por otro lado, el rayón es una fibra sintética que se produce a partir de la celulosa de la madera o el algodón que se trata con alquilo y luego es hilada. Es utilizada comúnmente para fabricación de ropa, sábanas y muebles. Sin embargo, estos son solo ejemplos de algunas de las variedades de los polímeros que se utilizan en diferentes aplicaciones industriales y comerciales.

Figura 11. Estructura química del rayón



(Newell, 2010).

D. Identificación de microplásticos con FTIR

La espectroscopía infrarroja es una de las técnicas más utilizadas para la identificación de microplásticos. Sin embargo, también se emplean otras técnicas, como pirólisis secuencial acoplada a cromatografía de gases, la espectrometría de masas y la espectroscopía Raman. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier es la más comúnmente utilizada debido a su eficacia y facilidad para identificar microplásticos en el medio ambiente de una manera rápida y sencilla. Esta técnica también es utilizada para identificar polímeros de sedimentos o aguas. Además, FTIR presenta diferentes accesorios especializados para disponer la muestra, como el de reflexión total atenuada (ATR), el que se utiliza para identificar polímeros. Con el ATR el haz de infrarrojo es reflejado

internamente por medio de espejos e incide sobre el cristal que está en contacto con la muestra (Tagg, et al., 2015; Velandia, 2017).

Una ventaja notable de la técnica ATR-FTIR es su carácter no destructivo, además de que se han establecido diferentes tipos de plástico según los espectros obtenidos. Su principio de funcionamiento se basa en un haz de luz infrarroja que incide sobre el material y provoca vibraciones en los átomos de la molécula. Esto permite obtener información sobre el material de la muestra a partir de un único espectro. Además, es una técnica adecuada para analizar partículas inferiores a 5 mm (Othman, et al. 2023).

Las vibraciones provocadas son específicas de enlaces químicos y ocurren a frecuencias particulares, dependiendo de la energía potencial, geometría y masa de la molécula. Sin embargo, las vibraciones pueden ser características para muchos grupos funcionales, por lo que se emplean los espectros como conjunto para identificar a las moléculas mediante la transformada de Fourier (Velandia, 2017; Othman, et al. 2023).

E. Cuenca del Lago de Atitlán

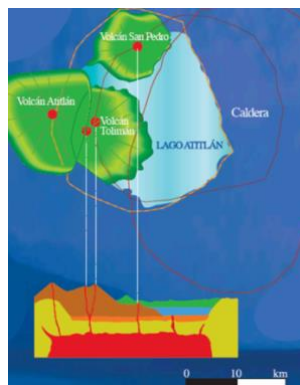
El Lago de Atitlán, ubicado en Sololá, Guatemala, es considerado uno de los lagos más hermosos del mundo. Este tiene una superficie de 125.7 km² y una profundidad máxima de 350 m, siendo el segundo cuerpo de agua más grande en Guatemala, después del Lago de Izabal, con una superficie de 590 km² (Herrera, 2019).

La cuenca del Lago de Atitlán se ubica en los departamentos de Chimaltenango, Quiché, Suchitepéquez y Totonicapán, aunque la mayor parte de su superficie se ubica en Sololá. Su superficie abarca 528.21 km² y cuenta con una densidad poblacional de 595 personas/km², equivalente a 45 personas por kilómetro cuadrado Guatemala (Sánchez y Propin, 2017). Según Herrera (2019), esta densidad es considerada la máxima admisible en términos de recursos naturales disponibles.

El Lago de Atitlán es el sitio turístico más visitado en el departamento de Sololá, ya que es un paisaje único delimitado al suroeste por tres volcanes que tienen una latitud superior a tres mil metros, el Atitlán, Tolimán y San Pedro (Figura 12). Asimismo, se pueden realizar diversas actividades en el agua, como el remo, buceo, natación, etc. De igual forma, los habitantes se benefician del Lago de Atitlán utilizándolo como suministro de agua, obtención de alimentos, transporte o recreación. Debido a esto, el recurso hídrico es de vital importancia, principalmente para la economía del turismo en Guatemala (De Paz, 2014; Sánchez y Propin, 2017).

El clima en Atitlán suele ser templado, con variaciones que dependen de la época del año. En Atitlán, Sololá en el mes de septiembre es fresco, con temperaturas máximas alrededor de 21 grados Celsius, el porcentaje de tiempo en el que se encuentra nublado el cielo es alrededor de 93% y el promedio de lluvia es constante, con un aproximado de 244 milímetros. Por otro lado, el mes de noviembre las temperaturas máximas son alrededor de 20 grados Celsius, el porcentaje de tiempo en el que se encuentra nublado el cielo disminuye rápidamente comenzando con 70% al 46% y el promedio de lluvia, de igual manera, disminuye rápidamente, comenzando con 100 milímetros y terminando con 23 milímetros (Weather Spark, 2023).

Figura 12. Volcanes en la Cuenca del Lago de Atitlán



(Reserva Natural Atitlán, 2024).

El Lago de Atitlán presenta varias cuencas hidrográficas, sin embargo, las principales son la cuenca del río Quiscab al noroeste y la cuenca del río Panajachel al suroeste. Desde estas cuencas hidrográficas fluye el agua de lluvia o de estos ríos hacia el Lago. Además, el agua del lago proviene de algunos nacimientos y de la precipitación que cae en la Cuenca del Lago de Atitlán. Además, también recibe una descarga de aguas residuales de 38,292.64 m³/día, las cuales provienen de 13 municipios que suman 217,144 habitantes (Castañeda, et al. 2009; Herrera, 2019).

La Cuenca del Lago de Atitlán sufre de un grave deterioro por diversas actividades, como el verter agua residual y desechos, introducción de especies, extracción de vegetación, pesca e incluso las actividades turísticas. Debido al interés del manejo sustentable de la cuenca se creó AMSCLAE en 1996 bajo el Decreto Legislativo 133-96 del Congreso de la República de Guatemala, con el fin de planificar, coordinar y ejecutar medidas y acciones del sector público y privado para conservar la Cuenca del Lago de Atitlán. Esta institución gubernamental ha llevado a cabo investigaciones que tienen el objetivo de sustentar sus decisiones sobre datos sólidos para monitorear los recursos de la cuenca (AMSCLAE, 2024).

V. ANTECEDENTES

El estudio de los microplásticos ha experimentado un notable aumento de interés a nivel global, especialmente en las fuentes de agua. Se han llevado a cabo diversas investigaciones en países alrededor del mundo, como Estados Unidos, Canadá, China, Inglaterra y Guatemala, con el propósito de comprender y abordar esta problemática medioambiental.

En Canadá, Hendrickson, Minor y Schreiner (2018) realizaron un estudio de la magnitud, distribución y características comunes de los polímeros de microplásticos en aguas superficiales del lago occidental. En la cuenca del lago hay una baja población humana, sin embargo, se identificaron partículas de microplásticos en las aguas superficiales que, según los investigadores, fueron comparables a los valores promedio de estudios realizados en el lago Michigan, el Océano Atlántico Norte, Océano Sur y Océano Pacífico. En esta investigación se utilizó espectroscopia FTIR para identificar los microplásticos. Las fibras fueron las más frecuentes observadas, además, el polímero más común en las identificaciones fue el polietileno.

Por otro lado, Lenaker, Corsi y Mason (2020) investigaron la distribución espacial, concentración, tamaño de partículas y la composición polimérica de los microplásticos en los sedimentos del lago Michigan y el lago Erie. Al hacer el análisis por FTIR se observó que, la mayoría de los polímeros en las muestras del lago Michigan fueron polietileno de tereftalato, polietileno de alta densidad y celulosa semisintética, mientras que en las muestras del lago Erie fueron celulosa semisintética, polipropileno y policloruro de vinilo.

En China se realizó un estudio de las sales marinas. En la investigación realizada por Yang, Shi, Li, Li, Jabeen y Kolandhasamy (2015) se determinó que, las partículas predominantes en sales marinas son los fragmentos y fibras, además, los más comunes fueron el polietileno, tereftalato, polietileno y celofán. En esta investigación se logró determinar que los productos provenientes del mar, como las sales marinas, se encuentran contaminadas por microplásticos.

En Estados Unidos, Yonkos, et al. (2014) realizaron un estudio para evaluar la concentración de microplásticos en cuatro efluentes dentro de la Bahía de Chesapeake. Se obtuvo una correlación positiva, estadísticamente significativa con la densidad de población y proporción de desarrollo urbano/suburbano dentro de las cuencas, lo cual indica que, la concentración de microplásticos es mayor en las proximidades de las fuentes urbanas.

En Guatemala también se han realizado investigaciones en algunas fuentes de agua, tales como el Lago de Amatitlán y el Lago de Atitlán. Olivia (2021) llevó a cabo una investigación en el Lago de Amatitlán, con el fin de determinar la contaminación por microplásticos en muestras de peces y la calidad del agua. Se encontraron microplásticos en el tracto digestivo de los peces muestreados, siendo

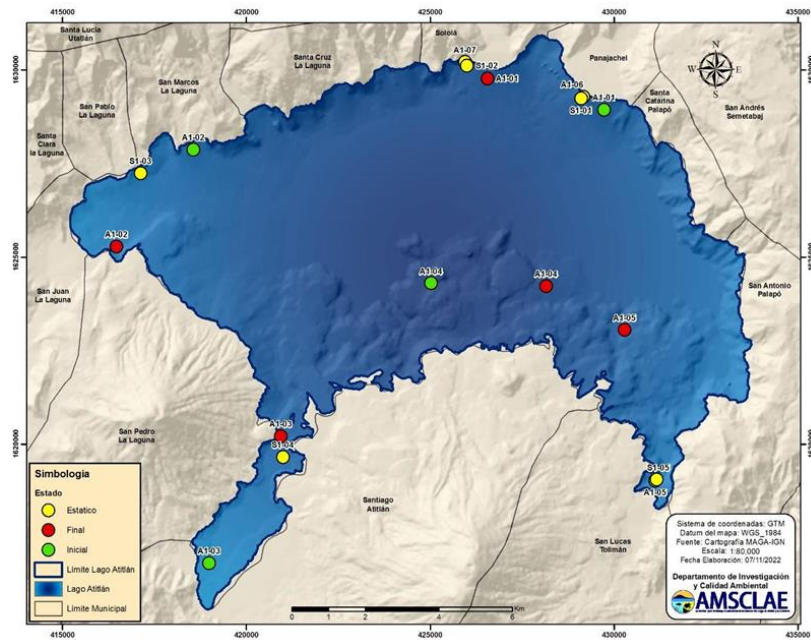
el 97.15% en forma de fibra. Esto presenta un riesgo para la población que consume peces provenientes del Lago de Amatitlán en Guatemala. Por otro lado, López (2018) reportó en su investigación sobre la contaminación de microplásticos en la superficie del Lago Atitlán, que la abundancia promedio de microplásticos determinada fue de 128,763 partículas/ km². Además que, la forma encontrada con mayor abundancia fueron los fragmentos.

Por último, en Guatemala también se han analizado los microplásticos en sal de la costa del Pacífico guatemalteco. En la investigación, Alvarado (2021) reportó rangos de abundancia de microplástico de 139-5,129 partículas/kg. Además que, el polímero caracterizados de microplástico en mayor proporción fue el polietileno de alta densidad. Esto demuestra que, los microplásticos se encuentran dentro de nuestra cadena trófica como contaminantes.

Actualmente, se realiza una investigación conformada por la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), El Centro de Estudios Atitlán (CEA) de la Universidad del Valle de Guatemala y la Autoridad para el Manejo sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán (AMSCLAE), en la cual se busca generar información para adoptar medidas apropiadas y mejorar la calidad del agua del lago, así como reducir la exposición de los habitantes a los riesgos toxicológicos de plaguicidas y plásticos (SENACYT, 2023).

En la investigación se hizo un muestreo en agua, sedimentos y peces en los ríos Xibalbay y San José Chacayá, en el Lago de Atitlán. Estas muestras se recolectaron en el mes de septiembre y el mes de noviembre de 2022, con el fin de analizar los niveles de contaminantes por plaguicidas y los tipos de microplásticos.

Figura 13. Puntos de muestreo en investigación por USAC, CEA y AMSCLAE



(AMSCLAE, 2022).

En la Figura 13 se identifican los puntos de muestreo de la investigación realizada por USAC, CEA de UVG y AMSCLAE en la Cuenca del Lago de Atitlán. Donde los círculos coloreados representan el código de las muestras en cada punto de recolección para los ríos, sedimentos y aguas superficiales.

VI. MARCO CONTEXTUAL

Esta investigación se centra en identificar los polímeros de los microplásticos muestreados por los investigadores la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno (AMSCLAE) y el Centro de Estudios Atitlán de la Universidad del Valle de Guatemala (CEA – UVG), cuyo objetivo es establecer el riesgo de los contaminantes emergentes a partir de resultados de análisis de plaguicidas y microplásticos. Este estudio se enfoca en identificar los tipos de polímeros a los que pertenecen los microplásticos muestreados previamente en el mes de septiembre y noviembre del año 2022. Los microplásticos analizados fueron tratados previamente al análisis por FTIR-ATR. Se cuantificaron e identificaron según su tipo (fibra, espuma, fragmento, film y microesfera), color, tamaño (1-5mm) y matriz (agua superficial, sedimentos y ríos).

VII. METODOLOGÍA

A. Hipótesis

1. Hipótesis nula (H_0):

- a. Los microplásticos presentes en muestras de agua superficial, ríos y sedimentos de la Cuenca del Lago de Atitlán no pertenecen a diferentes tipos de polímeros.
- b. La proporción de polímeros identificados en los microplásticos analizados de los diferentes meses de recolección no son iguales.

2. Hipótesis alternativa (H_a):

- a. Los microplásticos presentes en muestras de agua superficial, ríos y sedimentos de la Cuenca del Lago de Atitlán pertenecen a diferentes tipos de polímeros.
- b. La proporción de polímeros identificados en los microplásticos analizados de los diferentes meses de recolección son iguales.

B. Variables

Tabla 1. Variables para la identificación de los polímeros de los que se componen los microplásticos analizados.

| Variable | Definición conceptual | Definición operacional |
|-----------------------|--|---|
| Tipo de microplástico | Diferentes tipos de microplásticos: espuma, esfera, film, fragmentos y fibra. | Las formas se pueden distinguir al ser observadas directamente. |
| Mes de recolección | Época en la que se realizó la recolección de las muestras de microplásticos: septiembre y noviembre. | Las muestras se separan por mes de recolección para evaluar un cambio en la proporción de microplástico y polímero a través de distribución de frecuencias. |
| Matriz | Las muestras de microplásticos fueron recolectadas de: agua superficial, ríos y sedimentos. | Se separarán las muestras por matriz para poder ser analizadas y determinar la frecuencia en la que se encuentra un polímero en cada una de ellas. |
| Polímero | Diferente tipo de polímero, independientemente del tipo de forma. | Se determinará por medio de análisis IR, verificando su porcentaje de coincidencia mayor o igual a 70% con la base de datos del equipo. |

En la Tabla 1 se muestran las variables consideradas en la investigación y su definición operacional para medir u observar la variable.

C. Análisis experimental

1. Recolección de muestras

El siguiente procedimiento se realizó por parte de los investigadores del proyecto conformado por USAC, AMSCLAE y CEA-UVG, y fue planteado por López, (2021):

- a. Para el muestreo en aguas superficiales se utilizó una red de arrastre con una apertura rectangular para coleccionar las muestras, la cual se encontraba amarrada con lazos de una lancha durante 1 hora a una velocidad de 3 nudos.
- b. Para el muestreo en los ríos se filtró por una red a un aproximado de 120L.
- c. Las muestras coleccionadas se almacenaron en frascos de 1L y se transportaron al laboratorio de calidad de agua de AMSCLAE.
- d. Para el muestreo de sedimentos, se utilizó una draga ekman a 50 metros de profundidad. Las muestras se almacenaron en frascos de vidrio de 1L y se transportaron al laboratorio de calidad de agua de AMSCLAE y posteriormente al laboratorio de calidad de agua del CEA de la Universidad del Valle de Guatemala.

2. Determinación de microplásticos en sedimentos:

El siguiente procedimiento se realizó por parte de los investigadores del proyecto conformado por USAC, AMSCLAE y CEA-UVG, y fue planteado por López (2021):

- a. Se homogenizó el sedimento coleccionado y se revolvió por 5 minutos.
- b. Se pesó y se secó por 24 horas a 110°C. Luego de secarse se pesó nuevamente para determinar el porcentaje de humedad.
- c. Se homogenizó el sedimento seco.
- d. Se preparó una solución sobresaturada de sal.
- e. Se filtró por gravedad la solución sobresaturada de sal.
- f. Se pesaron 20g de sedimento seco y homogenizado en un beaker.
- g. Se añadió el doble de volumen ocupado de sedimento de la solución de sal y se agitó por 5 minutos.
- h. Se filtró el sobrenadante por gravedad con filtro de café.
- i. Se secó el filtro en un horno por 1-2 horas a 60°C.
- j. Se revisó bajo el estereoscopio y se contabilizó por color, rango de tamaño (menor a 1.00mm y mayor a 1.00mm) y forma (fragmento, film, fibra, espuma y microesfera).

3. Determinación de microplásticos en aguas superficiales y ríos:

El siguiente procedimiento se realizó por parte de los investigadores del proyecto conformado por USAC, AMSCLAE y CEA-UVG, y fue planteado por López (2021):

- a. Las muestras colectadas se lavaron a través de un juego de tamices con agua destilada y se transfirieron las muestras de tamiz de 1mm y 300 μ m a un beaker cada una.
- b. Se colocaron los beakers en horno a 90°C por 24 horas. Se dejaron enfriar y se añadió 20ml de solución de Fe(II) (0.05M).
- c. Se añadió 20ml de peróxido de hidrógeno y se dejó actuar a temperatura ambiente por 5 minutos.
- d. Se colocó el beaker sobre una estufa a 75°C por 30 minutos con agitador magnético y se cubrió con vidrio de reloj. Al observarse burbujas de gas en la superficie se quitó el beaker de la estufa hasta disminuir la ebullición.
- e. Si se encontraba materia orgánica en la muestra, se realizaba nuevamente el inciso c.
- f. Luego de enfriar, se añadió 6g de NaCl por 20ml de muestra para incrementar su densidad.
- g. Se calentó y agitó la muestra hasta que se disolvió el NaCl.
- h. Se transfirió la solución al sistema de densidad preparado con el embudo, soporte universal, aro de metal, manguera y clip.
- i. Se cubrió el embudo con aluminio y se dejó toda la noche.
- j. Se removieron las partículas de microplástico de la superficie con pinzas, posterior a ello se drenó el decantado para descartar. Se terminó de drenar la solución en el tamiz de 1mm o 300 μ m para recoger todas las partículas de microplástico.
- k. Se colocó el tamiz con microplástico en el horno cubierto con aluminio por una hora a 90°C.
- l. Se transfirió el microplástico a vidrio de reloj cubierto con otro vidrio de reloj para reducir la contaminación por microplásticos del ambiente.
- m. Se observaron los microplásticos bajo estereoscopio con el fin de contar las partículas e identificar el tipo de microplástico. Se transfirieron a un vial de vidrio con pinzas de metal.

El análisis experimental de los microplásticos por FTIR-ATR es una modificación del procedimiento planteado por Velandia (2017) y Hendrickson, Minor y Schreiner (2018).

4. Análisis de las muestras recuperadas de agua superficial, ríos y sedimentos de la Cuenca del Lago de Atitlán en FTIR-ATR:

- a. Se utilizó el espectrómetro de un solo rango Frontier IR con un accesorio universal ATR. Las mediciones se hicieron en el rango de 4000 a 380 cm^{-1} y con una resolución de 4 cm^{-1} .
- b. Se colocó la muestra cubriendo la mayor superficie del cristal.
- c. Se leyeron los datos con el software Spectrum.
- d. Se definió el tipo de polímero con base a su coincidencia con la base de datos. Se tomó un 70% de coincidencia como el mínimo para clasificarlo según la base de datos. Si el porcentaje de coincidencia era <70% se clasificó el microplástico realizando un análisis del espectro, observando los picos característicos de los polímeros.
- e. Se analizó el 15% de los microplásticos con grupos de muestras mayores a 10, el 35% para los microplásticos con grupos de muestras iguales a 10, el 50% para los microplásticos con grupos de muestras de 6 a 9 y, los grupos de muestras menores e iguales a 5 se analizarán en su totalidad. La selección de muestra se realizó de manera aleatoria. Tomando en cuenta que los microplásticos ya se encontraban previamente clasificados según su forma y punto de recolección.

5. Análisis estadístico para la interpretación de resultados de las muestras recuperadas de agua superficial, ríos y sedimentos de la Cuenca del Lago de Atitlán:

- a. Se realizó una distribución de frecuencias cualitativas para ver la proporción de cada tipo de polímeros presente en cada matriz.
- b. Se hizo un histograma para visualizar gráficamente la distribución de frecuencias de los polímeros en agua superficial, ríos y sedimentos de la Cuenca del Lago de Atitlán.
- c. Se hizo un histograma para visualizar gráficamente la distribución de frecuencias entre los polímeros identificados para cada matriz en cada mes de recolección y su comparación de época de muestreo.

VIII. RESULTADOS

Tabla 2. Distribución de frecuencias para la identificación de polímeros muestreados en el mes de septiembre de 2022.

| Polímero | Septiembre | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|
| | Sedimentos (%) | Ríos (%) | Aguas superficiales (%) |
| Polipropileno isotáctico | 36 | 33 | 44 |
| Polipropileno | 7 | 0 | 0 |
| Polietileno de alta densidad | 7 | 11 | 6 |
| Polietileno clorado | 7 | 0 | 0 |
| Nylon 6/9 | 7 | 0 | 0 |
| Poliestireno | 0 | 0 | 16 |
| Poliestireno del alto impacto | 0 | 0 | 6 |
| Otros | 36 | 56 | 28 |
| N | 100 | 100 | 100 |

La Tabla 2 muestra la distribución de frecuencias para los polímeros identificados de cada muestra de microplástico recolectado en el mes de septiembre de 2022, clasificado por cada matriz (sedimentos ríos y aguas superficiales). Los resultados que no corresponden a un polímero se clasifican como “Otros” y la cantidad de observaciones analizadas por el conjunto de datos se representa con “N”.

Tabla 3. Distribución de frecuencias para la identificación de polímeros muestreados en el mes de noviembre de 2022.

| Polímero | Noviembre | | |
|--|-----------------------|-----------------|--------------------------------|
| | Sedimentos (%) | Ríos (%) | Aguas superficiales (%) |
| Polipropileno isotáctico | 40 | 33 | 38 |
| Polietileno de alta densidad | 10 | 17 | 14 |
| Copolímero de estireno / alcohol alílico | 10 | 0 | 5 |
| Poliéster | 5 | 0 | 0 |
| Polipropileno | 0 | 0 | 5 |
| Tereftalato de polibutileno | 0 | 0 | 5 |
| Resina de poliamida | 0 | 0 | 5 |
| Polietileno clorado | 0 | 0 | 5 |
| Polietileno lineal de baja densidad | 0 | 0 | 5 |
| Otros | 35 | 50 | 19 |
| N | 100 | 100 | 100 |

La Tabla 3 muestra la distribución de frecuencias para los polímeros identificados de cada muestra de microplástico recolectado en el mes de noviembre de 2022, clasificado por cada matriz. (sedimentos, ríos y aguas superficiales). Los resultados que no corresponden a un polímero se clasifican como “Otros” y la cantidad de observaciones analizadas por el conjunto de datos se representa con “N”.

Tabla 4. Distribución de frecuencias de la identificación de polímeros según su forma en septiembre de 2022.

| Polímero | Septiembre | | | | |
|------------------------------|------------|------------|-----------|---------------|-----------------|
| | Film (%) | Espuma (%) | Fibra (%) | Fragmento (%) | Microesfera (%) |
| Polipropileno isotáctico | 38 | 0 | 46 | 60 | 50 |
| Polipropileno | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| Poliétileno de alta densidad | 0 | 13 | 0 | 20 | 0 |
| Poliétileno clorado | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 |
| Nylon 6/9 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| Poliestireno | 0 | 38 | 0 | 0 | 0 |
| Poliestireno de alto impacto | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 |
| Otros | 63 | 25 | 46 | 10 | 50 |
| N | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

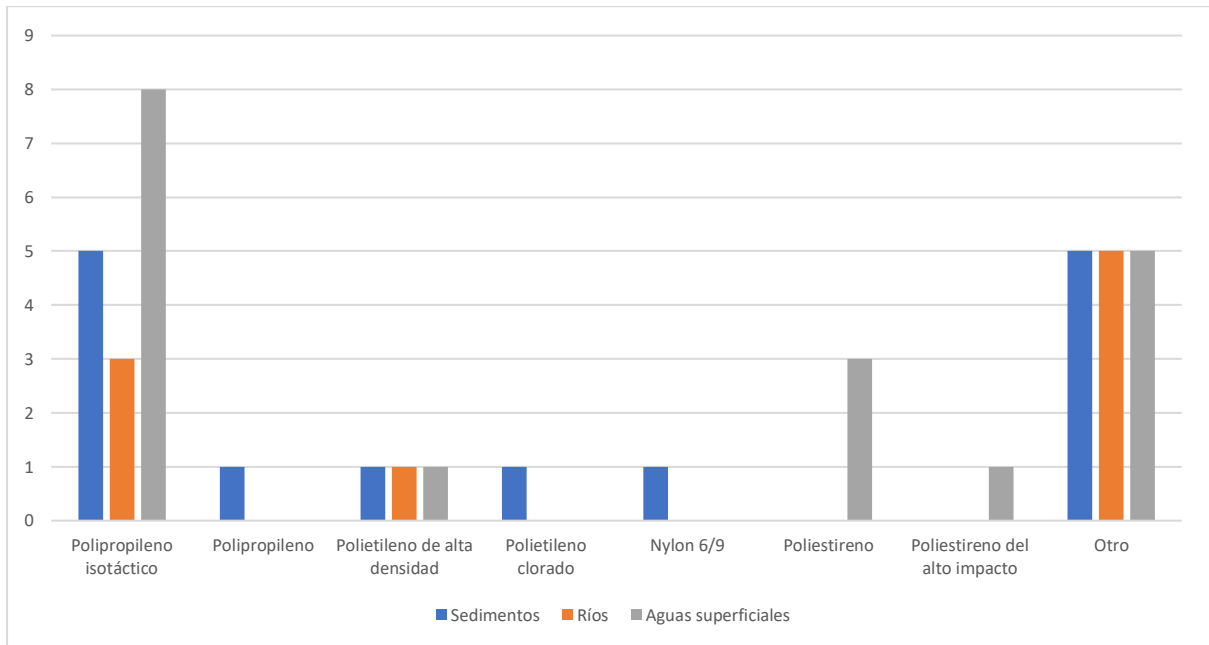
La Tabla 4 muestra la distribución de frecuencias para la identificación de los polímeros según su forma (film, espuma, fibra, fragmento, microesfera), los cuales fueron recolectados en el mes de septiembre de 2022. Las muestras analizadas que no corresponden a un polímero se clasifican como “Otros” y la cantidad de observaciones analizadas por el conjunto de datos se representa con “N”.

Tabla 5. Distribución de frecuencias de la identificación de polímeros según su forma en noviembre de 2022.

| Polímero | Noviembre | | | | |
|--|-----------|------------|-----------|---------------|-----------------|
| | Film (%) | Espuma (%) | Fibra (%) | Fragmento (%) | Microesfera (%) |
| Polipropileno isotáctico | 20 | 0 | 62 | 42 | 25 |
| Polipropileno | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| Poliétileno de alta densidad | 0 | 0 | 8 | 26 | 0 |
| Poliétileno clorado | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 |
| Copolímero de estireno/alcohol alílico | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 |
| Poliéster | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| Tereftalato de polibutileno | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| Resina de poliamida | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| Poliétileno lineal de baja densidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 |
| Otros | 80 | 50 | 8 | 26 | 25 |
| N | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

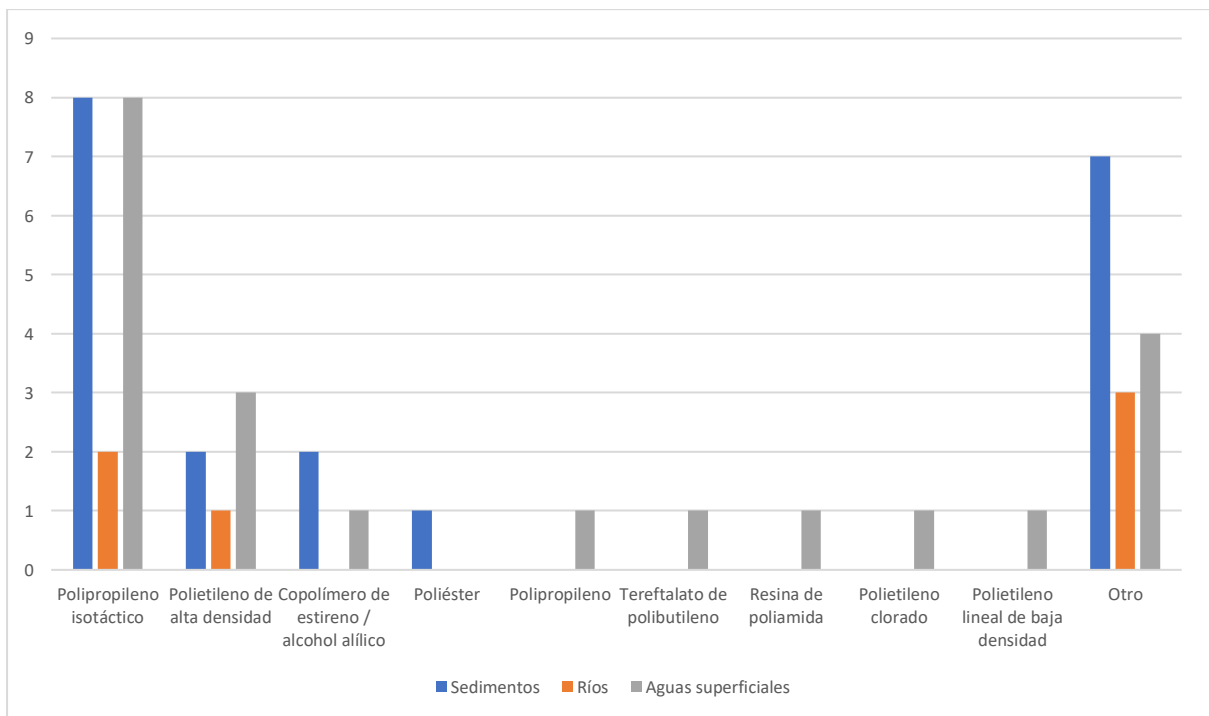
La Tabla 5 muestra la distribución de frecuencias para la identificación de los polímeros según su forma (film, espuma, fibra, fragmento, microesfera), los cuales fueron recolectados en el mes de noviembre de 2022. Las muestras analizadas que no corresponden a un polímero se clasifican como “Otros” y la cantidad de observaciones analizadas por el conjunto de datos se representa con “N”.

Figura 14. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados en las matrices muestreadas en septiembre de 2022.



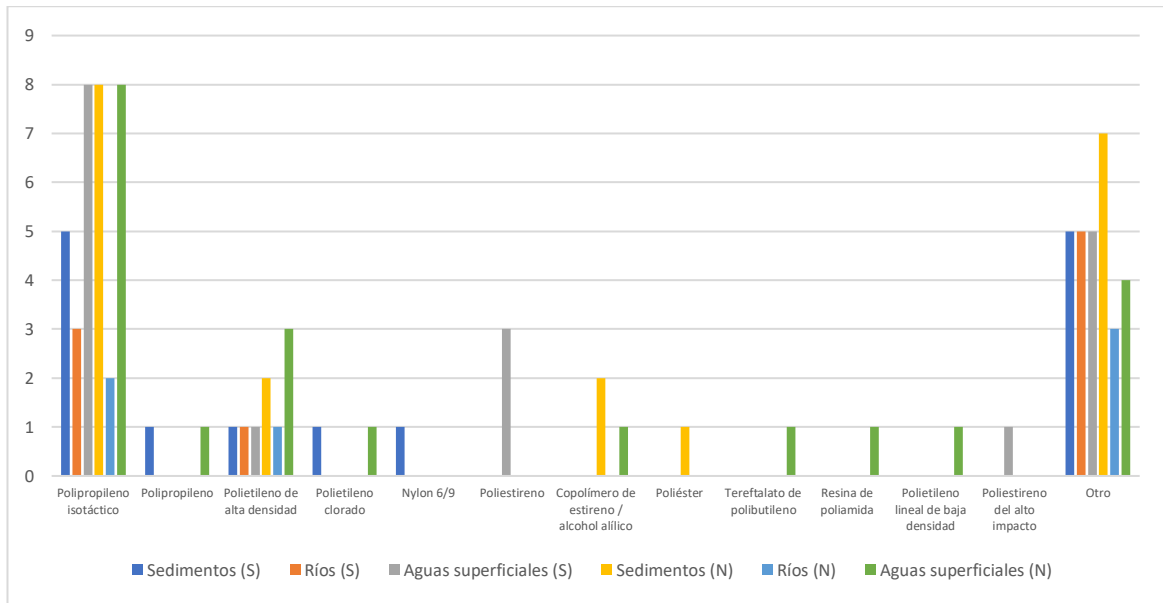
La Figura 14 muestra el histograma de frecuencias para los microplásticos identificados según su matriz (sedimentos, ríos y aguas superficiales), los cuales fueron muestreados en septiembre de 2022.

Figura 15. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados de las matrices muestreadas en noviembre de 2022.



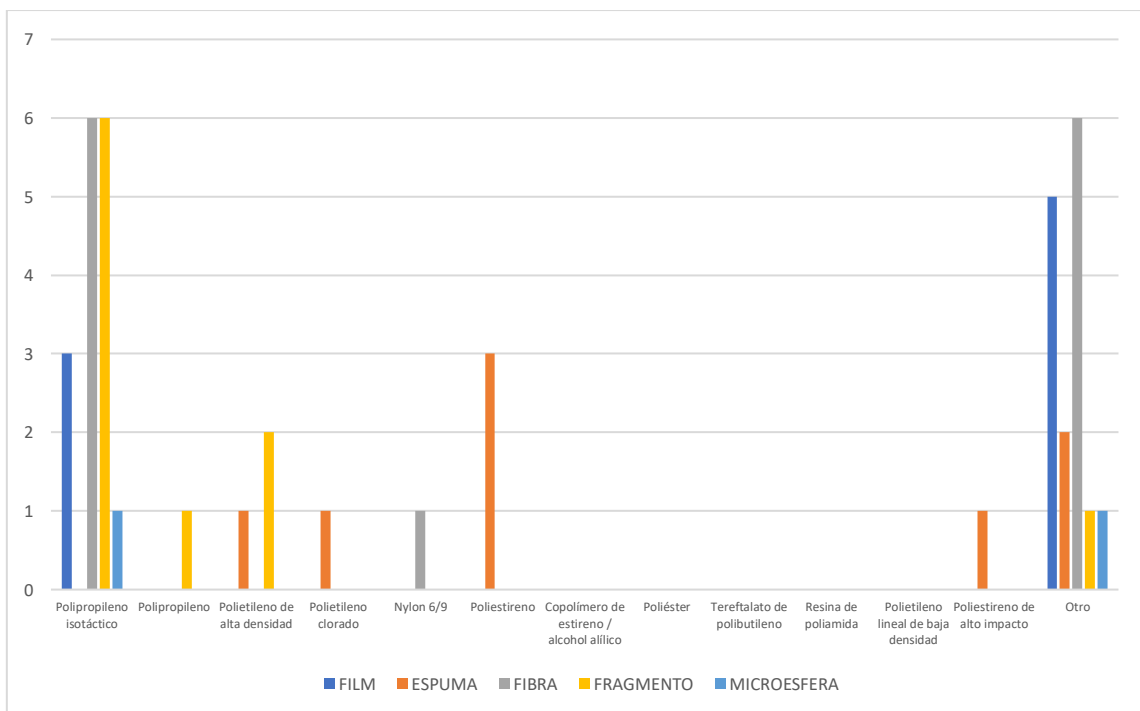
La Figura 15 muestra el histograma de frecuencias para los microplásticos identificados según su matriz (sedimentos, ríos y aguas superficiales), los cuales fueron muestreados en noviembre de 2022.

Figura 16. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados en las matrices muestreadas en septiembre y noviembre de 2022.



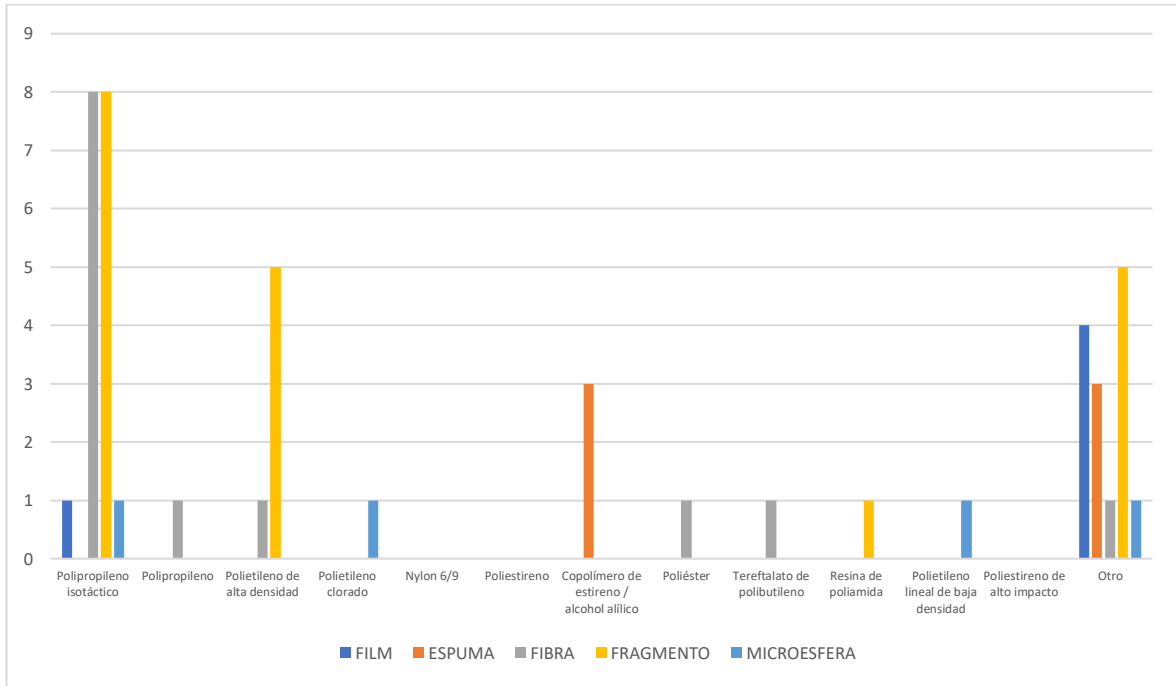
La Figura 16 presenta el histograma de frecuencias de microplásticos identificados en las matrices muestreadas en septiembre y noviembre para observar su variación dependiendo del mes de recolección, en donde (S) es el mes de septiembre de 2022 y (N) el mes de noviembre de 2022.

Figura 17. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados para cada forma muestreadas en septiembre de 2022.



La Figura 17 muestra el histograma de frecuencias para los microplásticos identificados según su forma (film, espuma, fibra, fragmento, microesfera), los cuales fueron muestreados en septiembre de 2022.

Figura 18. Histograma de frecuencias para los microplásticos identificados para cada forma muestreadas en noviembre de 2022.



La Figura 18 muestra el histograma de frecuencias para los microplásticos identificados según su forma (film, espuma, fibra, fragmento, microesfera), los cuales fueron muestreados en septiembre de 2022.

IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se determinaron los polímeros a los que pertenecen los microplásticos en forma de espuma, fibra, film, fragmento y microesfera muestreados en septiembre y noviembre de 2022 en sedimentos, aguas superficiales y ríos de la Cuenca del Lago de Atitlán mediante el espectrómetro de un solo rango Frontier IR con un accesorio universal ATR. Los microplásticos se presentaban en un tamaño milimétrico, lo que ocasionó que algunas muestras tuvieran dificultad al ser leídas por el equipo, ya que no cubrían la mayor parte del cristal. Por lo que, para las muestras con un porcentaje de coincidencia menor al 70% según la base de datos del software Spectrum, se realizó un análisis manual para determinar el polímero al que pertenecía el microplástico. Se encontró que, el polímero predominante tanto en el mes de septiembre como en el mes de noviembre fue el polipropileno isotáctico, mostrando una mayor frecuencia en aguas superficiales y sedimentos.

Al observar las tablas 4 y 5, así como los histogramas de las figuras 17 y 18, se tiene que, de los microplásticos analizados del mes de septiembre de 2022, el polipropileno isotáctico es el polímero predominante en los fragmentos, en la forma de espuma predomina el poliestireno, mientras que, en las fibras se determinó polipropileno isotáctico, al igual que en las formas de film y microesfera. Por otro lado, en el mes de noviembre de 2022, el polipropileno isotáctico es el polímero que sigue predominando en los fragmentos y fibras, en la forma de espuma predomina el copolímero de estireno/alcohol alílico, en la forma de film se encontró nuevamente polipropileno isotáctico. Por último, en la forma de microesfera se determinaron tres polímeros en igual proporción: polipropileno isotáctico, polietileno clorado y polietileno lineal de baja densidad.

El polipropileno isotáctico se identificó en la superficie y en los sedimentos, su presencia puede deberse a factores como las corrientes o turbulencia provocada por las desembocaduras de ríos, viento o diferentes actividades humanas como los paseos en lanchas que pueden hacer que las partículas de microplásticos estén en movimiento. Incluso, se puede encontrar el polipropileno isotáctico en los sedimentos por el mismo proceso de sedimentación. Por otro lado, en septiembre y noviembre se identificaron una gran proporción de minerales, los cuales se clasificaron como “otros”, ver Tabla 2 y Tabla 3.

El polipropileno isotáctico, al poseer los grupos metilo de un solo lado de la cadena carbonada, como se observa en la Figura 4, tiene mayor grado de cristalinidad, por lo que se le confiere mayor rigidez y resistencia en comparación al polietileno o el polipropileno. Esto podría ser una razón por la cual se encuentra una mayor proporción de polipropileno isotáctico, ya que, al poseer una estructura cristalina, evita que el agua penetre con mayor facilidad y sea degradado, al compararlo con una estructura amorfa del polietileno, que se degrada con mayor rapidez (García, 2014). De igual forma, el polipropileno isotáctico puede encontrarse en mayor proporción comparado con los demás polímeros

debido a que es de gran importancia en la industria, ya que puede ser utilizado en una gran variedad de aplicaciones por su alta resistencia y alto punto de fusión, como aparatos o productos domésticos que pueden incluir recipientes adecuados para microondas, bolsas o incluso alfombras, además, se utiliza también para envases de alimentos o de fármacos o como partes para automóviles (Groover, 1979).

Por otro lado, se identificaron microplásticos de polietileno clorado en ambos meses de recolección, en septiembre se identificó en sedimentos y en noviembre en aguas superficiales, lo cual podría deberse a que en el mes de septiembre hay mayor presencia de lluvias, que puede transportar los microplásticos, causando que estos se acumulen en la superficie de la cuenca en el mes de noviembre. Al clorar el polietileno en un 30% se vuelve más soluble por una menor cristalinidad que el polietileno, sin embargo, puede encontrarse polietileno clorado hasta un 73%. Este polímero posee inestabilidad química al calor y a la luz, pues este pierde un átomo de cloro y el radical de cloro extrae un hidrógeno formando HCl (Billmeyer, 2020). Debido a esto, la presencia de polietileno clorado es preocupante, ya que afecta en la calidad del agua, en la salud de personas y seres vivos que la consumen y el hábitat de las especies presentes en la cuenca.

Se identificó el copolímero de estireno/alcohol alílico en sedimentos y aguas superficiales para las muestras analizadas que se recolectaron en el mes de noviembre. Este copolímero se utiliza comúnmente como recubrimiento de electrodomésticos, recubrimientos de bobinas, pinturas para suelos, pinturas látex, imprimaciones de equipos industriales, automóviles y maquinaria agrícola. Por lo tanto, su presencia podría deberse a factores como el desgaste del recubrimiento de los botes (LyondellBasell, 2011).

Debido al clima que presentan ambos meses en los que se realizó el muestreo y al observar una mayor proporción de microplásticos en el mes de noviembre, se puede concluir que las condiciones meteorológicas influyen en la frecuencia de distribución de estos. Se pudo haber presentado una mayor frecuencia en noviembre debido a las variaciones climáticas durante ese mes en comparación con el mes de septiembre. Ya que, en septiembre el clima en la región de Atitlán se caracteriza por un alto porcentaje de nubosidad que trae consigo lluvias más constantes. Esta precipitación constante puede resultar en una mayor actividad hidrológica, provocando un aumento en el flujo de agua en ríos que potencialmente transportan microplásticos a lo largo de la Cuenca del Lago de Atitlán.

Sin embargo, en noviembre, las condiciones climáticas lluviosas disminuyen, por lo que la actividad hidrológica también disminuye. Al haber una reducción en el flujo de agua, es posible que se permita una mayor acumulación o concentración de microplásticos en la Cuenca. Por otro lado, la frecuencia de microplásticos encontrados en noviembre en los ríos es menor a la encontrada en los ríos en el mes de septiembre, lo cual puede deberse a una mayor cantidad de precipitaciones que podrían transportar una mayor cantidad de microplásticos hacia los cuerpos de agua. Además, al disminuir las

lluvias en noviembre, estos microplásticos transportados por los ríos pueden depositarse en el fondo de los cuerpos de agua, contribuyendo a una mayor proporción encontrada en sedimentos y aguas.

La presencia de microplásticos en la Cuenca del Lago de Atitlán es un grave problema de contaminación, ya que los organismos acuáticos presentes pueden ingerirlos, al igual que las personas y demás seres vivos que consumen el agua de la cuenca. Los microplásticos han mostrado ser bioacumulativos en algunos organismos acuáticos, por lo que presenta riesgos para la salud por toxicidad que puede desencadenar una exposición prolongada en la fauna marina y a las personas que consumen los productos de la cuenca. Asimismo, los microplásticos persisten por un periodo prolongado en el medio ambiente, por lo que se podría verse un aumento en la presencia en los sedimentos de la Cuenca del Lago de Atitlán (Alava, 2020).

Los microplásticos liberan sustancias químicas que pueden afectar la salud medio ambiental y la salud de los seres vivos. Según el análisis por FTIR se identificó polipropileno en sedimentos y aguas superficiales, el cual se puede relacionar con la liberación de nonilfenol, un compuesto tóxico para los animales y organismos acuáticos. Además, se identificaron polímeros de estireno, que se ha encontrado que es razonablemente anticipado como carcinógeno humano (UN Environment Programme 2023).

La presencia de microplásticos puede deberse a diferentes factores, tales como las condiciones meteorológicas, mencionados anteriormente, o la actividad humana local, ya que algunas de las personas aledañas al lago o a ríos que desembocan en el Lago de Atitlán acostumbran a lavar su ropa o a la pesca, lo cual provoca que las fibras de polímeros se desgasten y se formen microplásticos. De igual forma, Atitlán es un lugar turístico, por lo que hay diferentes actividades recreativas, tales como paseos en lancha que podrían mostrar un desgaste en el recubrimiento, depositando microplásticos en el Lago de Atitlán.

Estos resultados reflejan el problema de contaminación en la Cuenca del Lago de Atitlán, por lo que pueden contribuir a la formulación de estrategias permanentes para la gestión de los desechos dentro de la Cuenca del Lago de Atitlán. Así como, el monitoreo de las fuentes u origen de productos fabricados con los polímeros identificados en mayor proporción, y así, regular su consumo. Además, podrían implementarse para fortalecer la responsabilidad ambiental de los ciudadanos y de los turistas que visitan la Cuenca del Lago de Atitlán. De esta forma, podría haber una reducción en los desechos que se vierten en las fuentes de agua y un cambio o regulación de las actividades humanas.

Con base en los resultados obtenidos del análisis de microplásticos de la Cuenca del Lago de Atitlán, se rechaza la hipótesis nula ($H_0 a$), debido a que, los microplásticos presentes en las muestras de agua superficial, ríos y sedimentos pertenecen a diferentes tipos de polímeros, como el polipropileno isotáctico, poliestireno, copolímero de estireno/alcohol alílico, polietileno clorado y polietileno lineal de baja densidad. Por otro lado, se acepta la hipótesis nula ($H_0 b$), ya que sí hubo una variación en la

proporción de polímeros identificados en los microplásticos analizados entre los meses de septiembre y noviembre, con diferencias en la frecuencia de polipropileno isotáctico y los demás polímeros.

El método de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier permitió identificar el tipo de polímero al que pertenecen los microplásticos analizados, sin embargo, al analizar microplásticos más pequeños se mostraba una mayor dificultad en la lectura, debido a que estas no cubrían completamente el área de detección del cristal. Además, los microplásticos pueden contener aditivos o modificar su química con el desgaste, que pueden dificultar la detección de estos en el espectro Infrarrojo, por lo que se recomienda analizar el espectro de cada muestra para verificar la coincidencia que marca el software del equipo.

X. CONCLUSIONES

- A. Los microplásticos presentes en muestras de agua superficial, ríos y sedimentos de la Cuenca del Lago de Atitlán sí pertenecen a diferentes tipos de polímeros, siendo el más dominante, tanto en septiembre como en noviembre, el polipropileno isotáctico, con mayor abundancia en fibras y fragmentos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ($H_0 a$).
- B. La frecuencia significativa de polipropileno isotáctico puede atribuirse a su alta resistencia y rigidez que evitan su rápida degradación e incluso, su variedad de aplicaciones industriales y domésticas.
- C. La proporción de polímeros identificados en los microplásticos analizados varió entre los meses de septiembre y noviembre, pues observó una mayor frecuencia de microplásticos en noviembre. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula ($H_0 b$).
- D. La variación en la frecuencia de microplásticos en ambos meses de recolección y la mayor proporción de microplásticos en noviembre se relaciona con las condiciones climáticas que afectan en la actividad hidrológica del lago y de los ríos que desembocan en la cuenca, influyendo en el transporte y deposición de microplásticos.
- E. Algunos microplásticos identificados, como el copolímero de estireno/alcohol alílico o el polietileno clorado, generan preocupación sobre la calidad del agua de la cuenca y de sus organismos acuáticos, ya que estos polímeros pueden liberar sustancias químicas tóxicas. Esto destaca la necesidad de abordar la contaminación por microplásticos en la Cuenca del Lago de Atitlán.

XI. RECOMENDACIONES

- I. Se recomienda la creación de estrategias de gestión de desechos efectivas para reducir la liberación de microplásticos en las fuentes de agua, lo cual incluye campañas para concientizar sobre la responsabilidad ambiental y regulación en las actividades humanas de los locales o turismo.
- II. Se recomienda la creación de nuevas políticas de regulación para reducir la contaminación por microplásticos en la Cuenca del Lago de Atitlán, así como el seguimiento constante de las fuentes de microplásticos para implementar medidas correctivas adecuadas.
- III. Se recomienda la regulación de productos de consumo o actividades industriales que contribuyan a la contaminación por microplásticos, especialmente de los polímeros encontrados que pueden presentar una mayor preocupación por su presencia que podría liberar sustancias químicas tóxicas.
- IV. En relación con el método de análisis, se recomienda optimizar las técnicas de análisis por espectroscopía infrarroja para facilitar la detección a microplásticos con tamaños menores a 1mm en todas sus formas, mediante la implementación de un microscopio de FTIR. Esto se debe a que las muestras pequeñas no cubren adecuadamente la superficie del cristal del espectrofotómetro IR, lo que afecta la precisión de la lectura debido a la sensibilidad del equipo.

XII. BIBLIOGRAFÍA

Alava, Juan. 2020. <<Modeling the bioaccumulation and biomagnification potential of microplastics in a cetacean foodweb of the northeastern pacific: a prospective tool to assess the risk exposure to plastic particles>>. *Frontiers in Marine Science*. 7 (566101): 1-23. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.566101>

Alvarado, Cristhal. 2021. *Microplásticos en sal de la costa del pacífico guatemalteco*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Dirección General de investigación. 66 págs.

Amaya, Eduardo., Molina, Facundo. y Sánchez, Mauricio. 2018. *Producción de polipropileno*. Tesis Universidad Nacional de Cuyo. Argentina, Mendoza. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria. 311 págs.

AMSCLAE. (21 de febrero de 2024). Autoridad para el manejo sustentable de la cuenca del lago de Atitlán y su entorno. Obtenido de AMSCLAE: <https://www.amsclae.gob.gt/quienes-somos/>

Aranda, Dalila. 2022. <<Contaminación por microplásticos>>. *Revista Mexicana de Ciencias*. 73 (2): 6-7.

Ararat, Carlos., y Murillo, Edwin. 2016. <<Polietileno de baja densidad funcionalizado con un políester polioliol altamente ramificado maleinizado>>. *Ingeniería y Ciencia*. 12 (4): 2256-4314. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.23.7>

Atkins, Peter. y Jones, Loretta. 2006. *Principios de química. Los caminos del descubrimiento*. 3era ed. Buenos Aires: Editorial Medica Panamericana. 713 págs.

Beltrán, Maribel. y Marcilla, Antonio. 2011. *Tema 1. Estructura y propiedades de los polímeros*. España: Unión de editoriales universitarias españolas. 273 págs.

Billmeyer, Fred. 2020. *Ciencia de los polímeros*. España: Editorial Reverté, S. A. 610 págs.

Callister, William. 1996. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2*. España: Editorial Reverté, S. A. 328 págs.

Cardona, Diego., Lavernia, Carlos. y Alcerro, José. 2010. <<Polietileno>>. *Acta Ortopédica Mexicana*. 24 (2): 123-128.

Carrasquero, Francisco. 2004. *Fundamentos de Polímeros*. Venezuela: Escuela venezolana para la enseñanza de la química. 59 págs.

Castañeda, Jorge., Machica, Alejandro., Pastora, Deyman., López, Sergio., Pérez, Giovanna., Bardales, Walter., Nij, Jéser., Pérez, Eduardo., Roberto, Jamil., Collado, Carlos., Ortega, Irene.,

Aguilera, Elvin., y González, Diego. 2009. *Estimación de cargas contaminantes vertidas a Lago Atitlán por desechos líquidos*. Investigación Maestría Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 7 págs.

Coreño, Juan. y Méndez, Teresa. 2010. <<Relación estructura-propiedades de polímeros>>. *Educación química*. 21 (4): 291-299. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30098-3](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30098-3)

De Paz. 2014. *Atitlán – Los Pueblos y El Lago*. Alemania: Epubli GmbH. 99 págs.

Gañan, Piedad., Zuluaga, Robin., Castro, Cristina., Restrepo, Adriana., Velásquez, Jorge., Marlon, Cock., Montoya, Úrsula., Vélez, Lina., Álvarez, Catalina., Correa, Carlos. y Molina, Carlos. 2017. <<Celulosa: un polímero de siempre como mucho futuro>>. *Revista Colombiana de Materiales*. (11): 01-04. <https://doi.org/10.17533/udea.rcm.328779>

García, María. 2014. *Modificación estructural de polipropileno empleando iniciadores cíclicos multifuncionales triperóxido de dietilcetona (TPDEC) y diperóxido de pinacolona (DPP), en conjunto con extensores de cadena del tipo acrilato*. Tesis Centro de Investigación en Química Aplicada. México. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 101 págs.

Gomella, Cyril. y Guerrée, Henri. 1973. *La distribución del agua en las aglomeraciones urbanas y rurales*. España: Editores técnicos y asociados, s.a. 295 págs.

González, Dulce., Castañeda, Adali., Esparza, Sandra., López, Lluvia. y Galindo, Sáenz. 2021. <<Poli(metilacrilato de metilo): un termoplástico biocompatible. Diversas aplicaciones>>. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 22 (3), 140-146. e0121-6651

Groover, Mikell. 1997. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Colombia: Prentice Hall. 1062 págs.

Guasti, Alonso. 2022. <<Contaminación por microplásticos>>. *Revista Mexicana de Ciencias*. 73 (2): 3.

Hendrickson, Erik., Minor, Elizabeth. y Schreiner, Kathryn. 2018. <<Microplastic Abundance and Composition in Western Lake Superior As Determined via Microscopy, Pyr-GC/MS, and FTIR>>. *Environ. Sci. Technol.* 52 (4): 1787–1796. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05829>

Herrera, Isaac. 2019. <<Categorización de la recarga hídrica natural en la cuenca del Lago de Atitlán en Guatemala>>. *Tikalía*. 37 (1): 57-87.

Lenaker, Peter., Corsi, Steven. y Mason, Sherri. 2020. <<Spatial Distribution of Microplastics in Surficial Benthic Sediment of Lake Michigan and Lake Erie>>. *Environmental Science & Technology*. 55 (1): 373-384. 10.1021/acs.est.0c06087.

López, Ninoshka. 2018. Contaminación por microplásticos en la superficie del Lago Atitlán, Sololá. Tesis Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. 68 págs.

López, Ninoshka. 2021. *Determinación de microplásticos en sedimentos*. Guatemala: Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad del Valle de Guatemala, Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno.

López, Ninoshka. 2021. *Microplástico: análisis de agua superficial*. Guatemala: Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad del Valle de Guatemala, Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno.

LyondellBasell. 2011. *Technical Data Styrene Allyl Alcohol Copolymer*. Estados Unidos. LyondellBasell Industries Holdings, BV. 2 págs.

Newell, James. 2010. *Ciencia de materiales. Aplicaciones en ingeniería*. México: Alfaomega. 370 págs.

Olivia, Bessie. 2021. *Determinación de microplásticos y tierras raras en agua y peces del Lago de Amatitlán*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 77 págs.

Othman, Ahmed., Elsayed, Ahmed., Sabry, Yasser., Khalil, Daa. y Bourouina, Tarik. 2023. <<Detection of Sub-20 μm Microplastic Particles by Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Comparison with Raman Spectroscopy>>. *ACS Omega*. 8 (11): 10335 - 10341. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07998>

Pastor, Clara. y Agulló, David. 2019. <<Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública>>. *Rev. Esp. Salud Publica*. 93. e201908064.

Reserva Natural de Atitlán. 2024. *Información general del Lago de Atitlán*. Guatemala. Reserva Natural Atitlán.

Romero, Jaime. 2005. *Optimización del proceso de descomposición química de residuos de tereftalato de polietileno (PET) por el método de glicólisis*. Tesis Universidad de los Andes. Colombia. 41 págs.

Rosas, Rigoberto., Gonzáles, Claudia. y Polett, Mayra. 2022. <<Las dunas del Caribe y su contaminación por plásticos>>. *Revista Mexicana de Ciencias*. 73 (2), 42-49.

Sánchez, Álvaro. y Propin, Enrique. 2017. <<Turismo y territorio en las márgenes del Lago de Atitlán, Guatemala>>. *Revista Geográfica de América Central*. 2 (58E): 15-40.

Sarria, Rodrigo. y Gallo, José. 2016. <<La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos>>. *Journal de Ciencia e Ingeniería*. 8 (1): 21-27.

SENACYT. 2023. *Busca frenar la contaminación de micro plásticos y plaguicidas en el Lago de Atitlán*. Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología. Guatemala.

Seymour, Raimond. y Carraher, Charles. 2021. *Introducción a la química de los polímeros*. España: Editorial Reverté, S. A. 689 págs.

Tagg, Alexander., Sapp, Melanie., Harrison, Jesse., y Ojeda, Jesús. 2015. <<Identification and Quantification of Microplastics in Wastewater Using Focal Plane Array-Based Reflectance Micro-FT-IR Imaging>>. *Anal. Chem*, 87 (12), 6032 – 6040. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b00495>

UN Environment Programme. 2023. *Chemicals in plastics: a technical report*. Geneva. United Nations Environment Programme. 130 págs.

Velandia, Javier. 2017. <<Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja>>. *Ontare*. 5: 115-140.

Weather Spark. (25 de noviembre de 2023). El tiempo en septiembre en Sololá. Obtenido de: <https://es.weatherspark.com/m/11132/9/Tiempo-promedio-en-septiembre-en-Sololá-Guatemala#Figures-Temperature>

Weather Spark. (25 de noviembre de 2023). El tiempo en noviembre en Sololá. Obtenido de: <https://es.weatherspark.com/m/11132/11/Tiempo-promedio-en-noviembre-en-Sololá-Guatemala>

Yang, Dongqi., Shi, Huahong., Li, Lan., Li, Jiana., Jabeen, Khalida., y Kolandhasamy, Prabhu. 2015. <<Microplastic Pollution in Table Salts from China>>. *Environ. Sci. Technol.* 49 (22): 13622–13627. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03163>

Yonkos, Lance., Friedel, Elizabeth., Perez, Ana., Ghosal, Sutapa. y Arthur, Courtney. 2014. <<Microplastics in Four Estuarine Rivers in the Chesapeake Bay, USA>>. *Environ. Sci. Technol.* 48 (24): 14195-14202. <https://doi.org/10.1021/es5036317>

Zarus, Gregory., Muianga, Custodio., Hunter, Candis., Pappas, Richter. 2021. <<A review of data for quantifying human exposures to micro and nanoplastics and potential health risks>>. *Elsevier*. 756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144010>

XIII. ANEXOS

Tabla 6. Identificación y clasificación del polímero por mes de recolección y matriz de las muestras de microplásticos.

| Mes de recolección | Matriz | Código de muestra | Color | Tipo de microplástico | Resultado | Polímero | Porcentaje de coincidencia |
|---------------------------|---------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| Septiembre | Sedimento | S.1-01 | Azul | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 95% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-02 | Blanco | Fragmento | Polipropileno | Sí | 70% |
| Septiembre | Sedimento | S.1.-03 | Celeste (amarillo) | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 71% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-02 | Blanco | Espuma | Bentone SD-1 | No | 76% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-02 | Café | Espuma | Polietileno de alta densidad | Sí | 87% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-05 | Café | Espuma | Polietileno clorado | Sí | 69% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-05 | Amarillo | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 97% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-04 | Amarillo | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 97% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-03 | Morado | Fibra | Montmorillonita | No | 72% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-01 | Blanco | Fibra | Nylon 6/9 | Sí | 90% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-01 | Morado | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 93% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-05 | Transparente | Film | Illita | No | 79% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-05 | Café | Film | Moscovita | No | 72% |
| Septiembre | Sedimento | S.1-04 | Transparente | Film | Moscovita | No | 78% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-01 | Transparente | Film | Cloruro de estearalconio | No | 80% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-02 | Amarillo | Film | Illita/Esmectita | No | 79% |

Continuación Tabla 6. Identificación y clasificación del polímero por mes de recolección y matriz de las muestras de microplásticos.

| Mes de recolección | Matriz | Código de muestra | Color | Tipo de microplástico | Resultado | Polímero | Porcentaje de coincidencia |
|---------------------------|---------------|--------------------------|--------------|------------------------------|--|-----------------|-----------------------------------|
| Noviembre | Sedimento | S.2-02 | Café | Film | Illita | No | 80% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-05 | Transparente | Film | Moscovita | No | 72% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-05 | Verde | Film | Polipropileno isotáctico | Sí | 94% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-02 | Rojo | Fragmento | Polietileno de alta densidad | Sí | 94% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-03 | Anaranjado | Fragmento | Cloruro de estearalconio | No | 87% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-01 | Celeste | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 92% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-05 | Azul | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 96% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-02 | Amarillo | Espuma | Alumbre | No | 60% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-03 | Amarillo | Espuma | Bentone SD-1 | No | 73% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-04 | Blanco | Espuma | Copolímero de estireno / alcohol alílico | Sí | 86% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-04 | Blanco | Espuma | Copolímero de estireno / alcohol alílico | Sí | 88% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-01 | Amarillo | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 91% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-01 | Blanco | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 87% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-01 | Celeste | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 92% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-02 | Transparente | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 87% |

Continuación Tabla 6. Identificación y clasificación del polímero por mes de recolección y matriz de las muestras de microplásticos.

| Mes de recolección | Matriz | Código de muestra | Color | Tipo de microplástico | Resultado | Polímero | Porcentaje de coincidencia |
|---------------------------|---------------|--------------------------|--------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| Noviembre | Sedimento | S.2-02 | Negro | Fibra | Polietileno de alta densidad | Sí | 86% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-04 | Morado | Fibra | Poliéster | Sí | 86% |
| Noviembre | Sedimento | S.2-04 | Verde | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 76% |
| Septiembre | Ríos | A.1-06 | na | Fibra | Nisina | No | 86% |
| Septiembre | Ríos | A.1-06 | na | Fibra | Carbonato de calcio | No | 74% |
| Septiembre | Ríos | A.1-07 | na | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 95% |
| Septiembre | Ríos | A.1-07 | na | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 96% |
| Septiembre | Ríos | A.1-06 | na | Film | Gelatina | No | 76% |
| Septiembre | Ríos | A.1-07 | na | Film | Gelatina | No | 76% |
| Septiembre | Ríos | A.1-06 | na | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 98% |
| Septiembre | Ríos | A.1-07 | na | Fragmento | Carbonato de calcio | No | 73% |
| Septiembre | Ríos | A.1-07 | na | Fragmento | Polietileno de alta densidad | Sí | 96% |
| Noviembre | Ríos | A.2-06 | Azul | Fibra | Carbonato de calcio | No | 71% |
| Noviembre | Ríos | A.2-07 | Rojo | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 96% |
| Noviembre | Ríos | A.2-06 | Verde | Fragmento | Polietileno de alta densidad | Sí | 95% |
| Noviembre | Ríos | A.2-06 | Celeste | Fragmento | Travertino | No | 73% |

Continuación Tabla 6. Identificación y clasificación del polímero por mes de recolección y matriz de las muestras de microplásticos.

| Mes de recolección | Matriz | Código de muestra | Color | Tipo de microplástico | Resultado | Polímero | Porcentaje de coincidencia |
|---------------------------|------------------|--------------------------|--------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| Noviembre | Ríos | A.2-06 | Azul | Fragmento | Travertino | No | 70% |
| Noviembre | Ríos | A.2-07 | Transparente | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 98% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-01 | na | Film | Polipropileno isotáctico | Sí | 92% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-02 | na | Film | Polipropileno isotáctico | Sí | 97% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-04 | na | Film | Polipropileno isotáctico | Sí | 91% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-01 | na | Espuma | Monoestearato de glicerilo | No | 79% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-02 | na | Espuma | Poliestireno | Sí | 87% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-02 | na | Espuma | Poliestireno | Sí | 90% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-04 | na | Espuma | Poliestireno de alto impacto | Sí | 85% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-04 | na | Espuma | Poliestireno | Sí | 95% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-02 | na | Fibra | Mordenita | No | 76% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-03 | na | Fibra | Nisina | No | 89% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-03 | na | Fibra | Tierra de diatomeas | No | 73% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-04 | na | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 96% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-01 | na | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 79% |

Continuación Tabla 6. Identificación y clasificación del polímero por mes de recolección y matriz de las muestras de microplásticos.

| Mes de recolección | Matriz | Código de muestra | Color | Tipo de microplástico | Resultado | Polímero | Porcentaje de coincidencia |
|---------------------------|------------------|--------------------------|--------------|------------------------------|--|-----------------|-----------------------------------|
| Septiembre | Agua superficial | A.1-02 | na | Fragmento | Polietileno de alta densidad | Sí | 97% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-04 | na | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 94% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-04 | na | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 97% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-01 | na | Microesfera | Leucita | No | 65% |
| Septiembre | Agua superficial | A.1-04 | na | Microesfera | Polipropileno isotáctico | Sí | 88% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-04 | Café | Espuma | Passiflora (Passion Flower) | No | 81% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-04 | Blanco | Espuma | Copolímero de estireno / alcohol alílico | Sí | 86% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-01 | Azul | Fibra | Polipropileno | Sí | 80% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-02 | Azul | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 92% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-05 | Rosado | Fibra | Polipropileno isotáctico | Sí | 87% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-03 | Negro | Fibra | Tereftalato de polibutileno | Sí | 86% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-01 | Negro | Fragmento | Polietileno de alta densidad | Sí | 97% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-02 | Verde | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 98% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-02 | Transparente | Fragmento | Tierra de diatomeas | No | 81% |

Continuación Tabla 6. Identificación y clasificación del polímero por mes de recolección y matriz de las muestras de microplásticos.

| Mes de recolección | Matriz | Código de muestra | Color | Tipo de microplástico | Resultado | Polímero | Porcentaje de coincidencia |
|---------------------------|------------------|--------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| Noviembre | Agua superficial | A.2-02 | Azul | Fragmento | Resina de poliamida | Sí | 84% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-03 | Azul | Fragmento | Polietileno de alta densidad | Sí | 96% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-04 | Transparente | Fragmento | Nonadecano | No | 74% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-04 | Rosado | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 94% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-04 | Celeste | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 94% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-04 | Amarillo | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 84% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-05 | Blanco | Fragmento | Polipropileno isotáctico | Sí | 93% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-05 | Azul | Fragmento | Polietileno de alta densidad | Sí | 97% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-04 | Transparente | Microesfera | Polietileno clorado | Sí | 66% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-04 | Blanco | Microesfera | Cloruro de estearalconio | No | 72% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-04 | Negro | Microesfera | Polietileno lineal de baja densidad | Sí | 78% |
| Noviembre | Agua superficial | A.2-05 | Transparente | Microesfera | Polipropileno isotáctico | Sí | 93% |

La Tabla 6 muestra los resultados de la identificación del tipo de polímero al que pertenece cada microplástico analizado, con el código de muestra, la matriz, la forma de microplástico, el mes de recolección y el porcentaje de coincidencia según el software Spectrum del espectrómetro de un solo rango Frontier IR con un accesorio universal ATR. En esta tabla se incluyen también los resultados que no se identificaron como polímeros.

Figura 19. Espectro infrarrojo de fragmento azul S.1-01 de sedimentos.

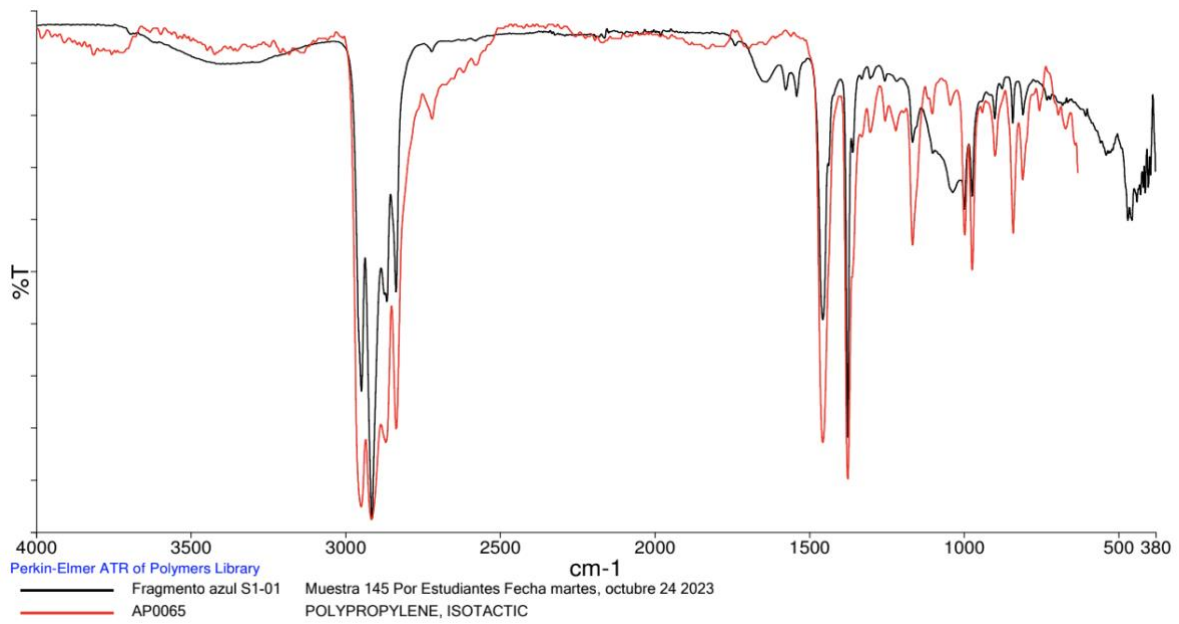


Figura 20. Espectro infrarrojo de fragmento blanco S.1-02 de sedimentos.

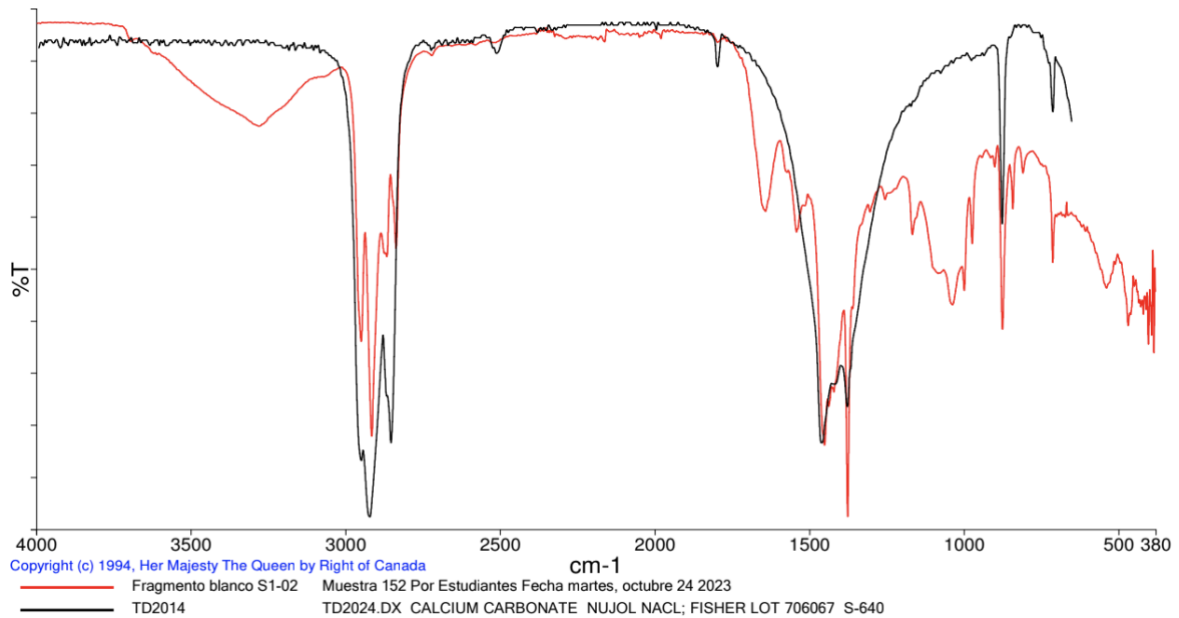


Figura 21. Espectro infrarrojo de fragmento celeste S.1-03 de sedimentos.

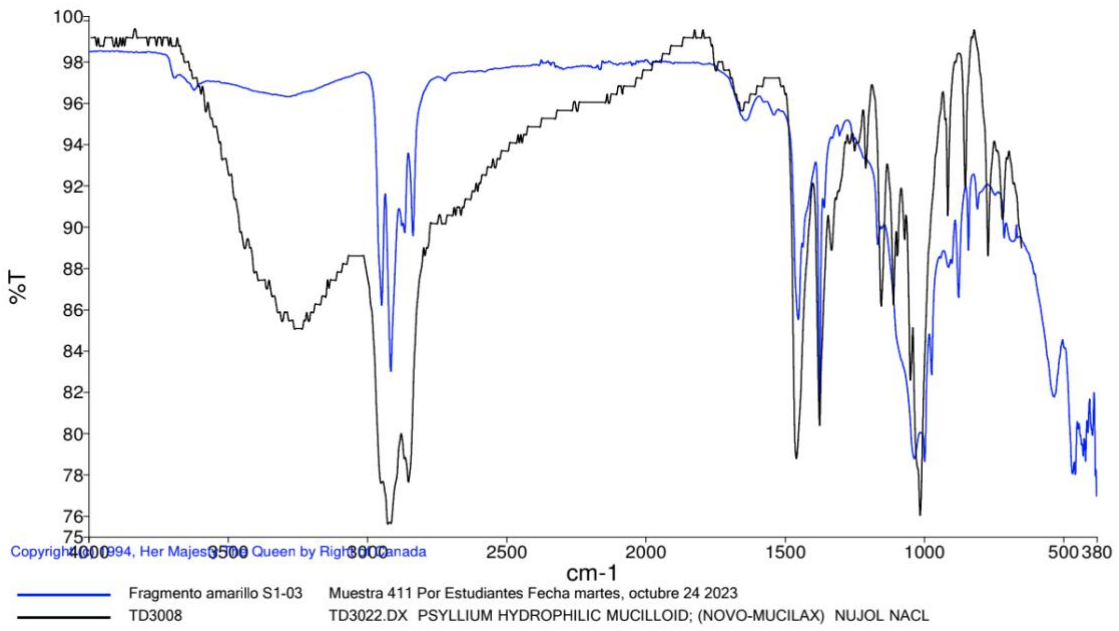


Figura 22. Espectro infrarrojo de espuma blanca S.1-02 de sedimentos.

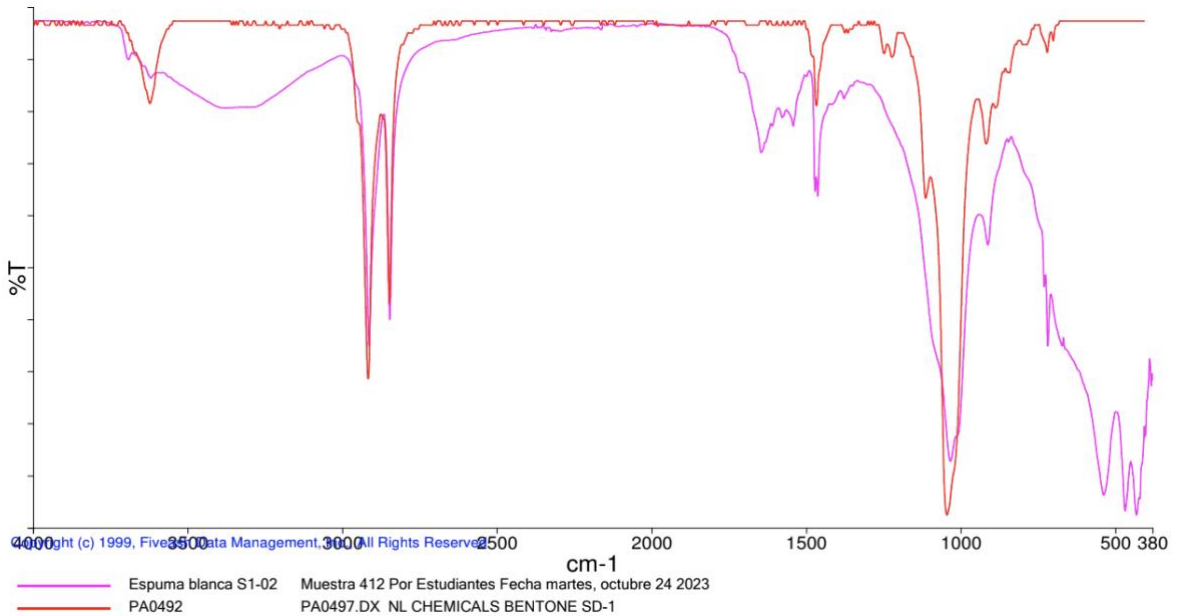


Figura 23. Espectro infrarrojo de espuma café S.1-02 de sedimentos.

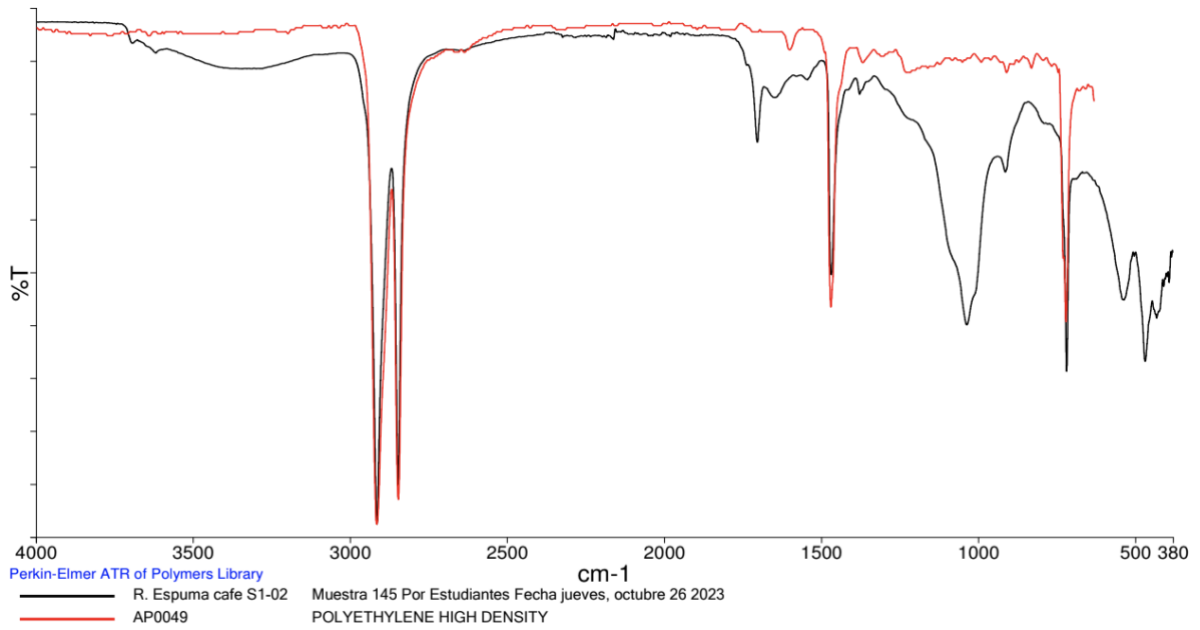


Figura 24. Espectro infrarrojo de espuma café S.1-05 de sedimentos.

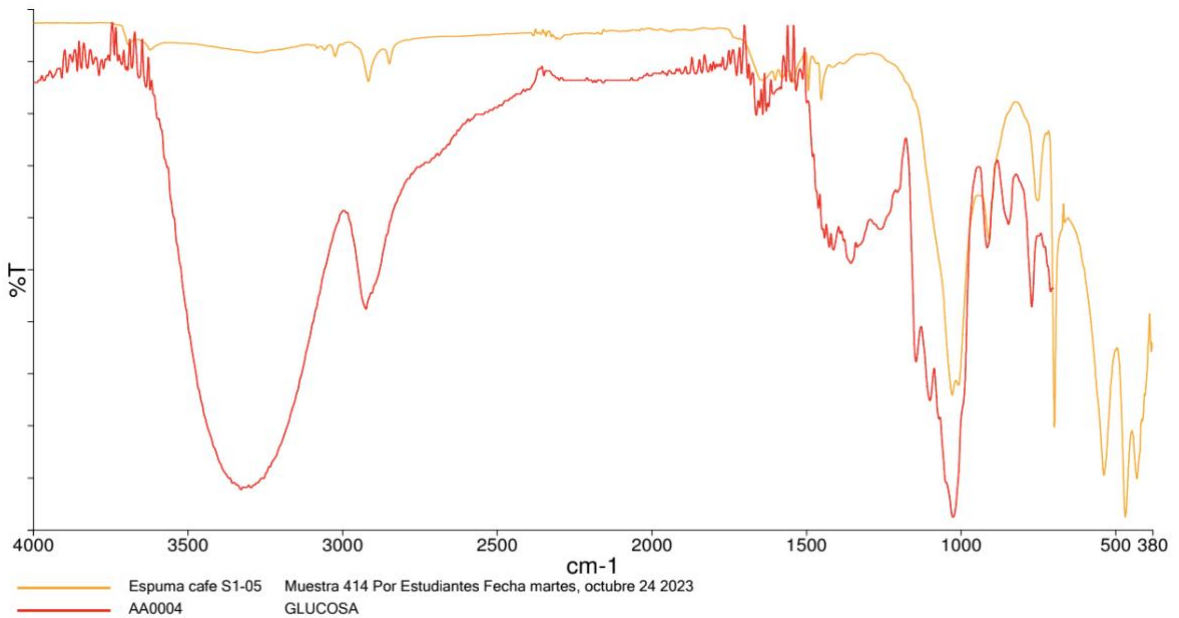


Figura 25. Espectro infrarrojo de fibra amarilla S.1-05 de sedimentos.

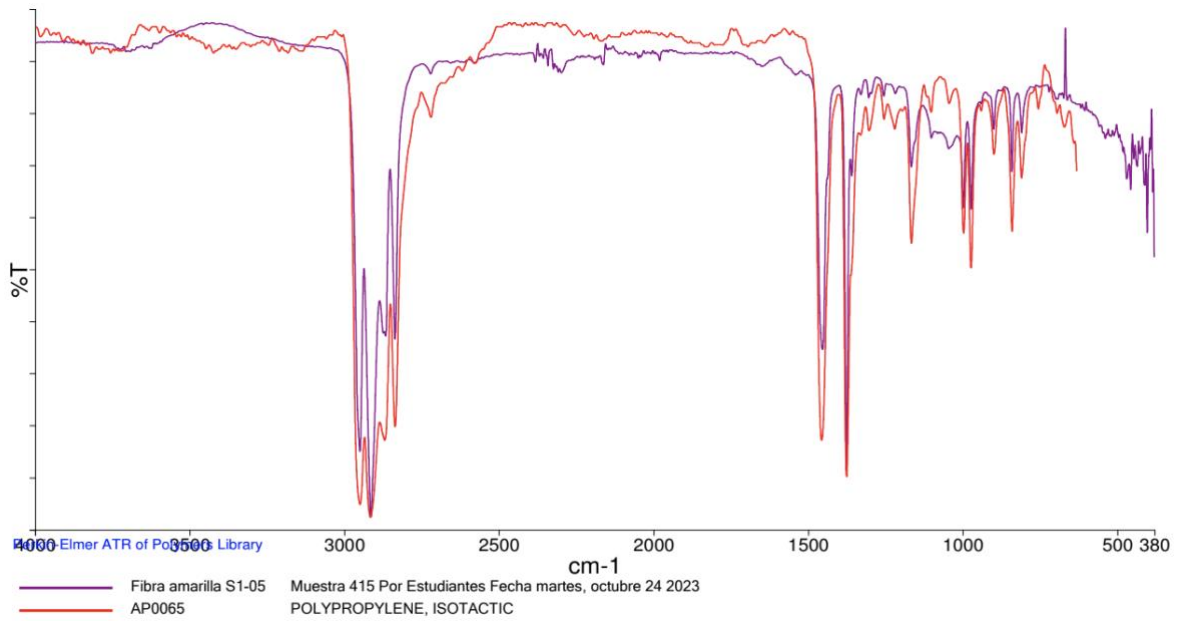


Figura 26. Espectro infrarrojo de fibra amarilla S.1-04 de sedimentos.

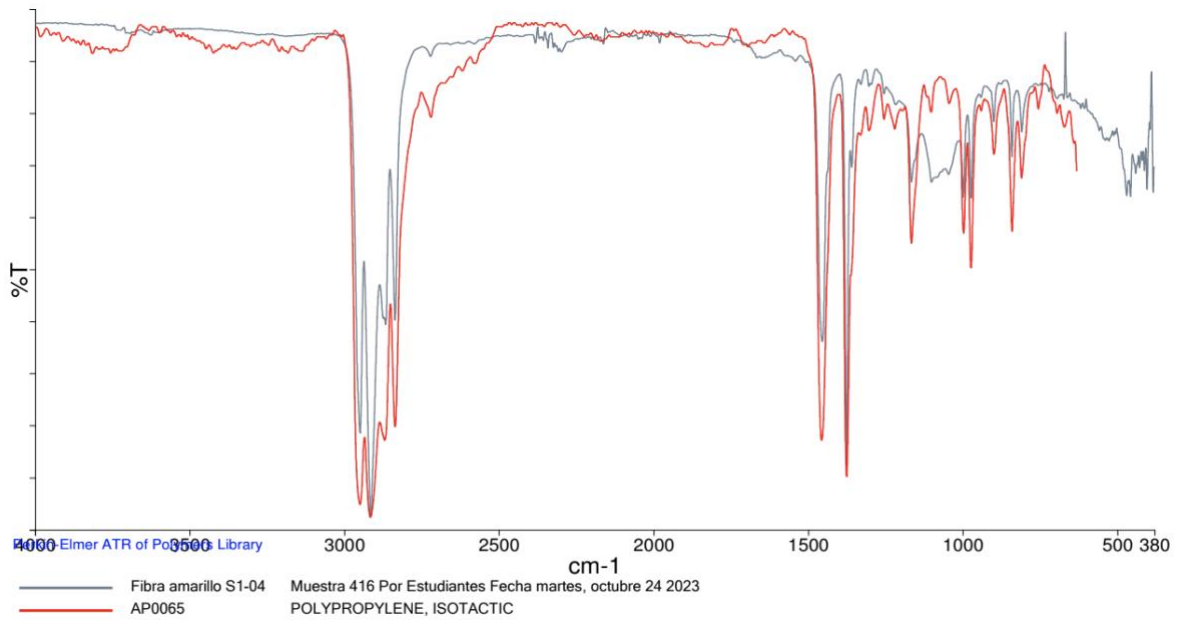


Figura 27. Espectro infrarrojo de fibra morada S.1-03 de sedimentos.

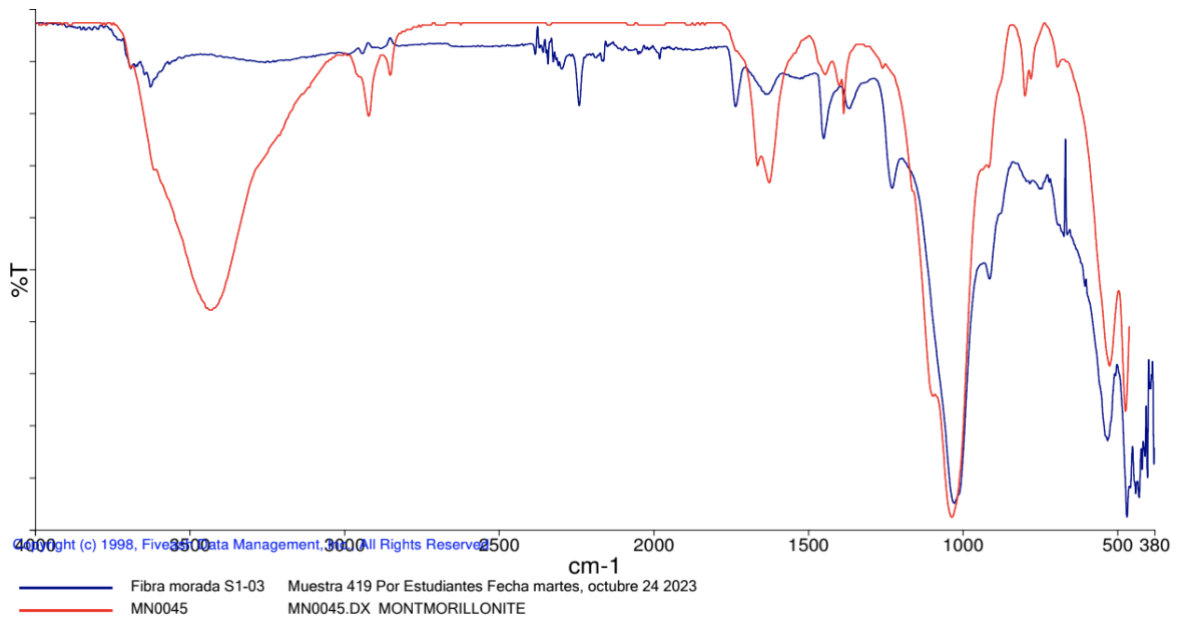


Figura 28. Espectro infrarrojo de fibra blanca S.1-01 de sedimentos.

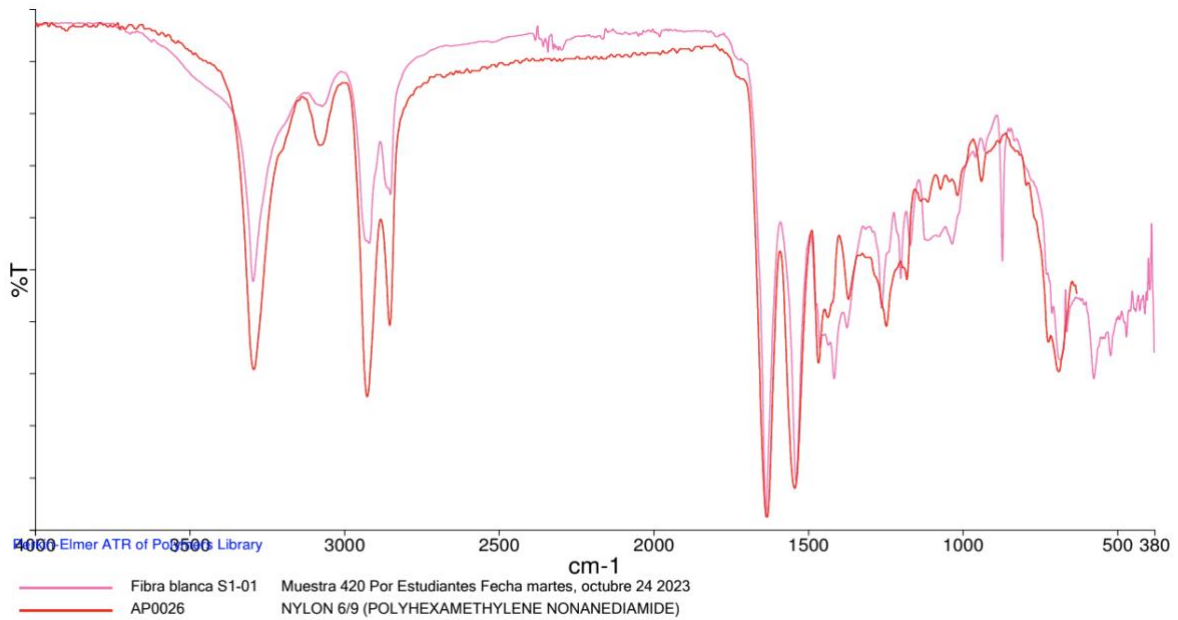


Figura 29. Espectro infrarrojo de fibra morada S.1-01 de sedimentos.

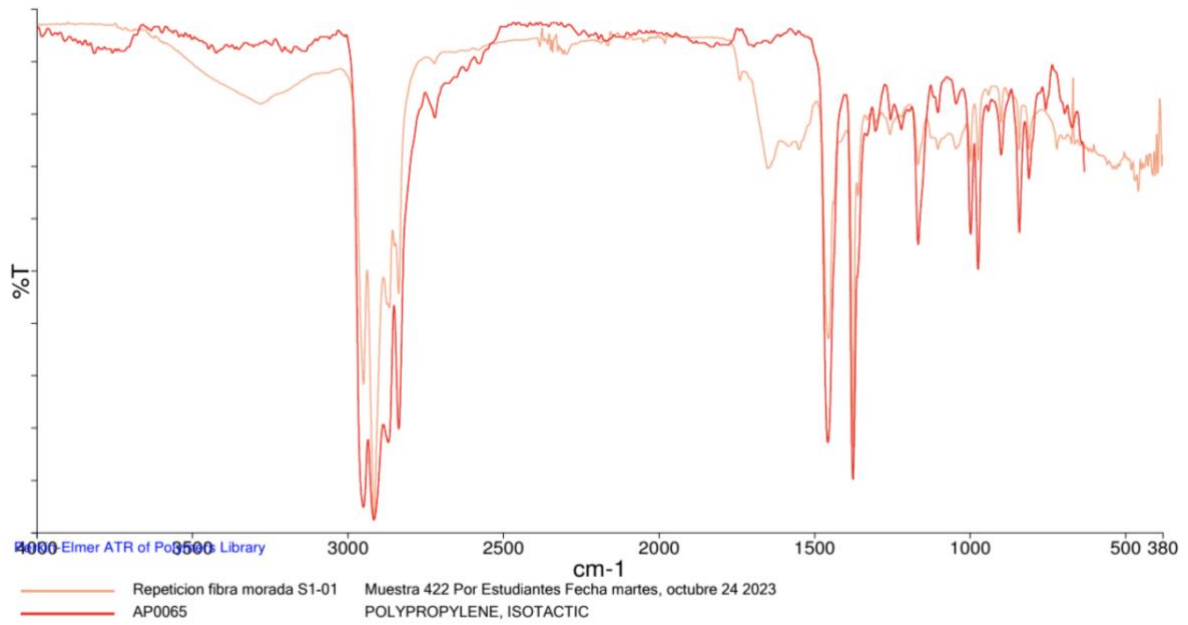


Figura 30. Espectro infrarrojo de film transparente S.1-05 de sedimentos.

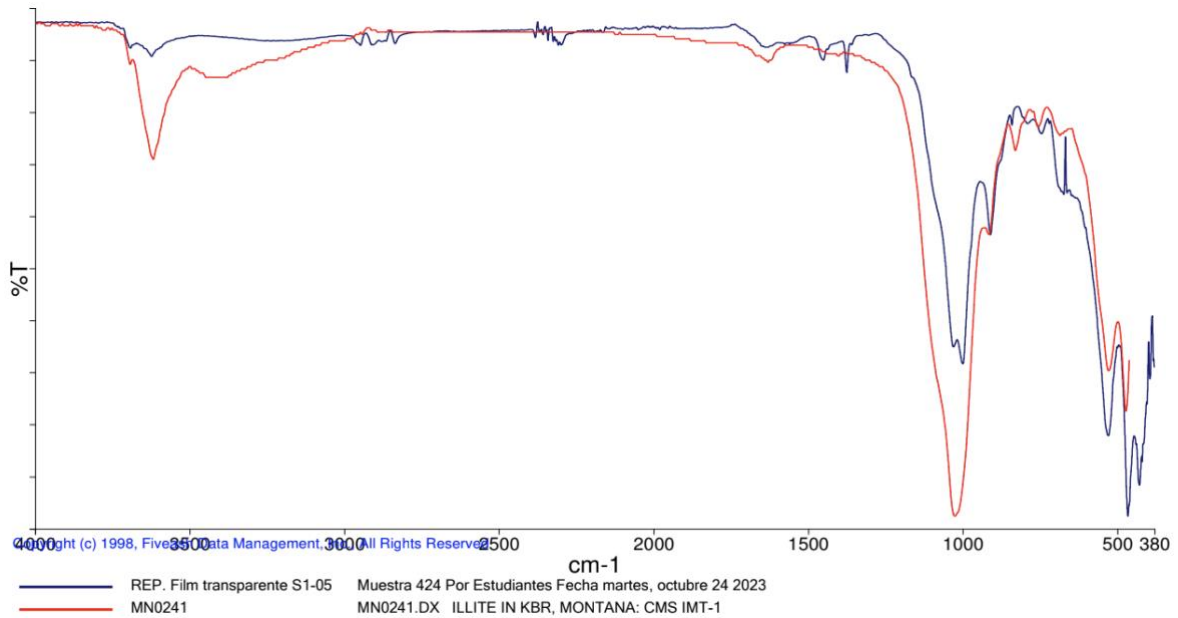


Figura 31. Espectro infrarrojo de film café S.1-05 de sedimentos.

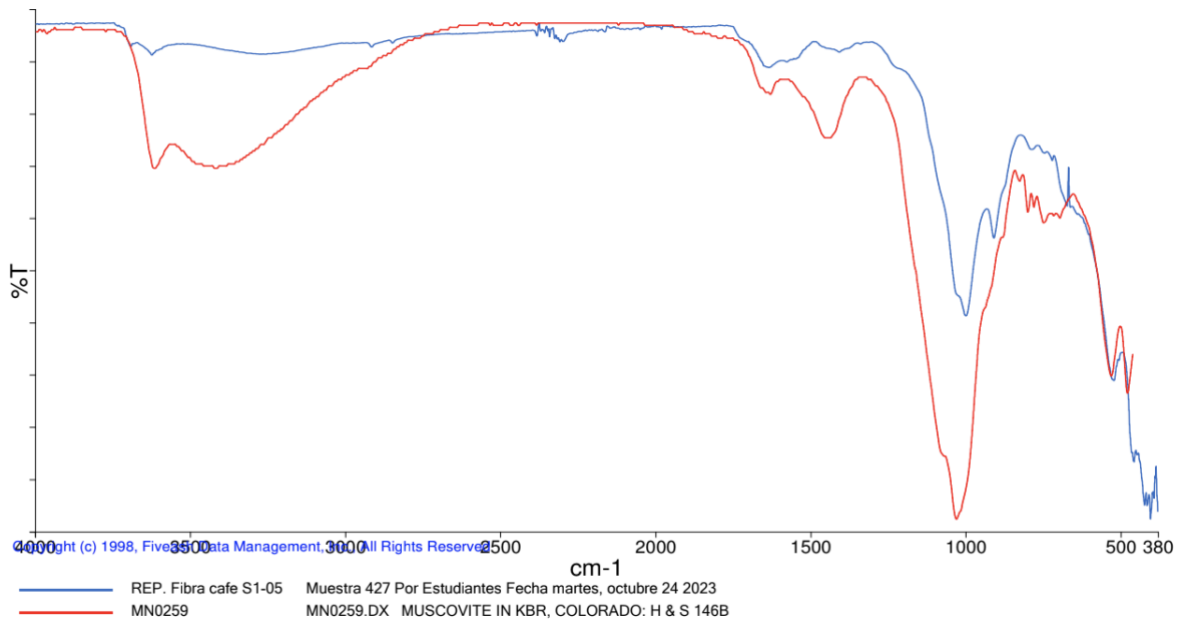


Figura 32. Espectro infrarrojo de film transparente S.1-04 de sedimentos.

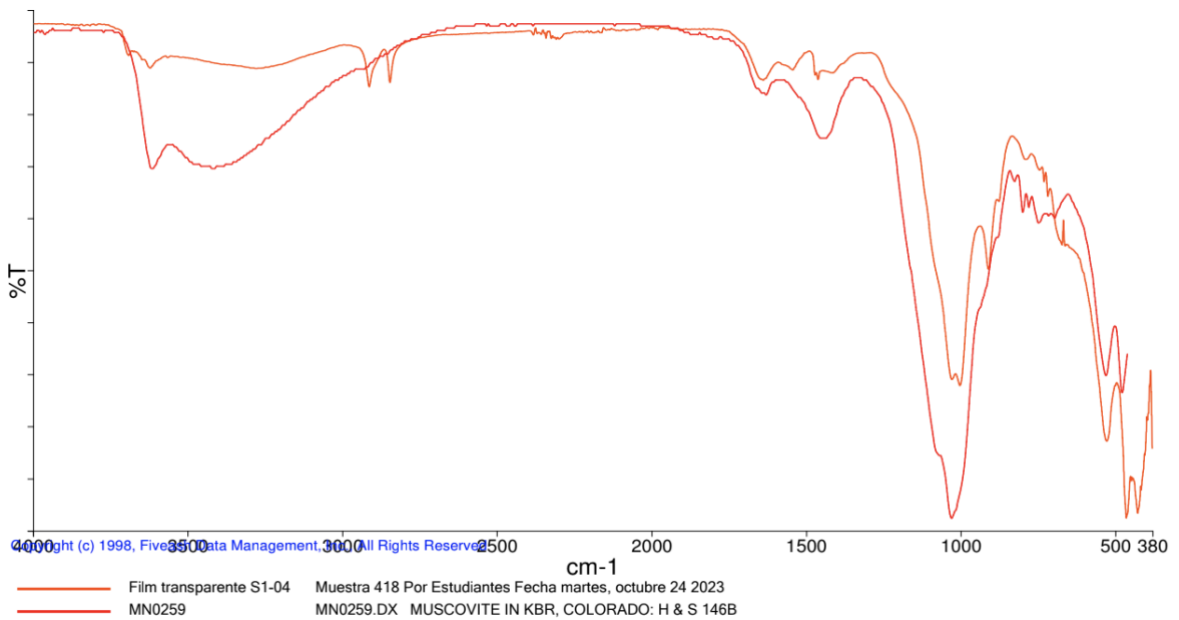


Figura 33. Espectro infrarrojo de film transparente S.2-01 de sedimentos.

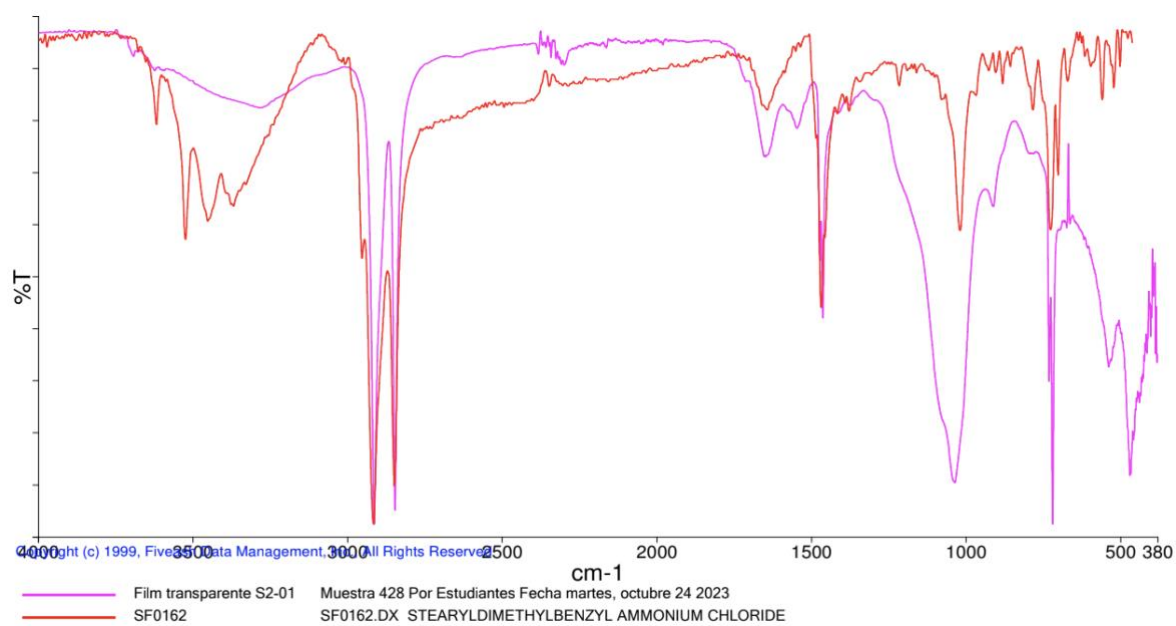


Figura 34. Espectro infrarrojo de film amarillo S.2-02 de sedimentos.

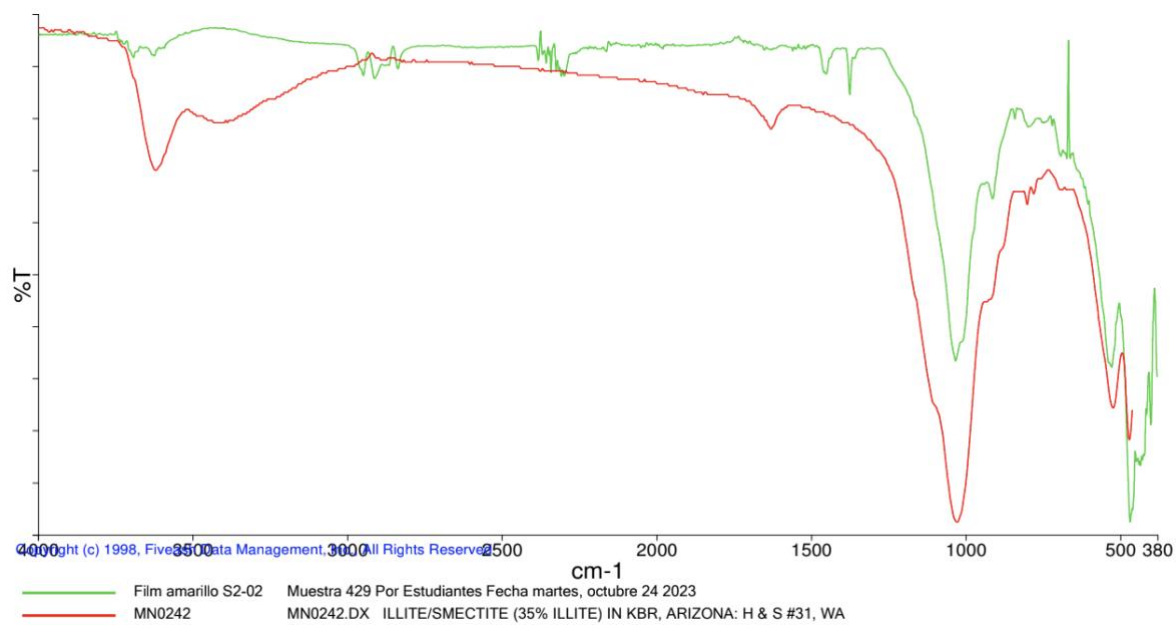


Figura 35. Espectro infrarrojo de film café S.2-02 de sedimentos.

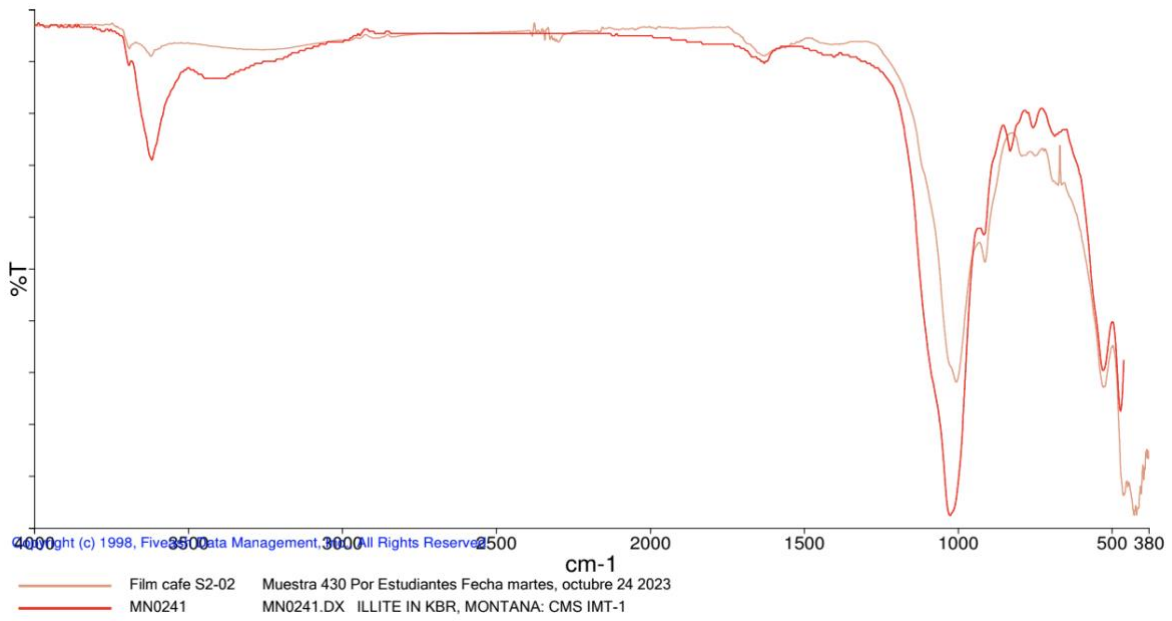


Figura 36. Espectro infrarrojo de film transparente S.2-05 de sedimentos.

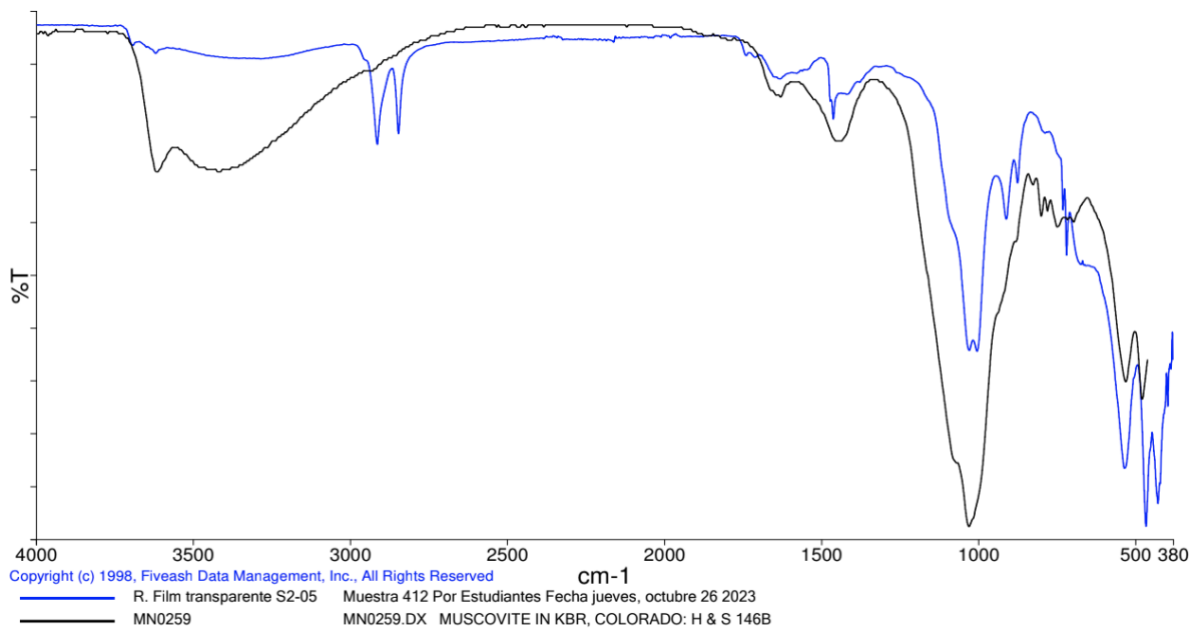


Figura 37. Espectro infrarrojo de film verde S.2-05 de sedimentos.

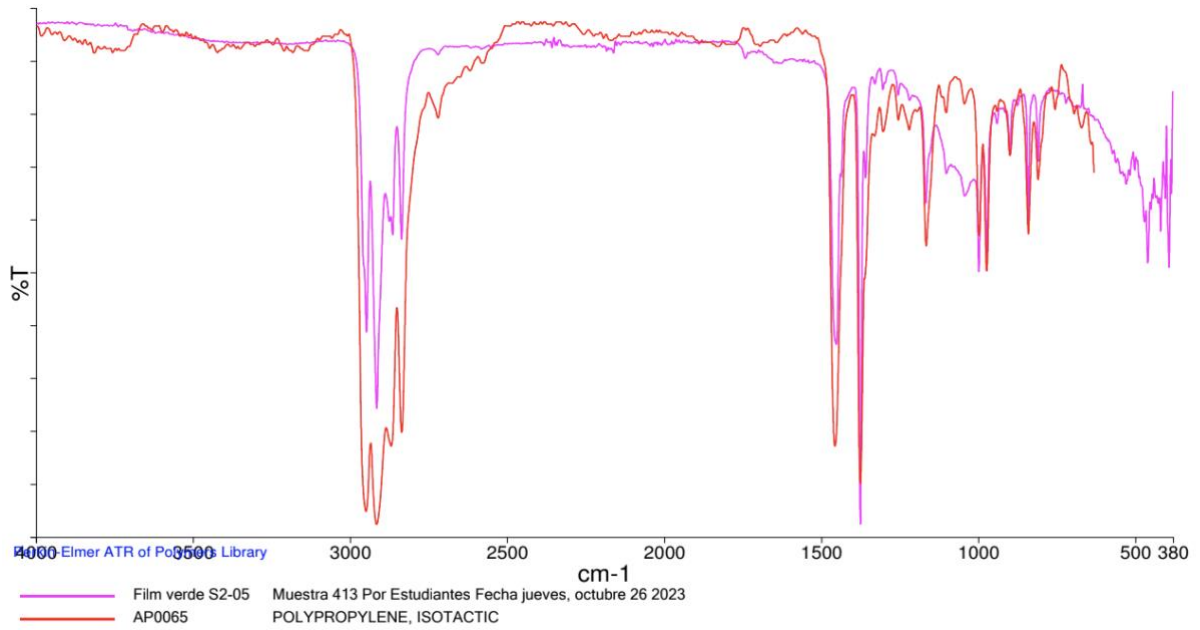


Figura 38. Espectro infrarrojo de fragmento rojo S.2-02 de sedimentos.

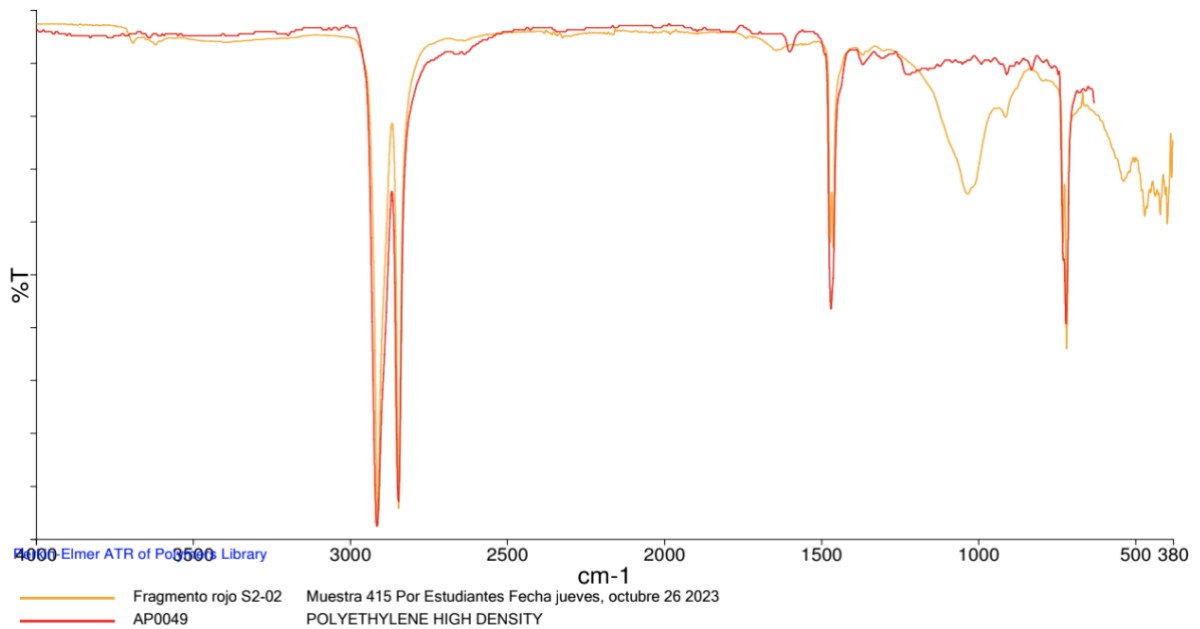


Figura 39. Espectro infrarrojo de fragmento anaranjado S.2-03 de sedimentos.

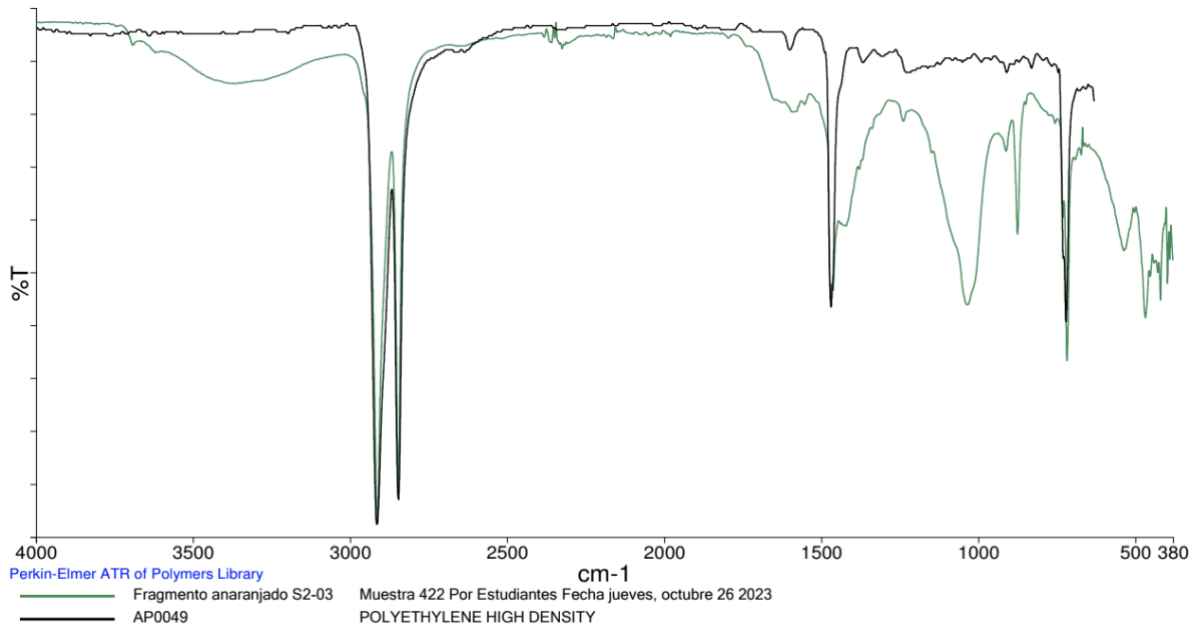


Figura 40. Espectro infrarrojo de fragmento celeste S.2-01 de sedimentos.

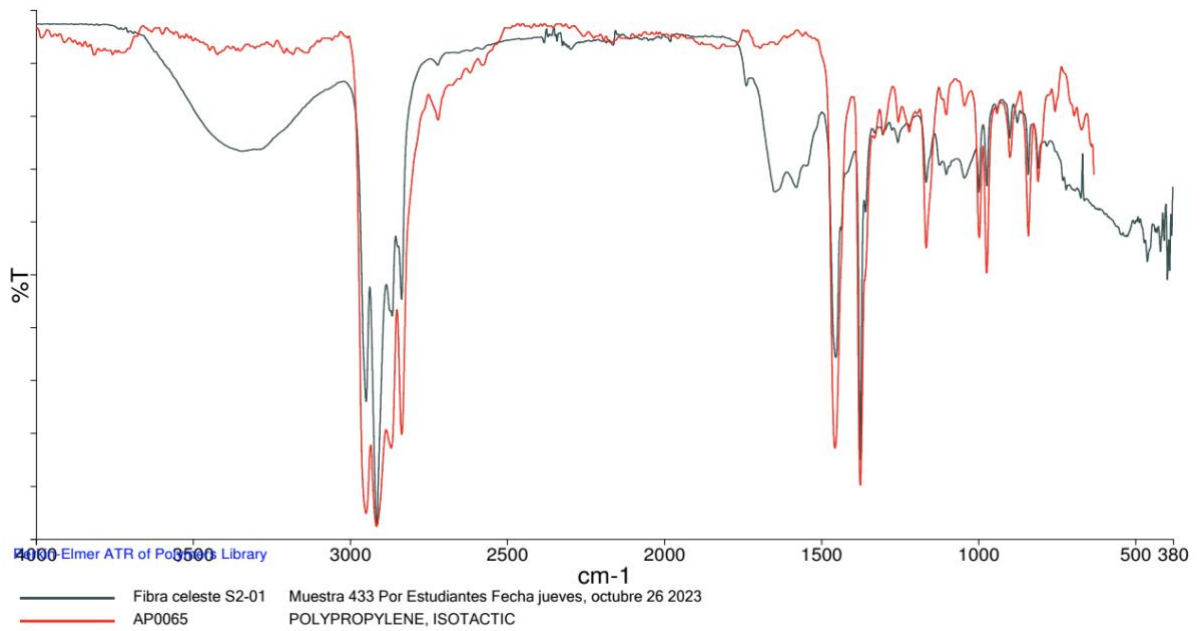


Figura 41. Espectro infrarrojo de fragmento azul S.2-05 de sedimentos.

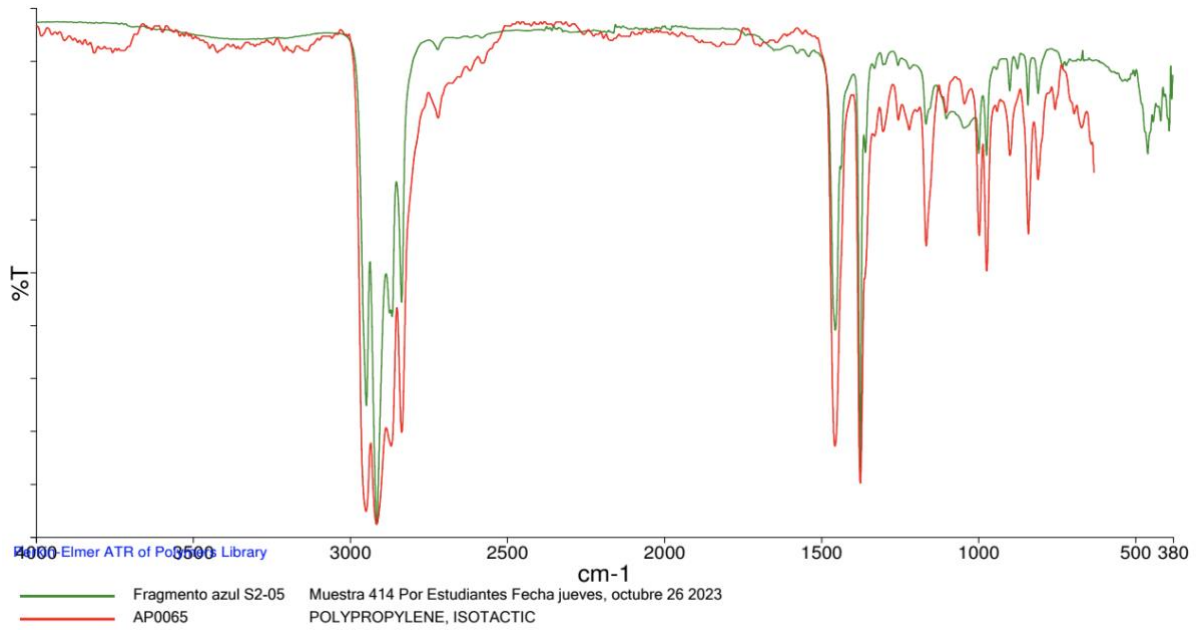


Figura 42. Espectro infrarrojo de espuma amarilla S.2-02 de sedimentos.

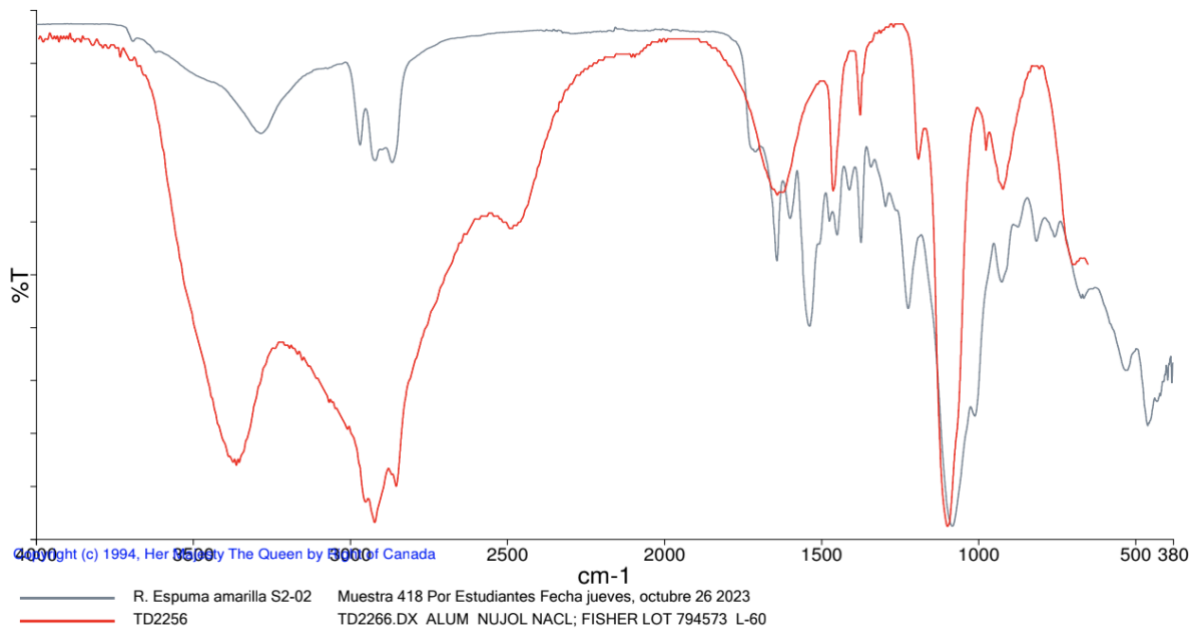


Figura 43. Espectro infrarrojo de espuma amarilla S.2-03 de sedimentos.

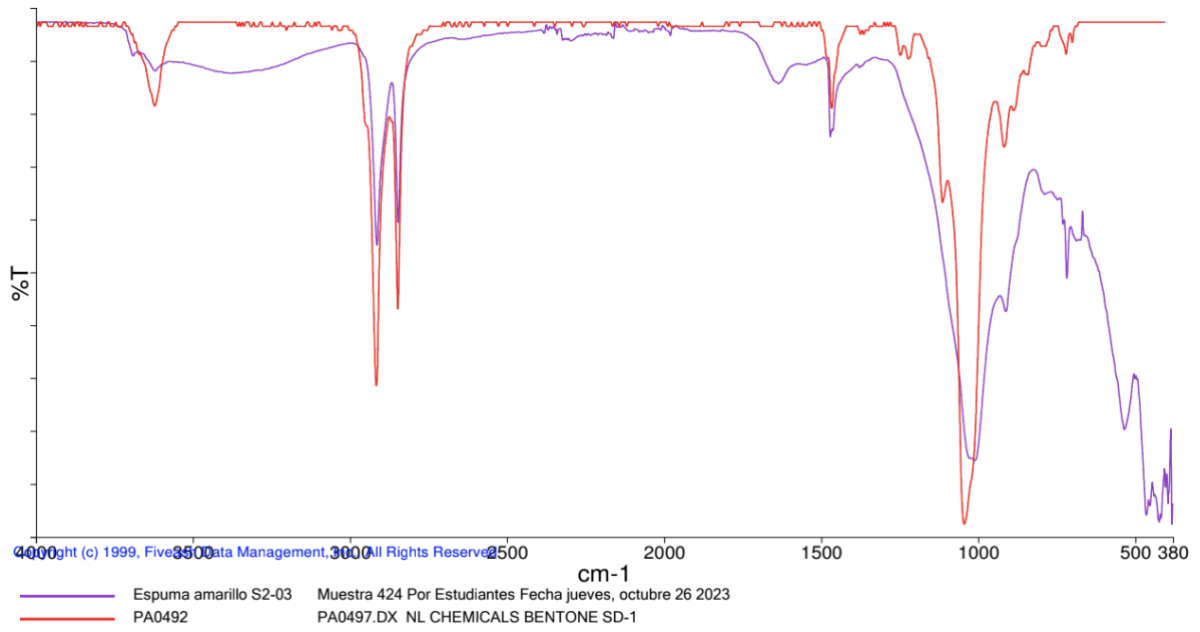


Figura 44. Espectro infrarrojo de espuma blanca S.2-04 de sedimentos.

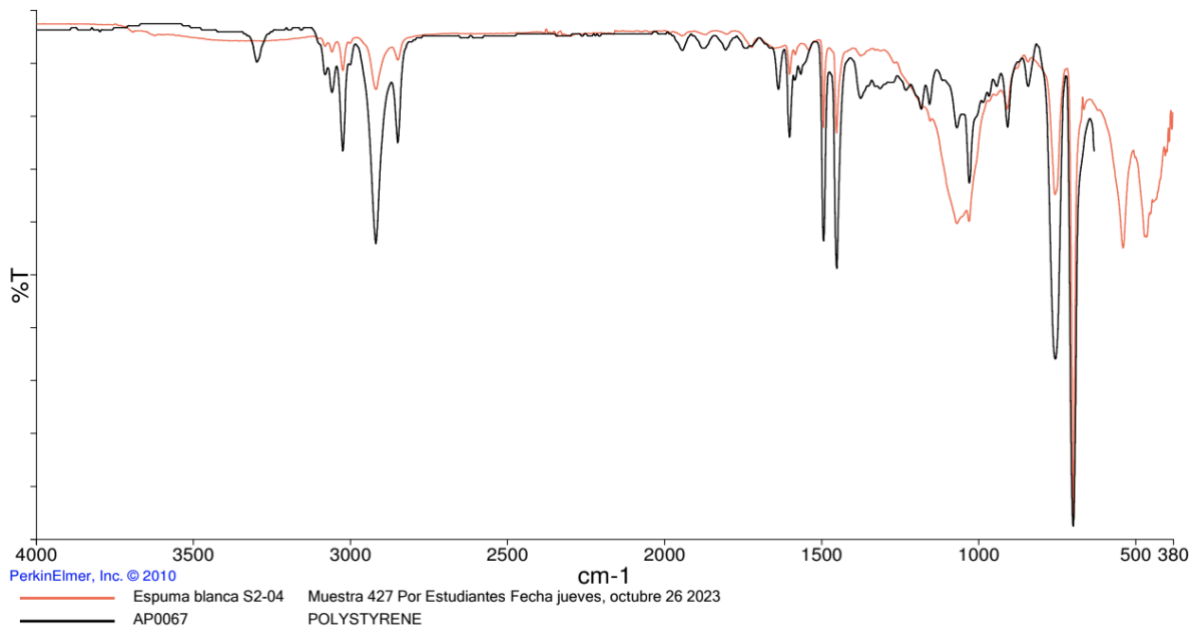


Figura 45. Espectro infrarrojo de espuma blanca S.2-04 de sedimentos.

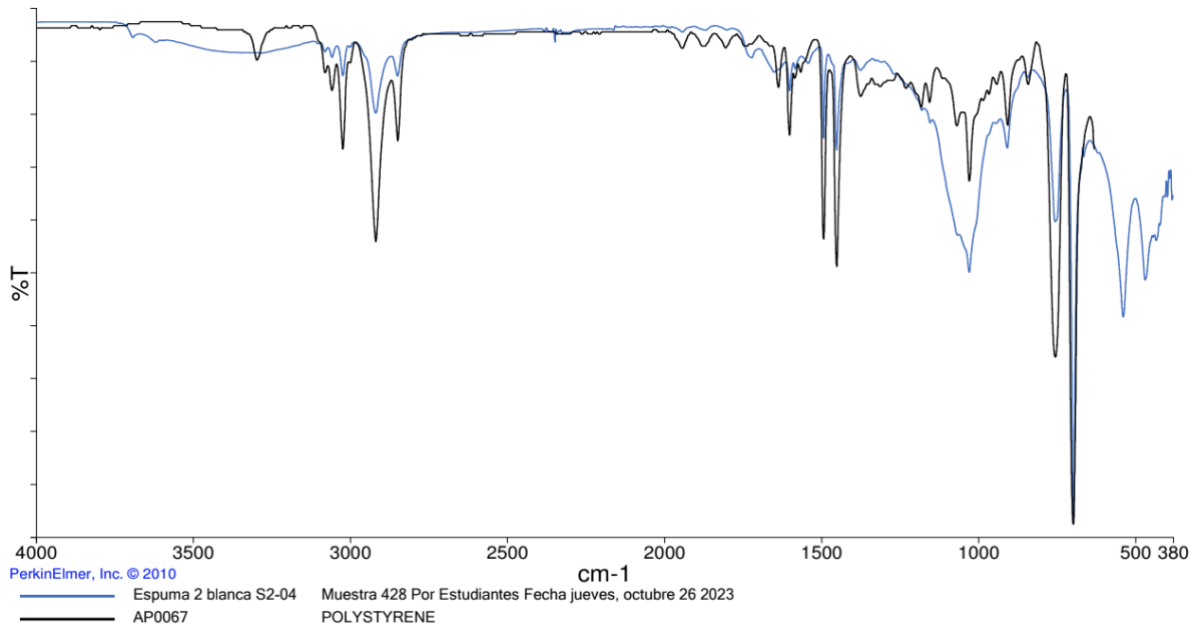


Figura 46. Espectro infrarrojo de fibra amarilla S.2-01 de sedimentos.

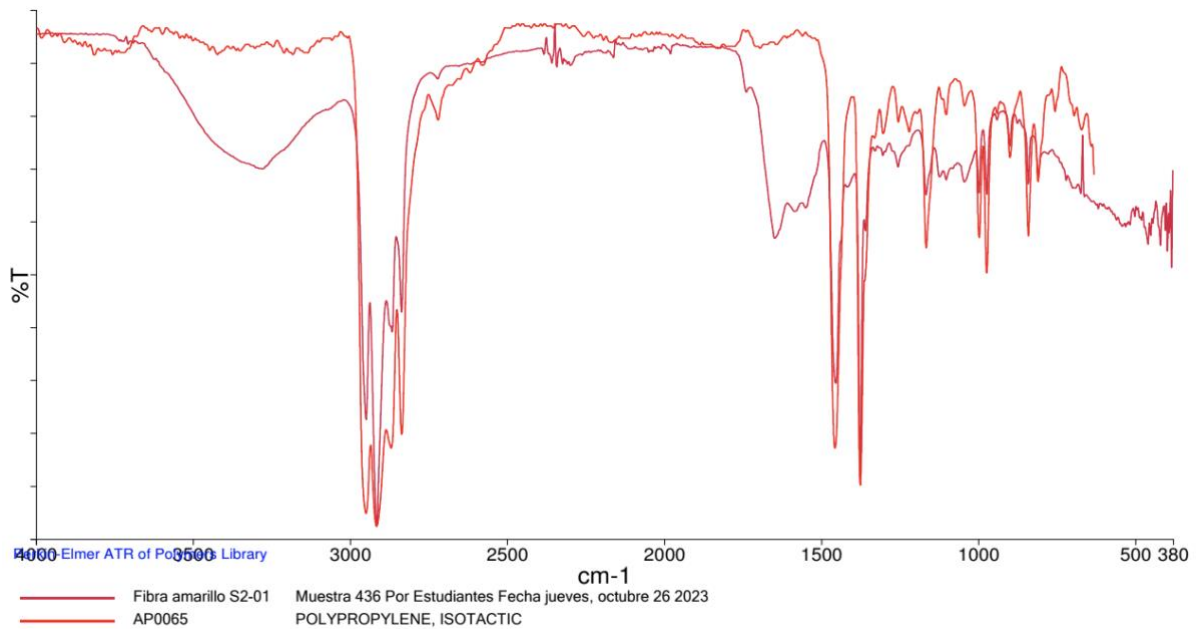


Figura 47. Espectro infrarrojo de fibra blanca S.2-01 de sedimentos.

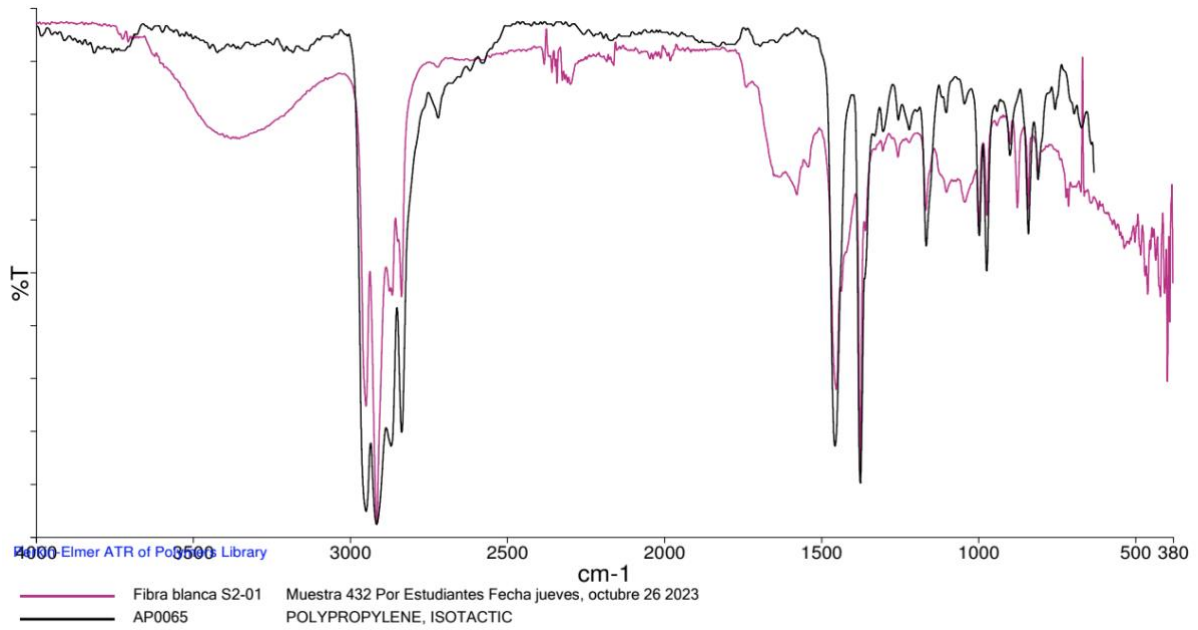


Figura 48. Espectro infrarrojo de fibra celeste S.2-01 de sedimentos.

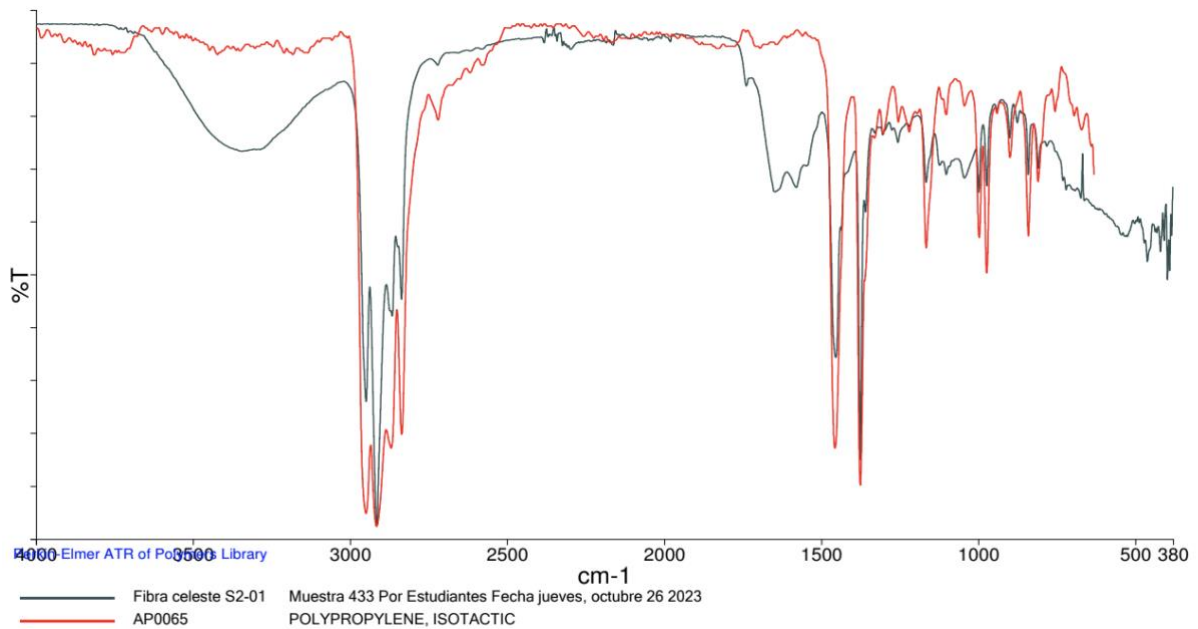


Figura 49. Espectro infrarrojo de fibra transparente S.2-02 de sedimentos.

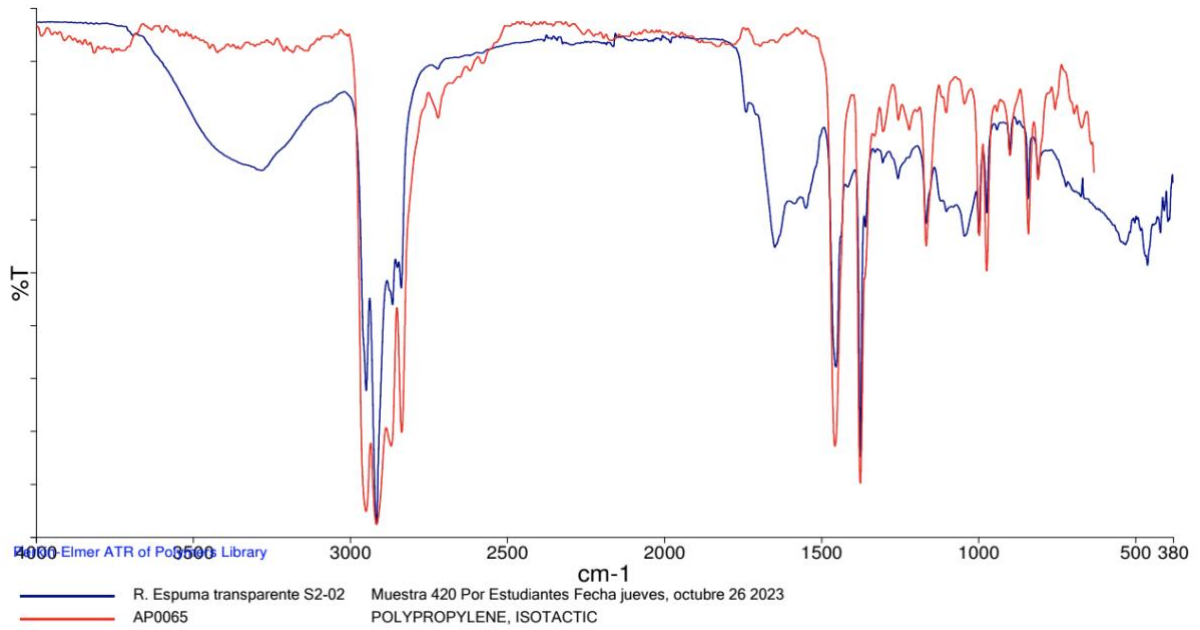


Figura 50. Espectro infrarrojo de fibra negra S.2-02 de sedimentos.

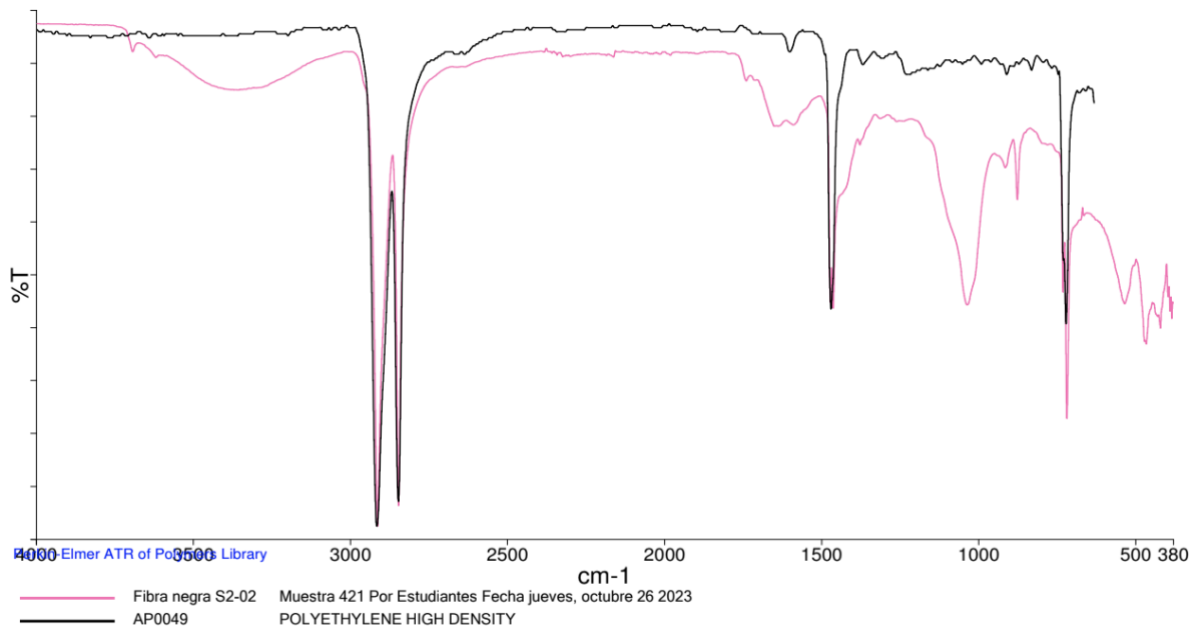


Figura 51. Espectro infrarrojo de fibra morada S.2-04 de sedimentos.

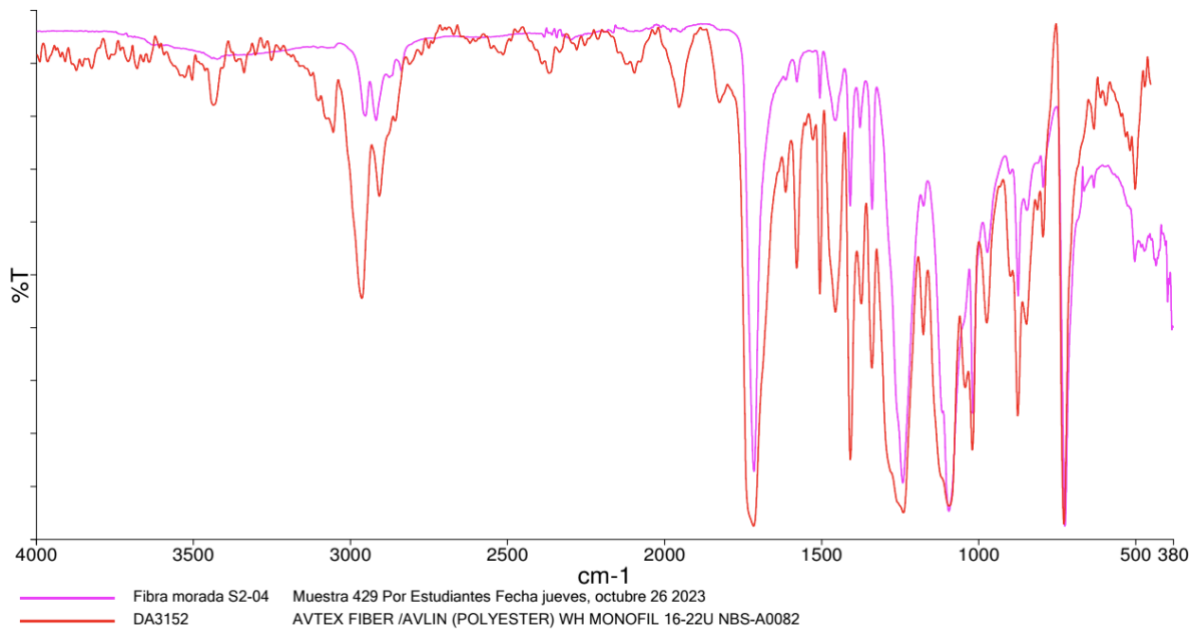


Figura 52. Espectro infrarrojo de fibra verde S.2-04 de sedimentos.

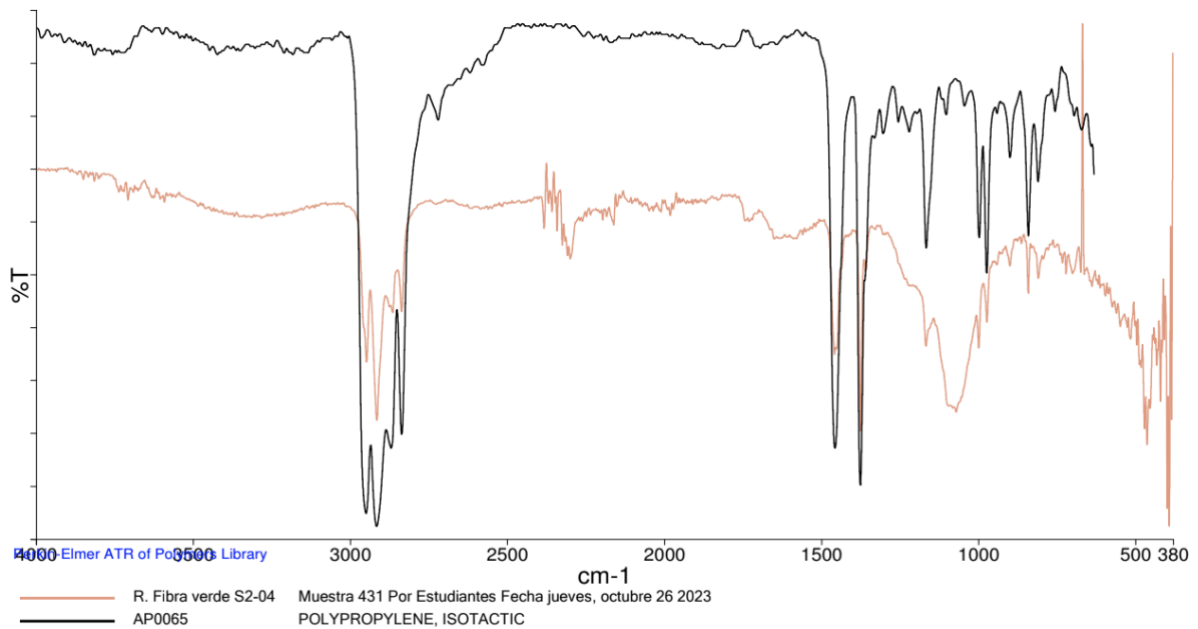


Figura 53. Espectro infrarrojo de fibra A.1-06 de ríos.

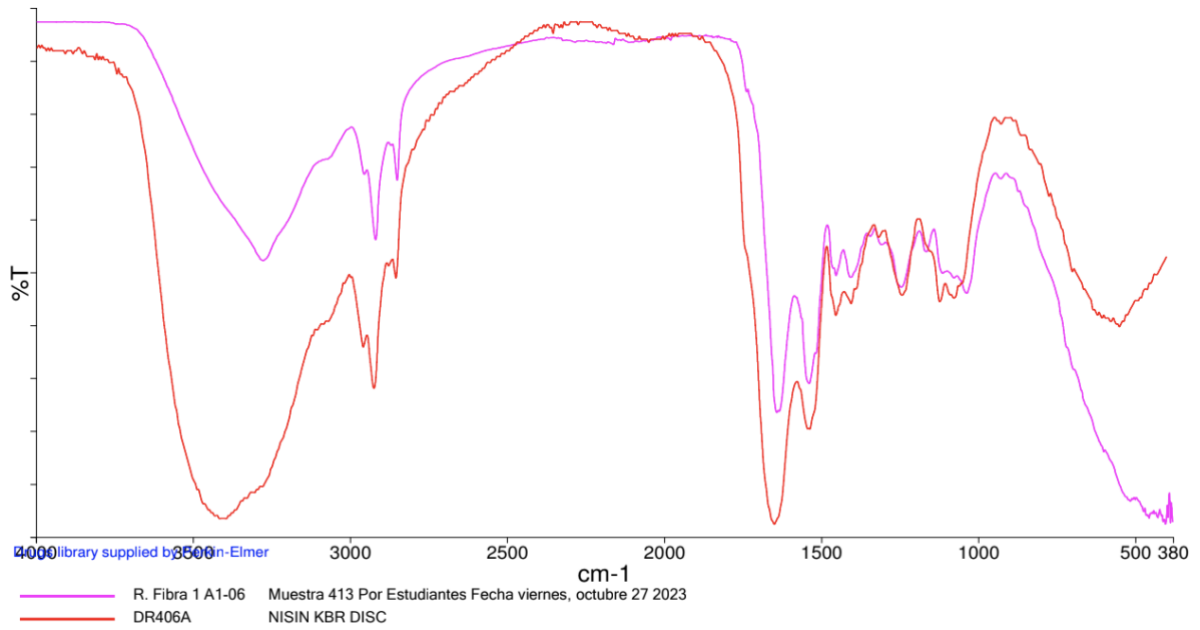


Figura 54. Espectro infrarrojo de fibra 2 A.1-06 de ríos.

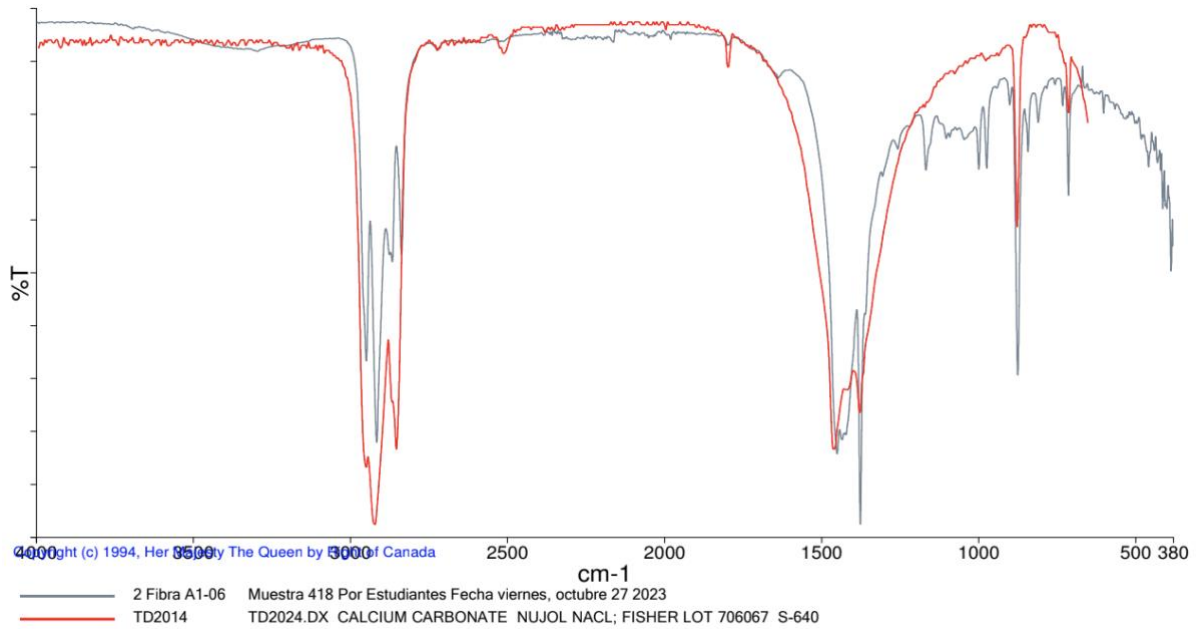


Figura 55. Espectro infrarrojo de fibra A.1-07 de ríos.

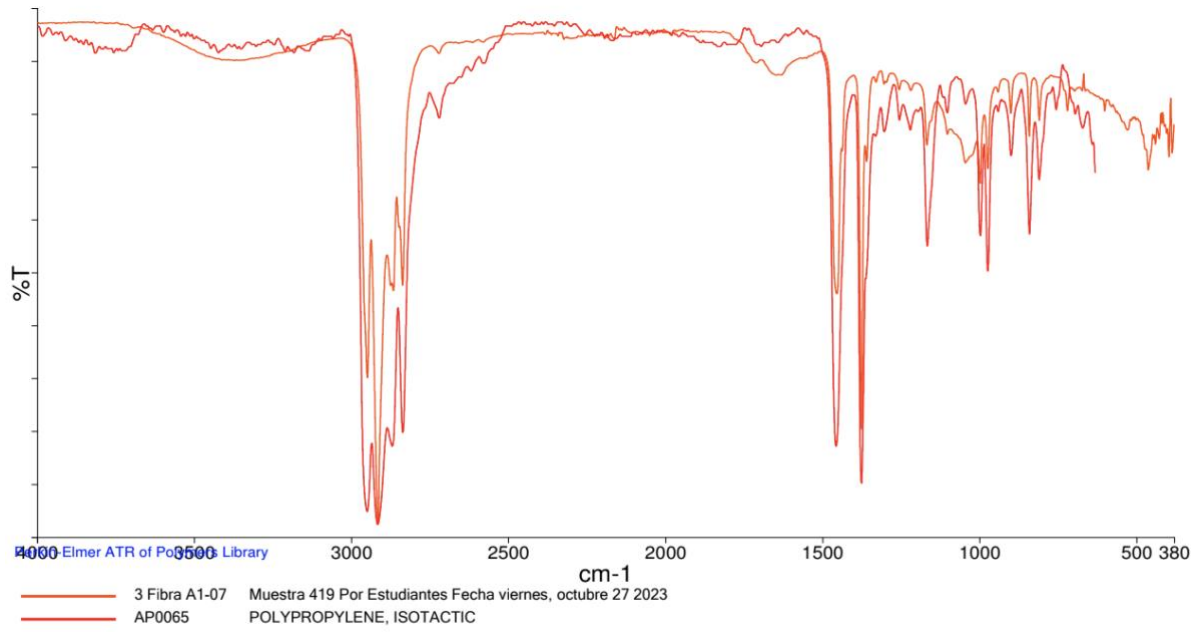


Figura 56. Espectro infrarrojo de fibra 2 A.1-07 de ríos.

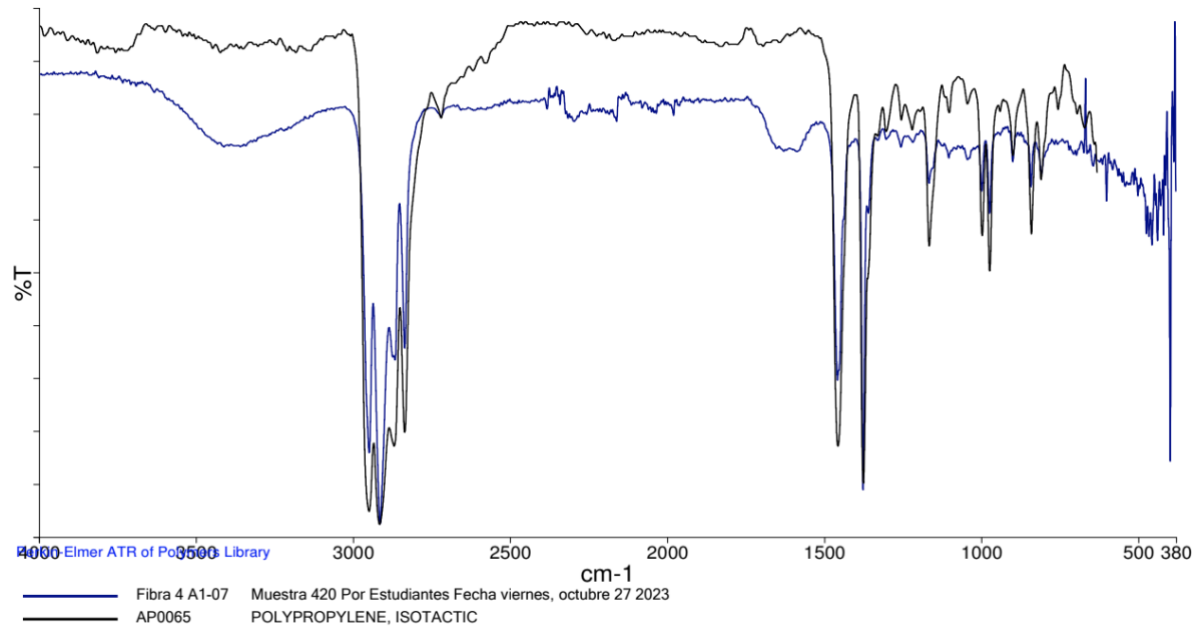


Figura 57. Espectro infrarrojo de film A.1-06 de ríos.

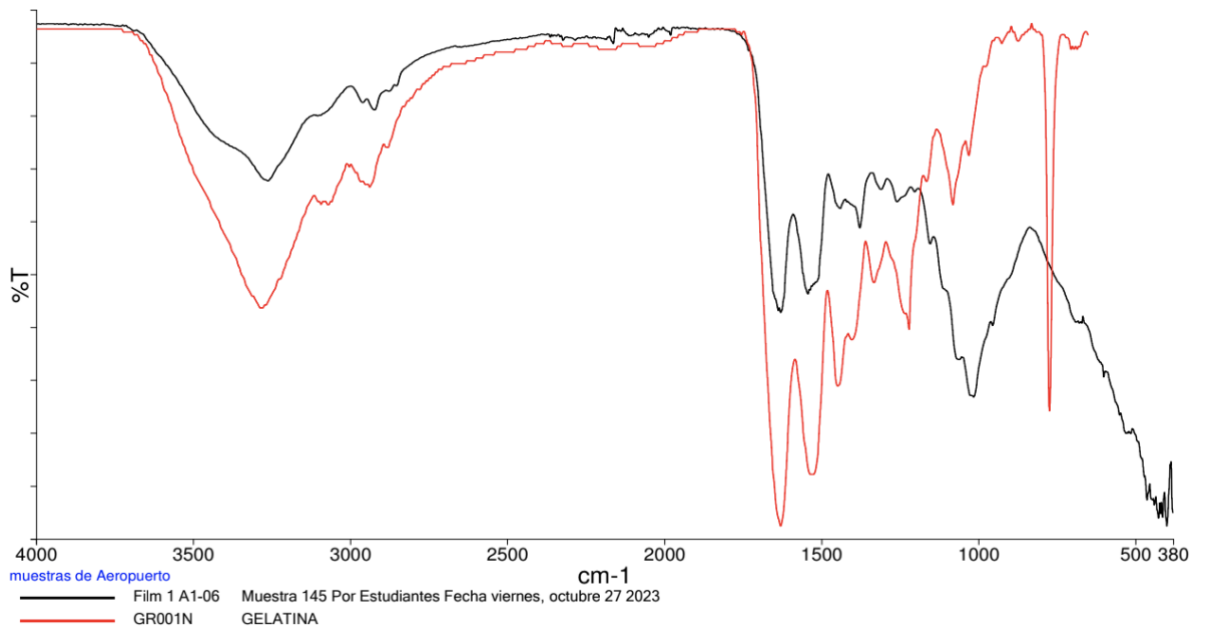


Figura 58. Espectro infrarrojo de film A.1-07 de ríos.

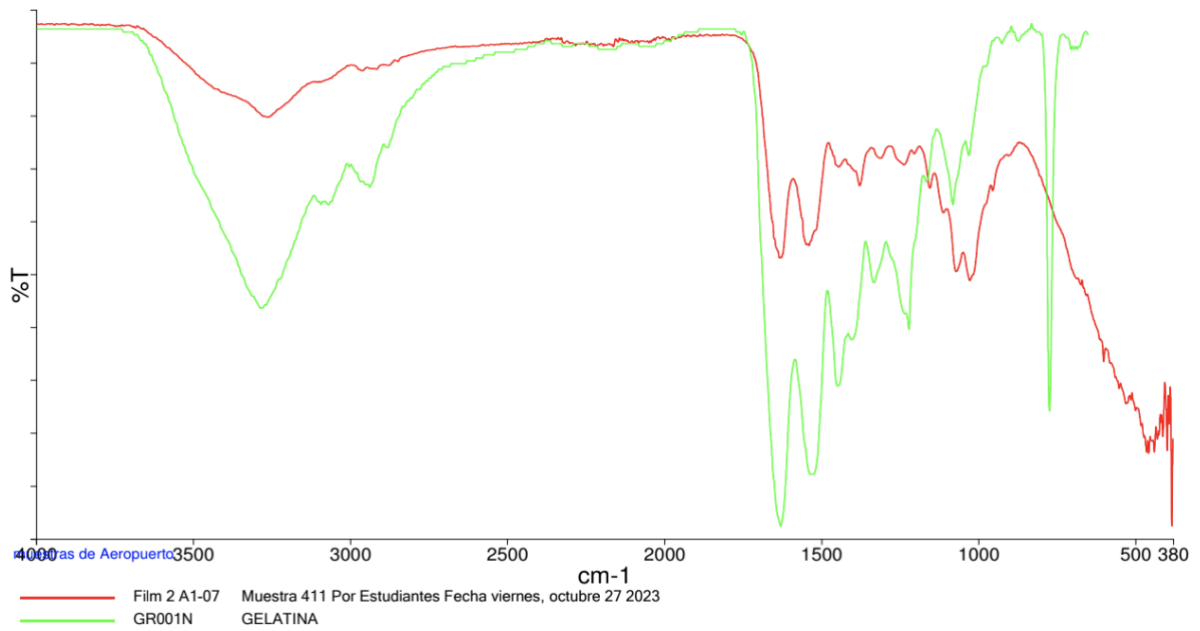


Figura 59. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-06 de ríos.

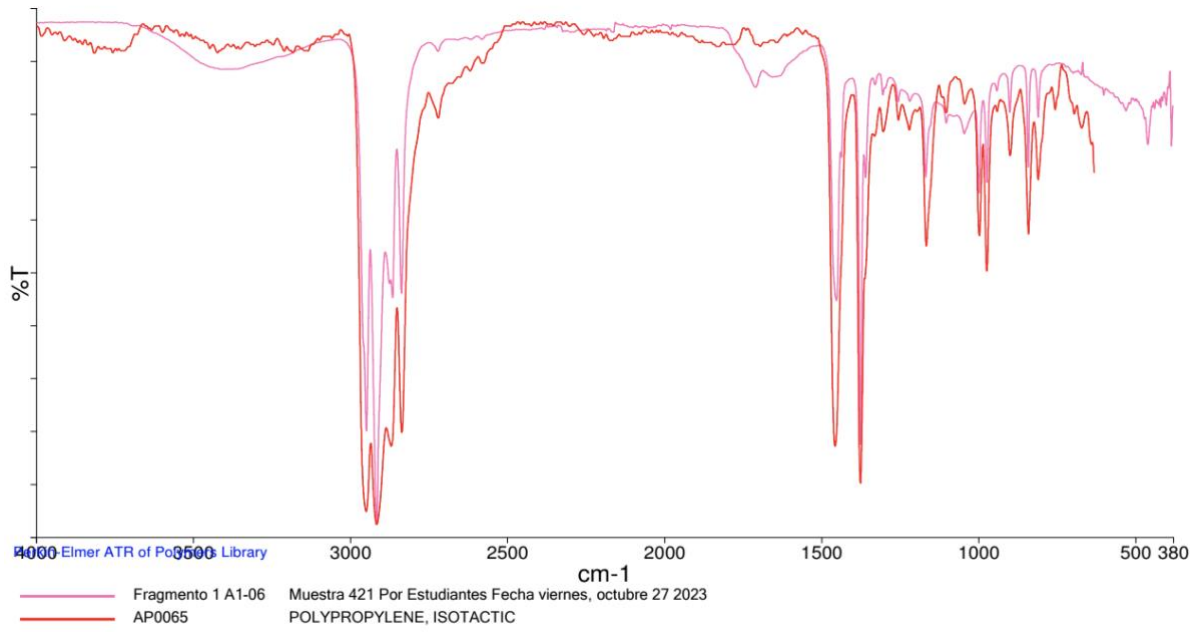


Figura 60. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-07 de ríos.

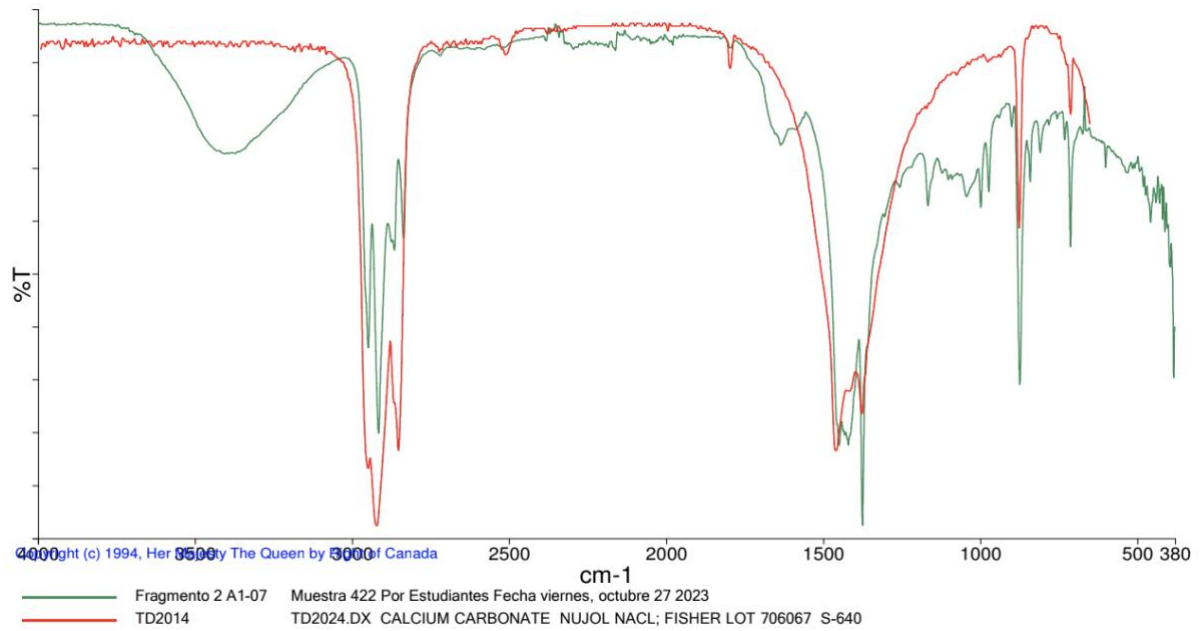


Figura 61. Espectro infrarrojo de fragmento 2 A.1-07 de ríos.

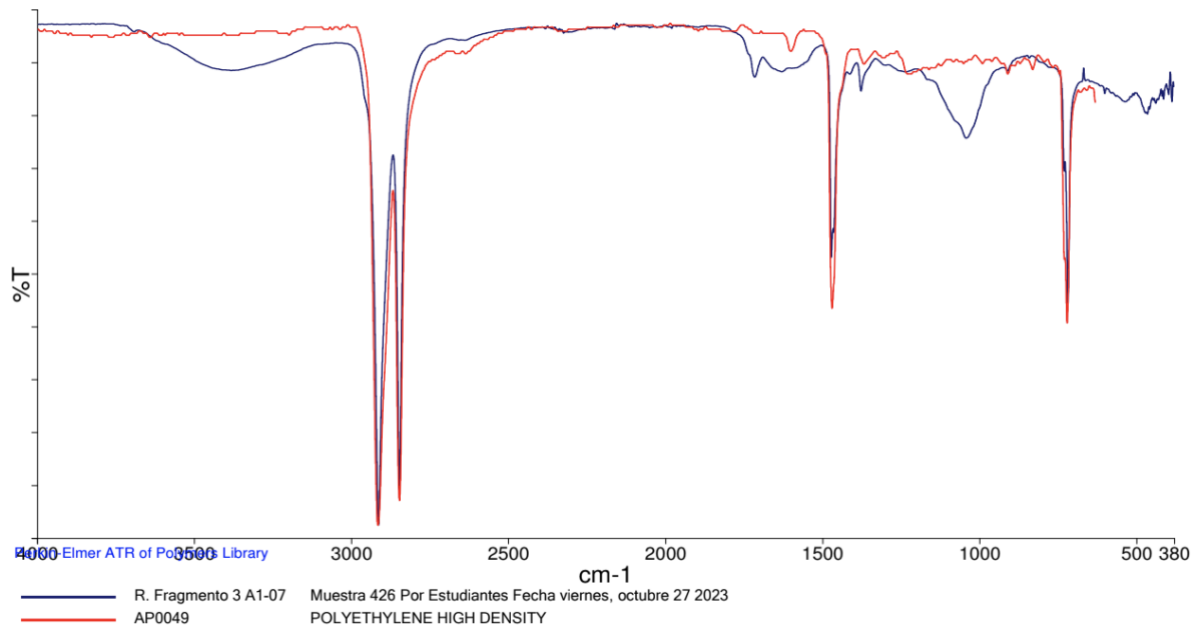


Figura 62. Espectro infrarrojo de fibra azul A.2-06 de ríos.

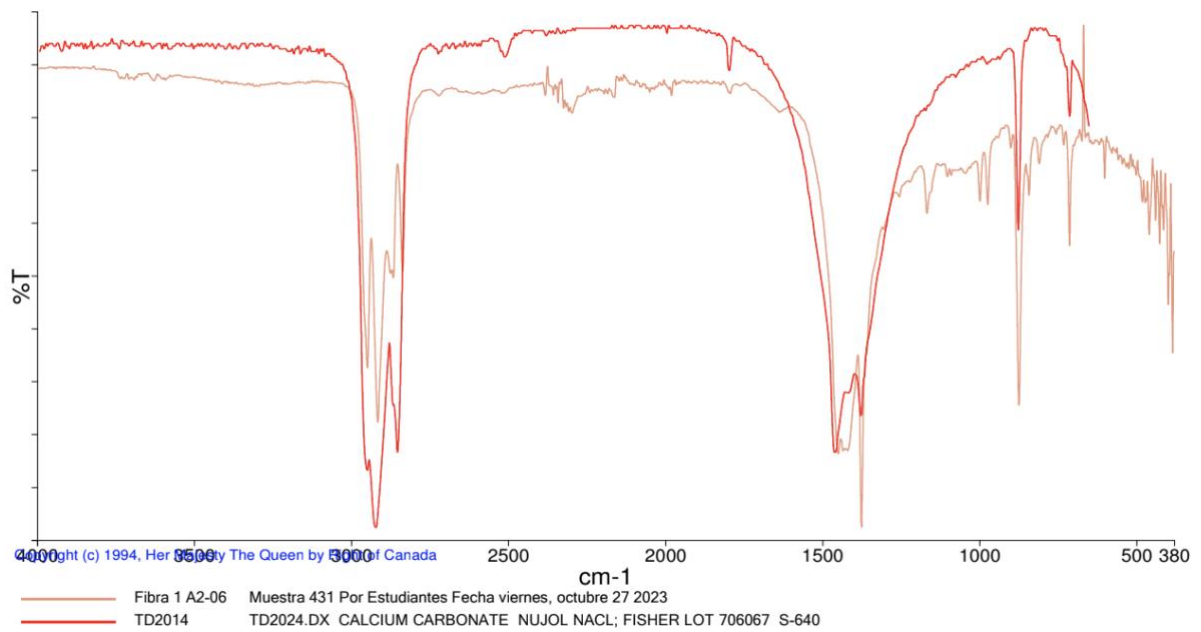


Figura 63. Espectro infrarrojo de fibra roja A.2-07 de ríos.

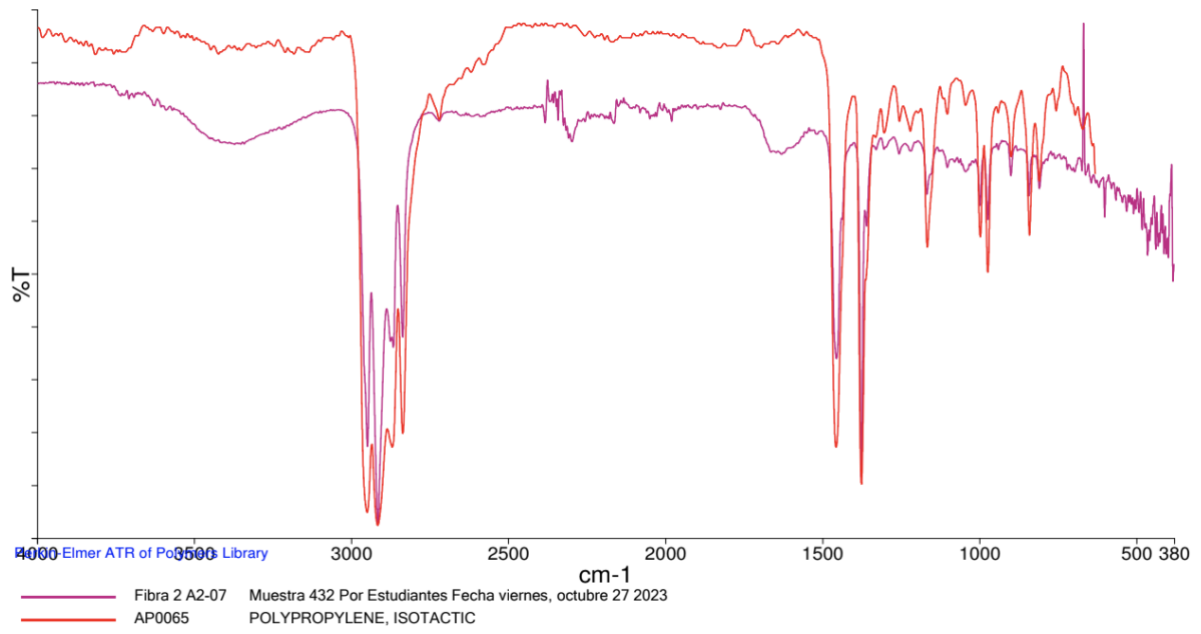


Figura 64. Espectro infrarrojo de fragmento verde A.2-06 de ríos.

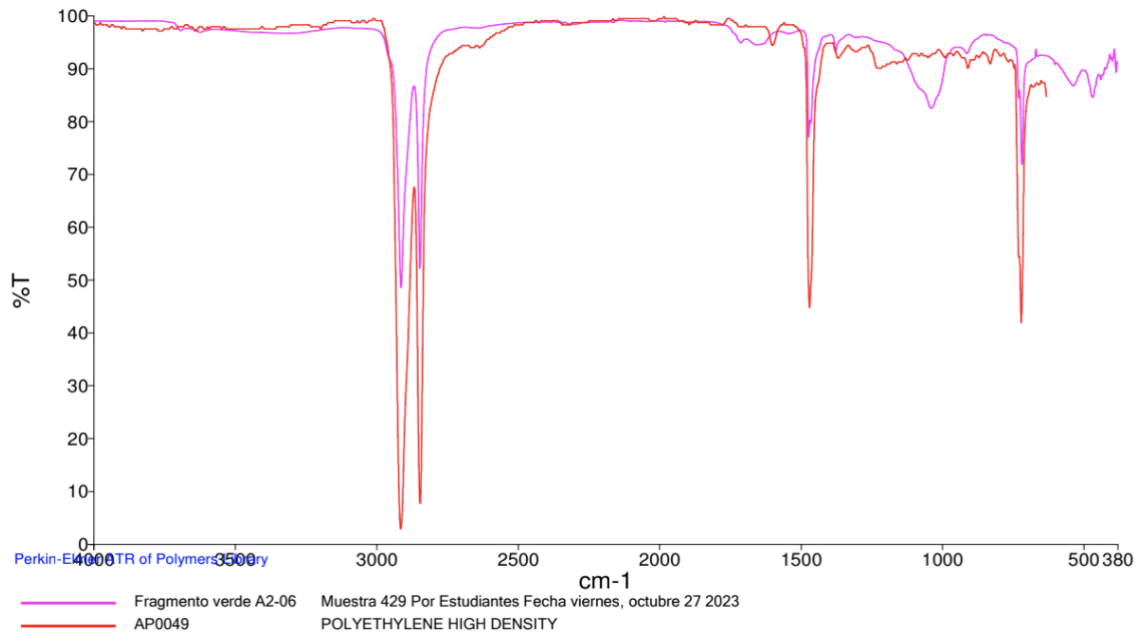


Figura 65. Espectro infrarrojo de fragmento celeste A.2-06 de ríos.

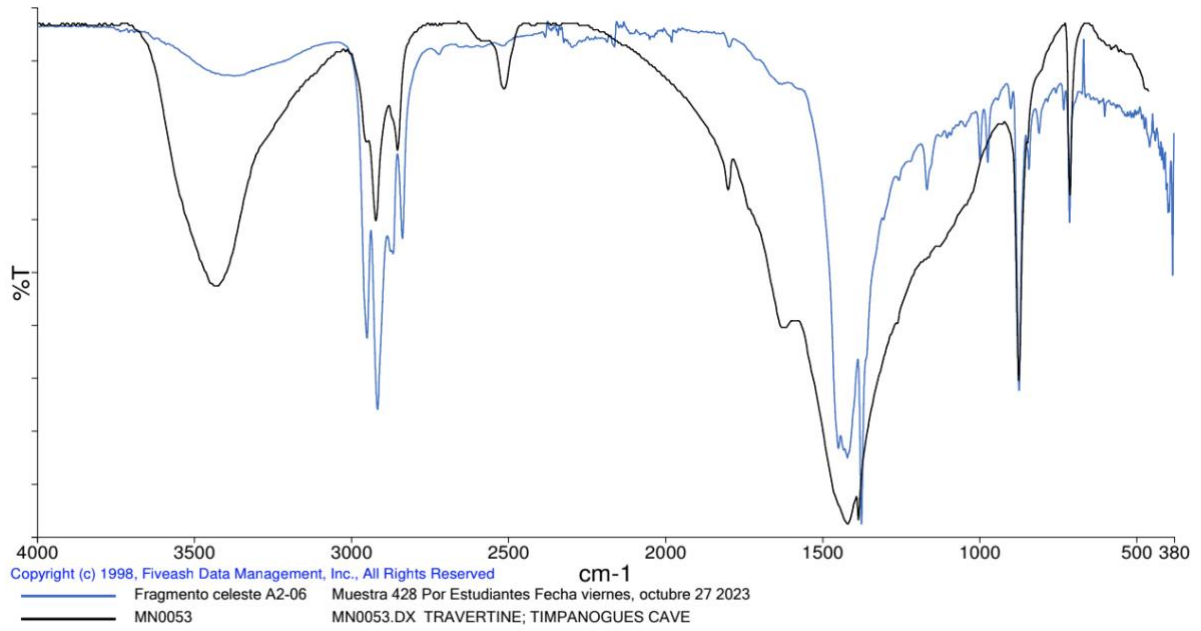


Figura 66. Espectro infrarrojo de fragmento azul A.2-06 de ríos.

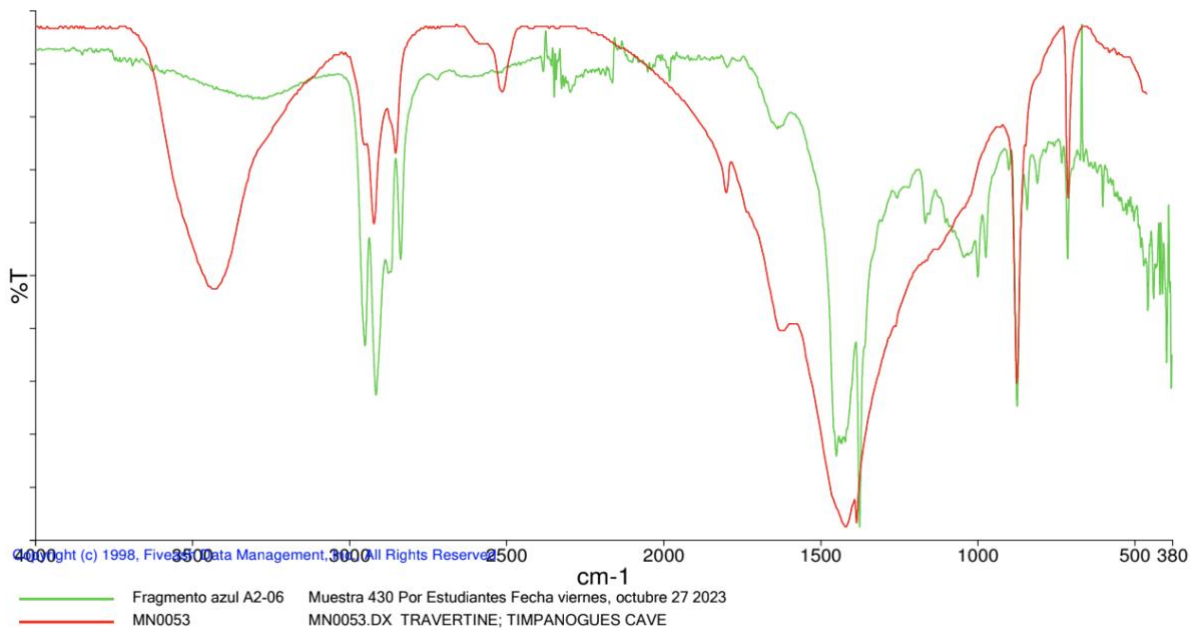


Figura 67. Espectro infrarrojo de fragmento transparente A.2-07 de ríos.

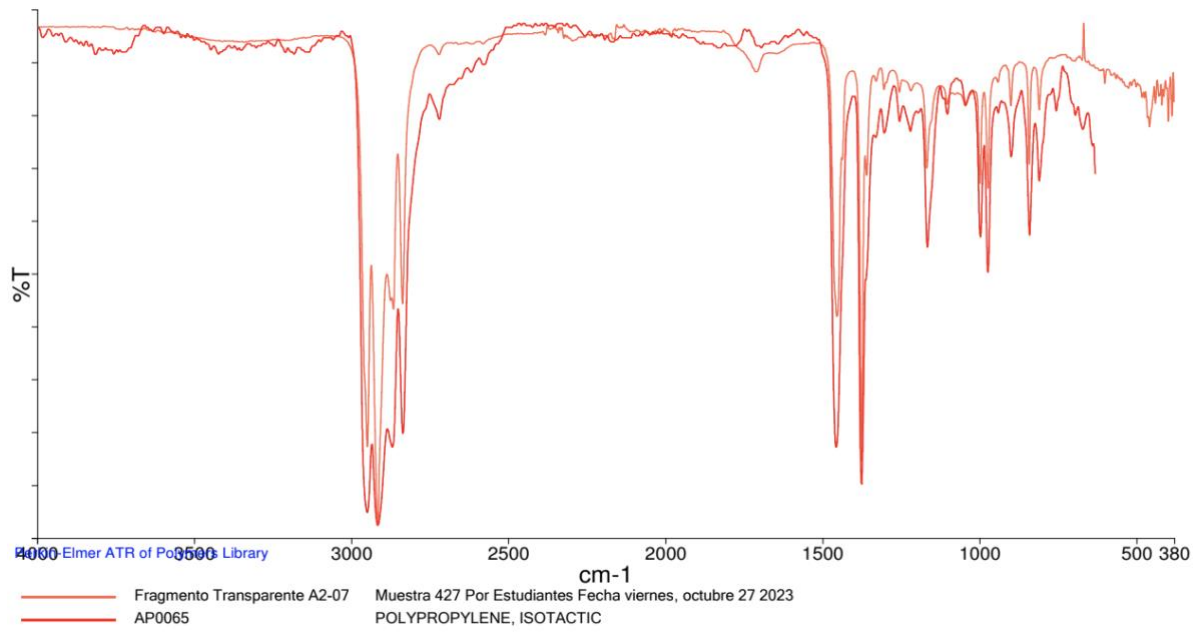


Figura 68. Espectro infrarrojo de film A.1-01 de agua superficial.

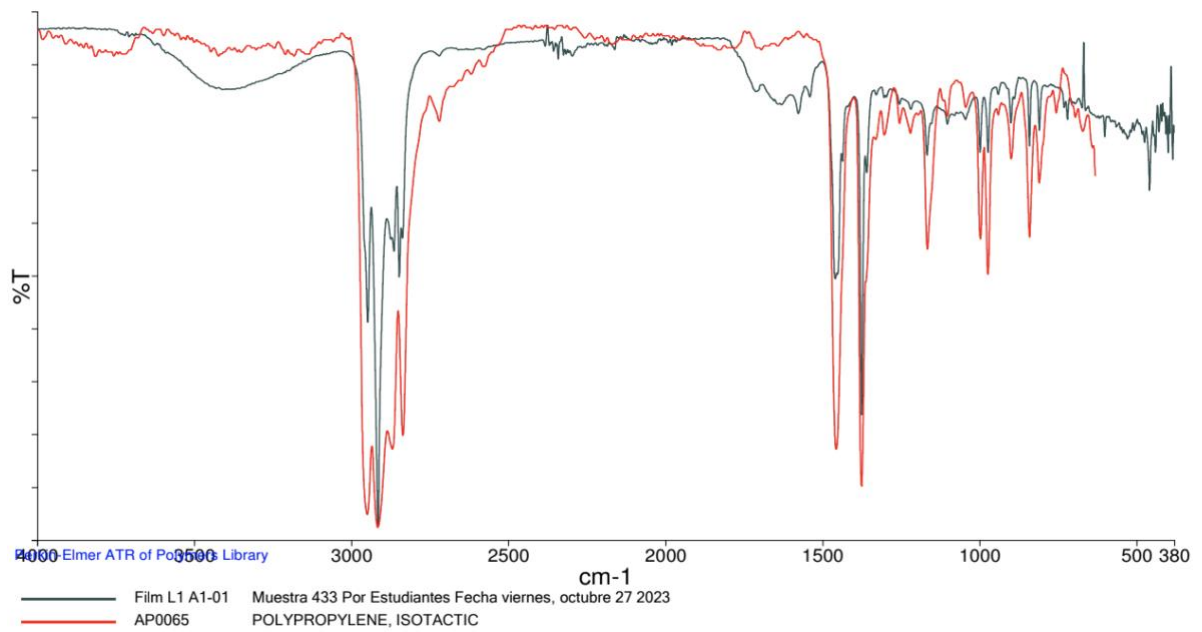


Figura 69. Espectro infrarrojo de film A.1-02 de agua superficial.

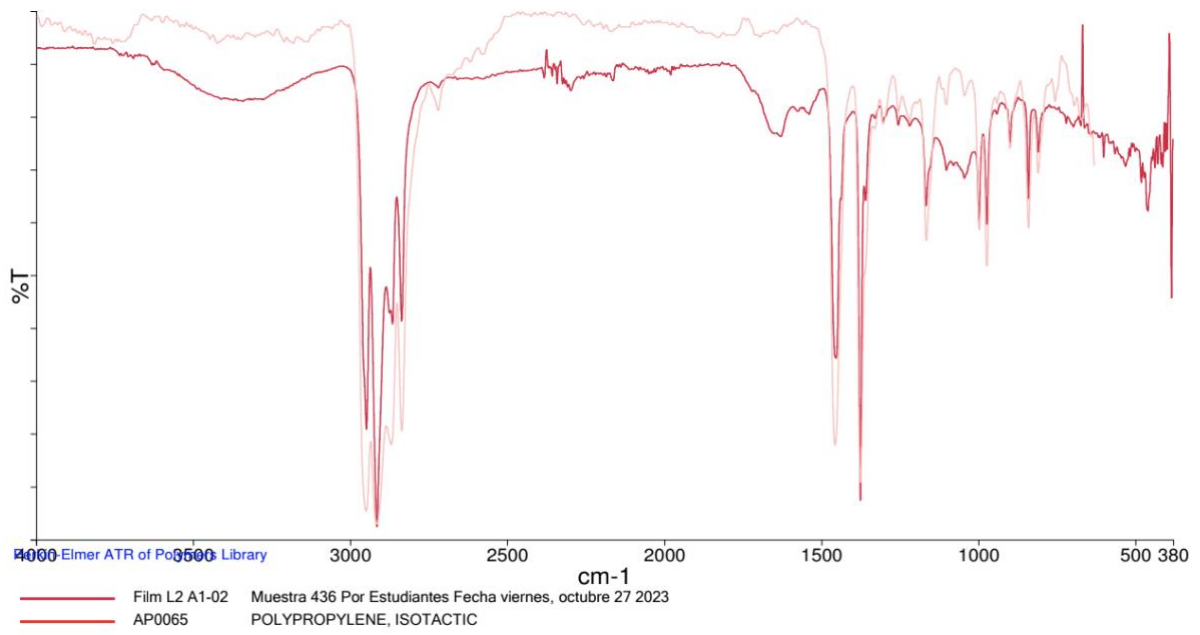


Figura 70. Espectro infrarrojo de film A.1-04 de agua superficial.

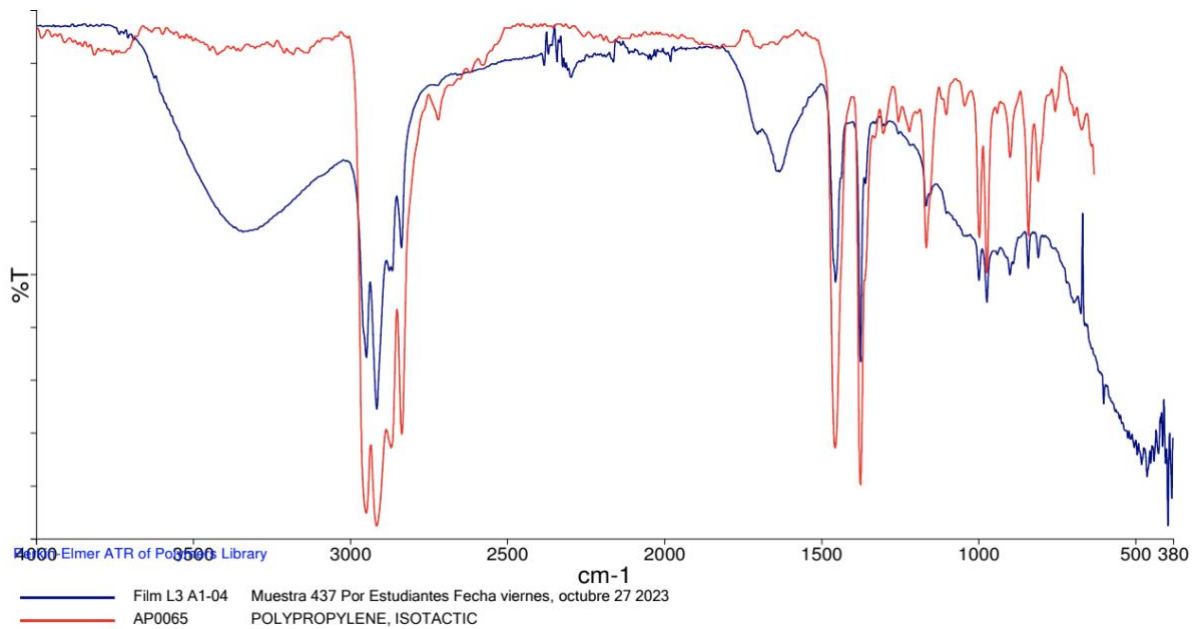


Figura 71. Espectro infrarrojo de espuma A.1-01 de agua superficial.

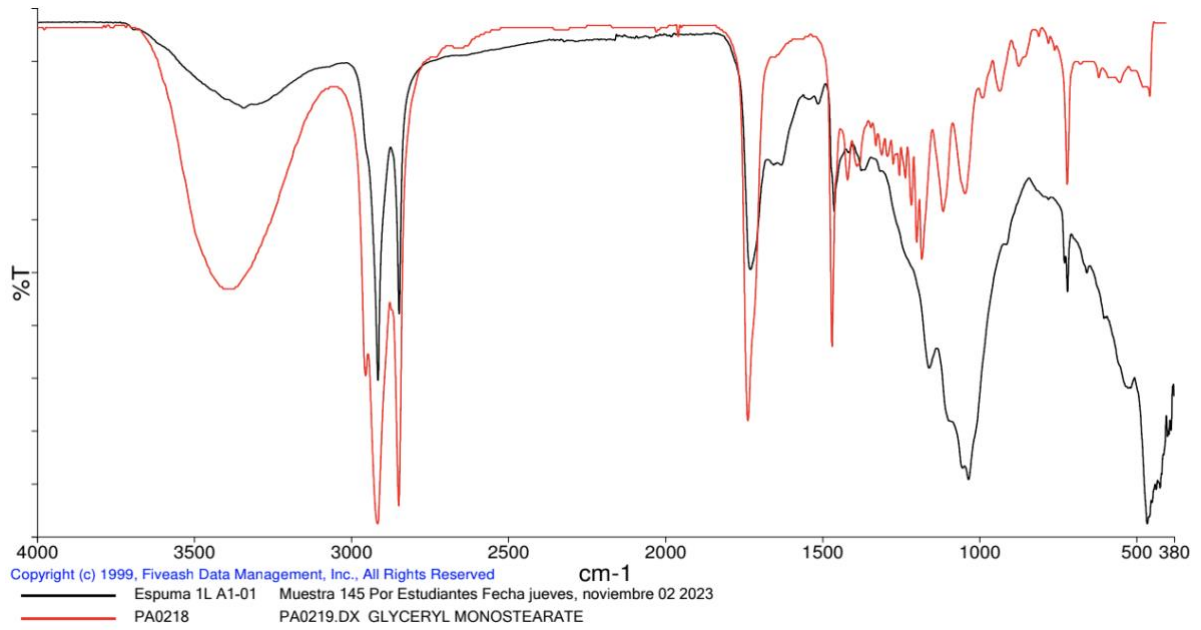


Figura 72. Espectro infrarrojo de espuma A.1-02 de agua superficial.

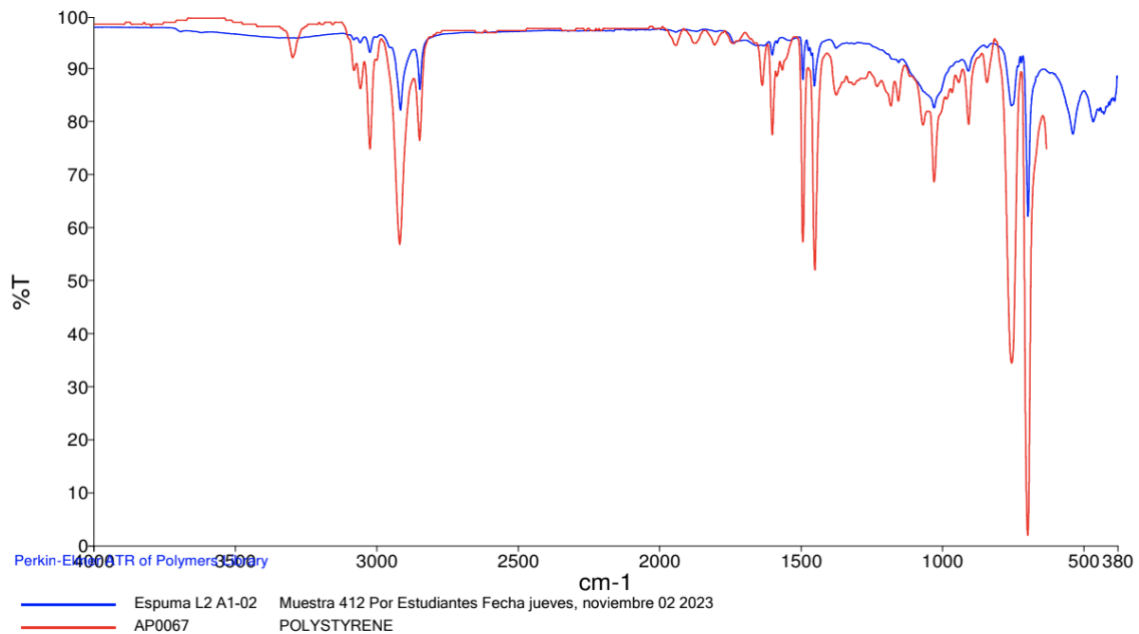


Figura 73. Espectro infrarrojo de espuma 2 A.1-02 de agua superficial.

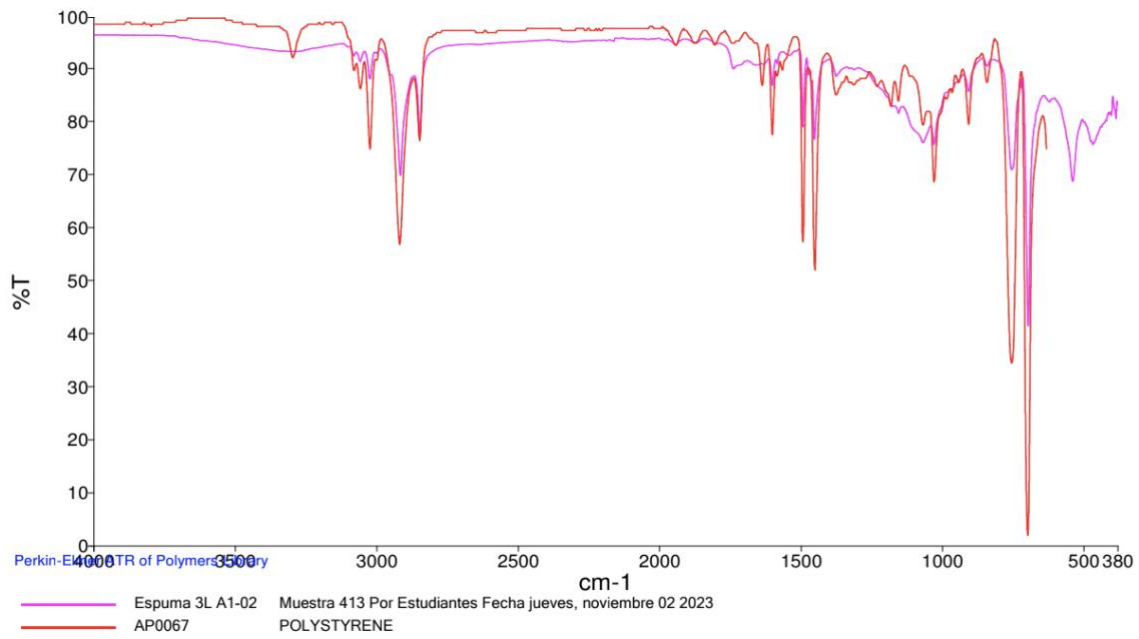


Figura 74. Espectro infrarrojo de espuma A.1-04 de agua superficial.

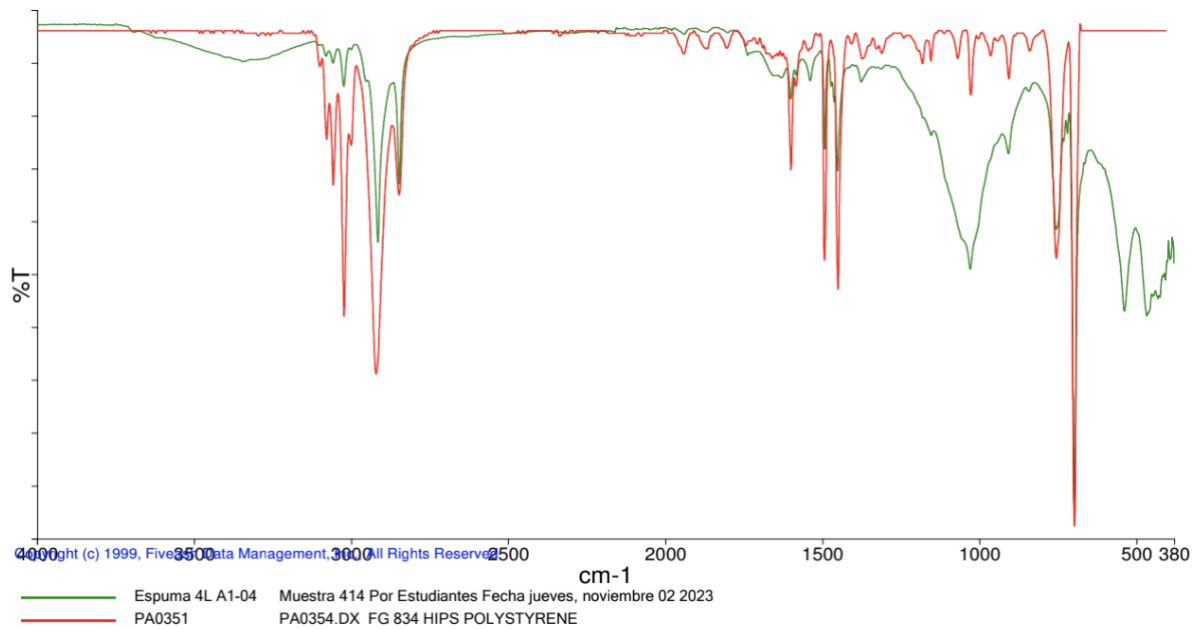


Figura 75. Espectro infrarrojo de espuma 2 A.1-04 de agua superficial.

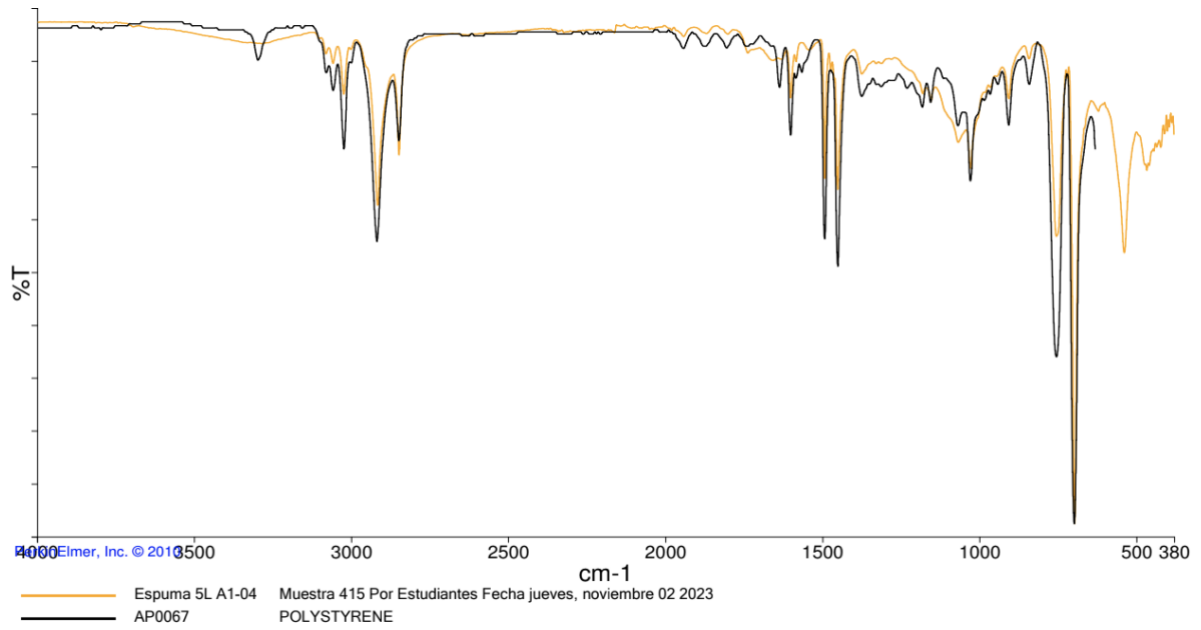


Figura 76. Espectro infrarrojo de fibra A.1-02 de agua superficial.

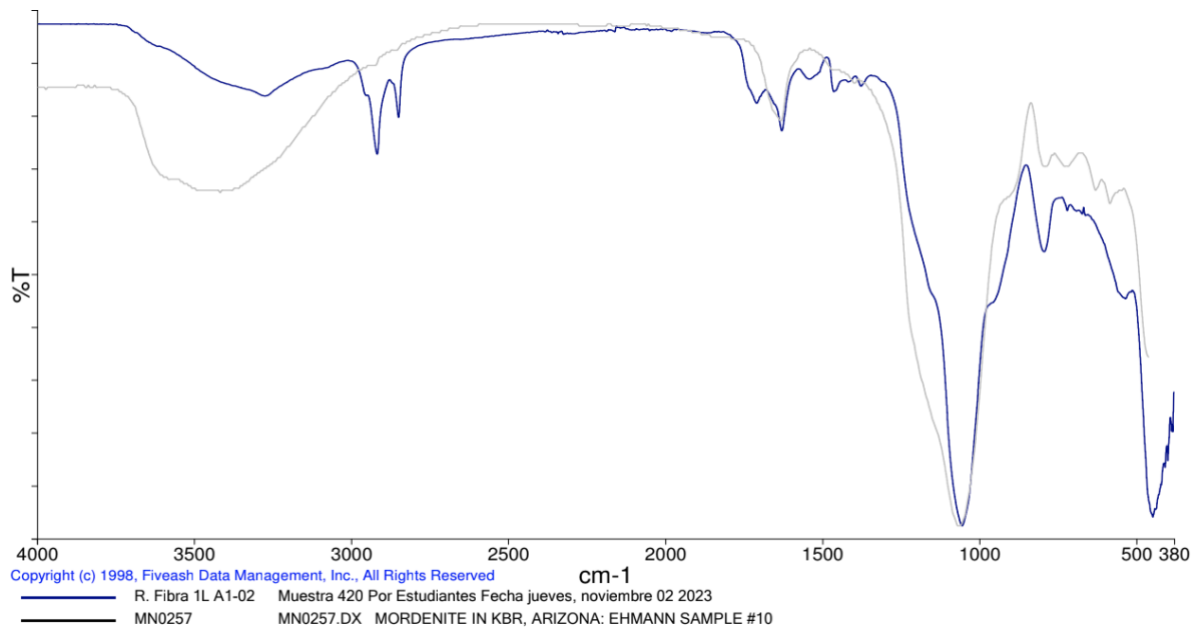


Figura 77. Espectro infrarrojo de fibra A.1-03 de agua superficial.

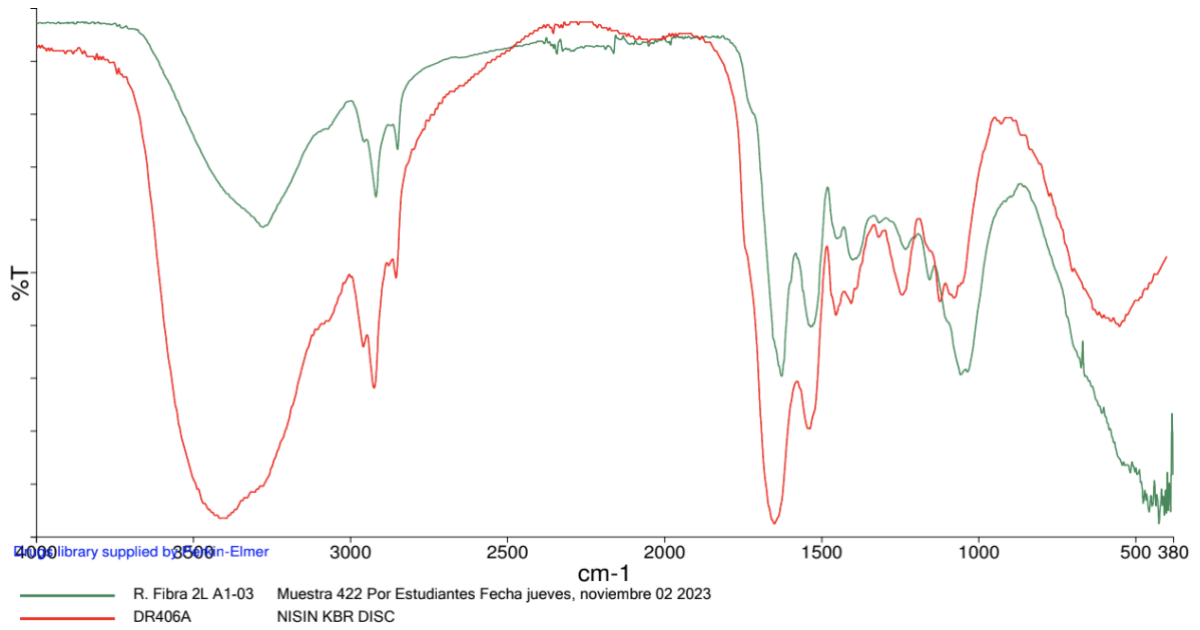


Figura 78. Espectro infrarrojo de fibra 2 A.1-03 de agua superficial.

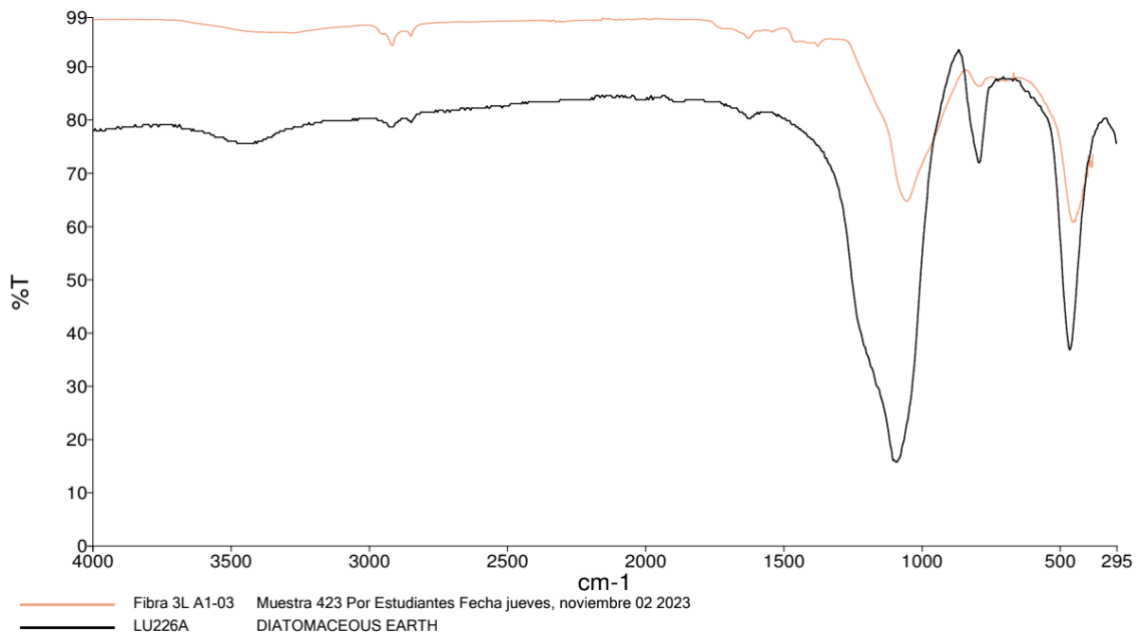


Figura 79. Espectro infrarrojo de fibra A.1-04 de agua superficial.

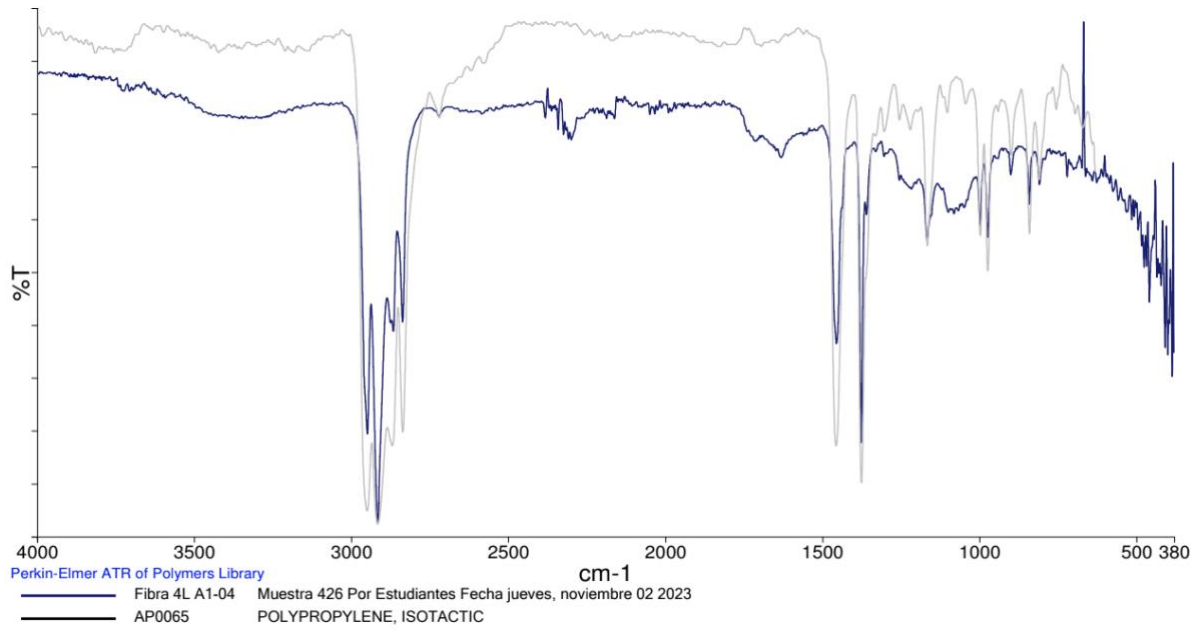


Figura 80. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-01 de agua superficial.

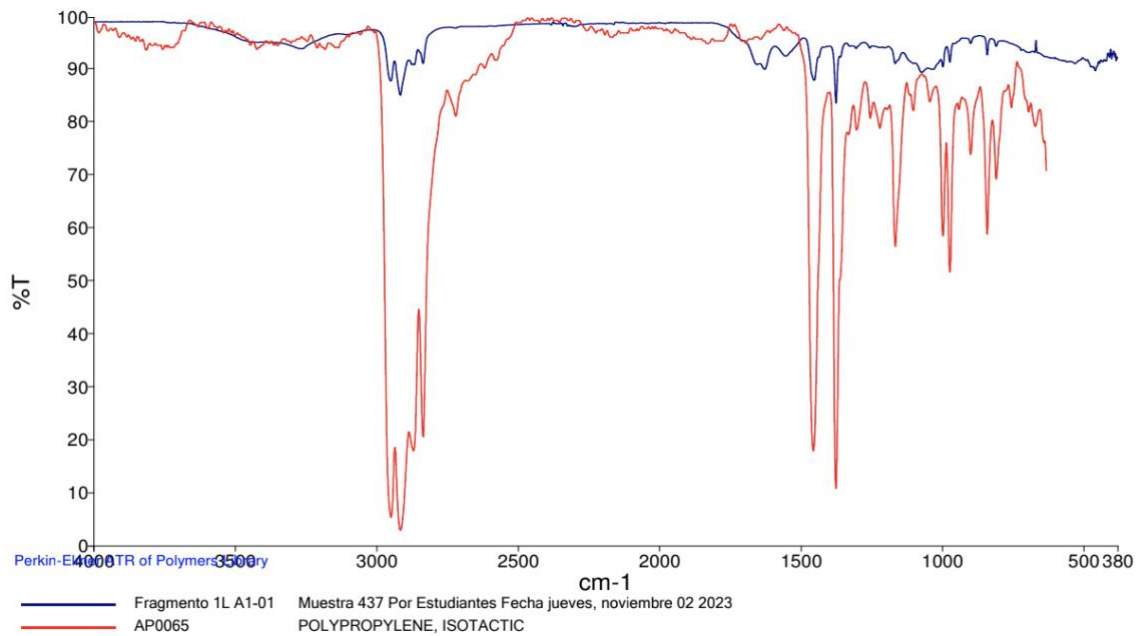


Figura 81. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-02 de agua superficial.

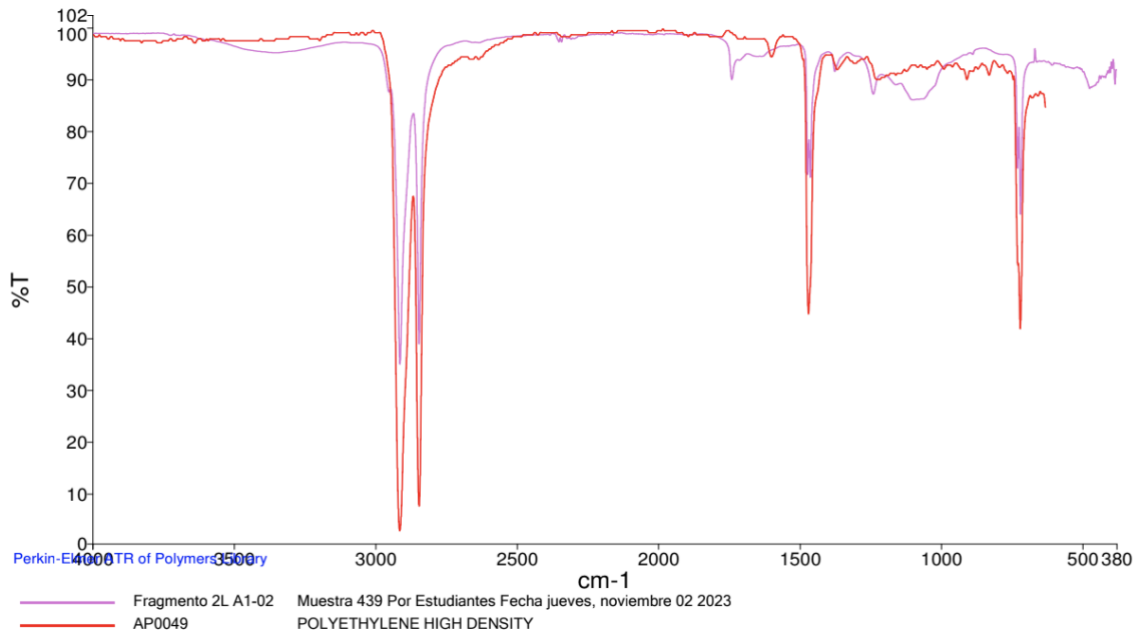


Figura 82. Espectro infrarrojo de fragmento A.1-04 de agua superficial.

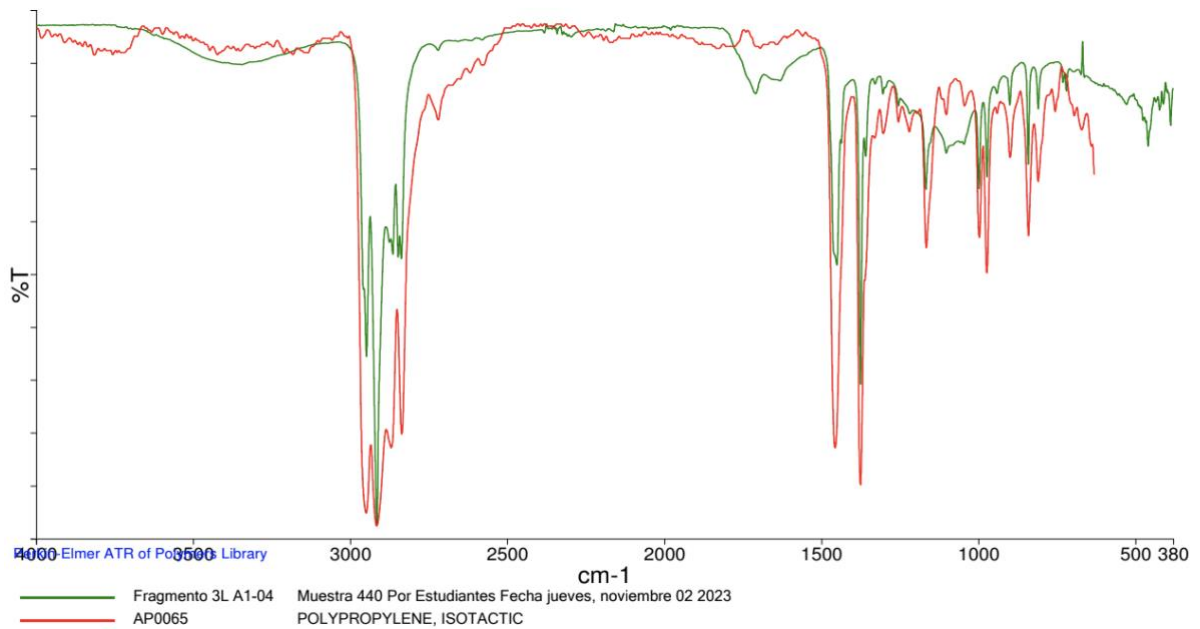


Figura 83. Espectro infrarrojo de fragmento 2 A.1-04 de agua superficial.

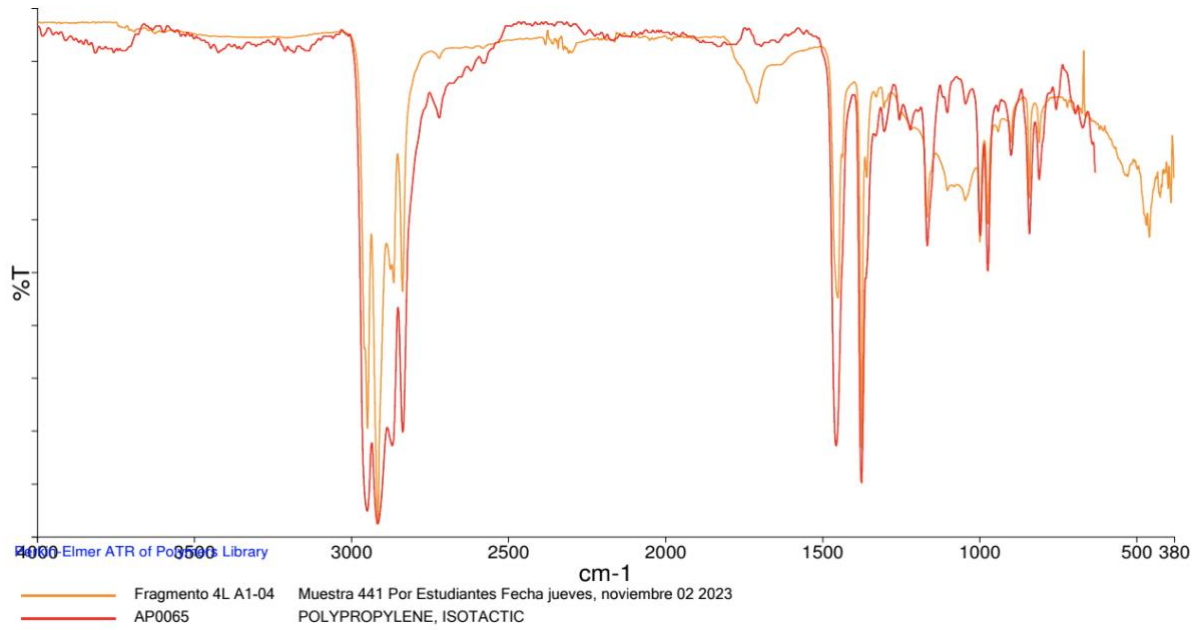


Figura 84. Espectro infrarrojo de microesfera A.1-01 de agua superficial.

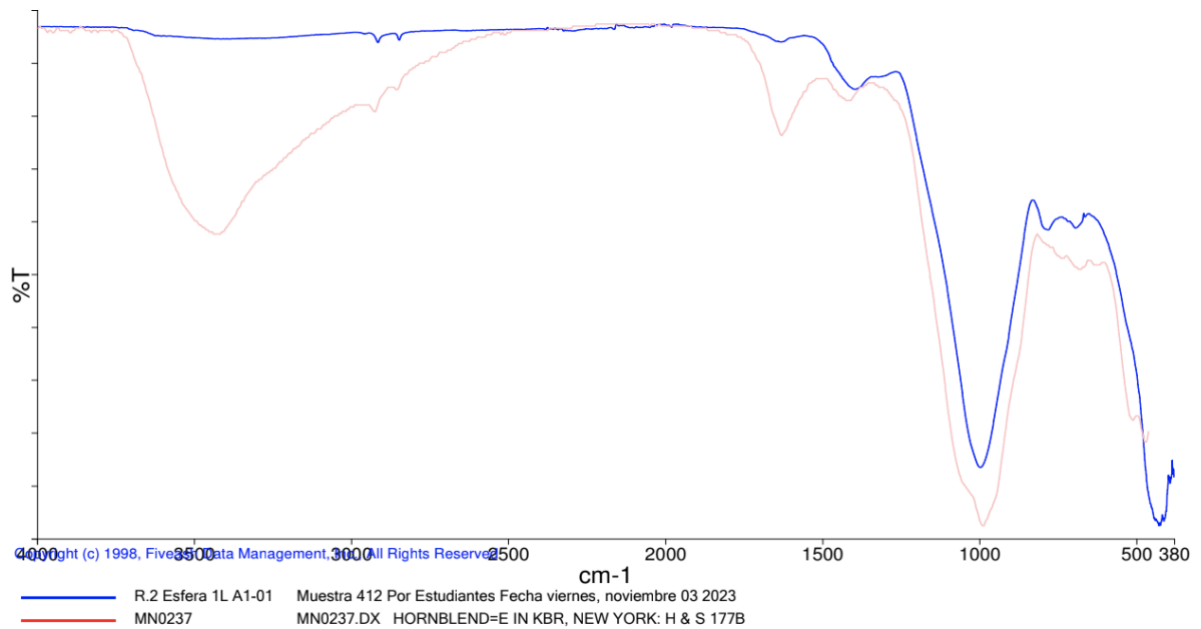


Figura 85. Espectro infrarrojo de microesfera A.1-04 de agua superficial.

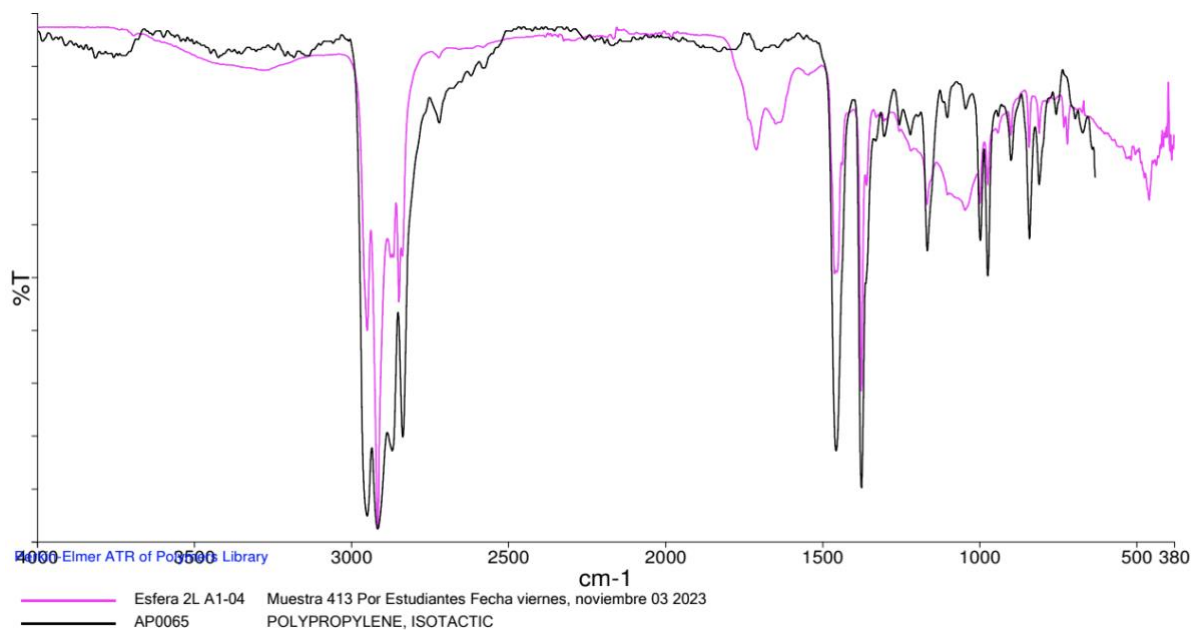


Figura 86. Espectro infrarrojo de espuma café A.2-04 de agua superficial.

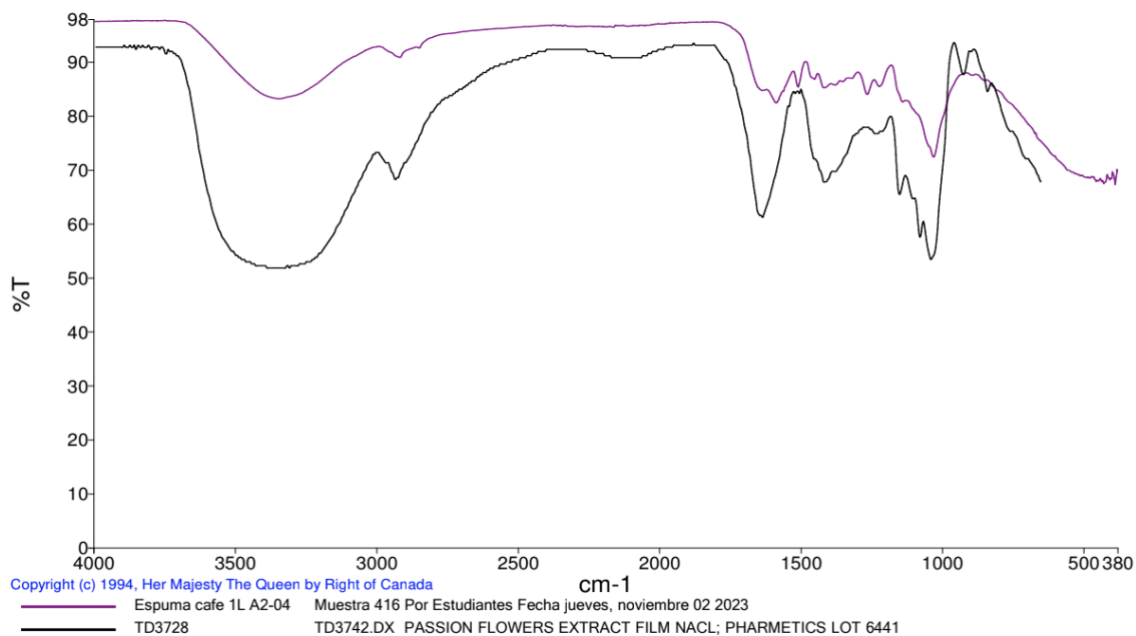


Figura 87. Espectro infrarrojo de espuma blanca A.2-04 de agua superficial.

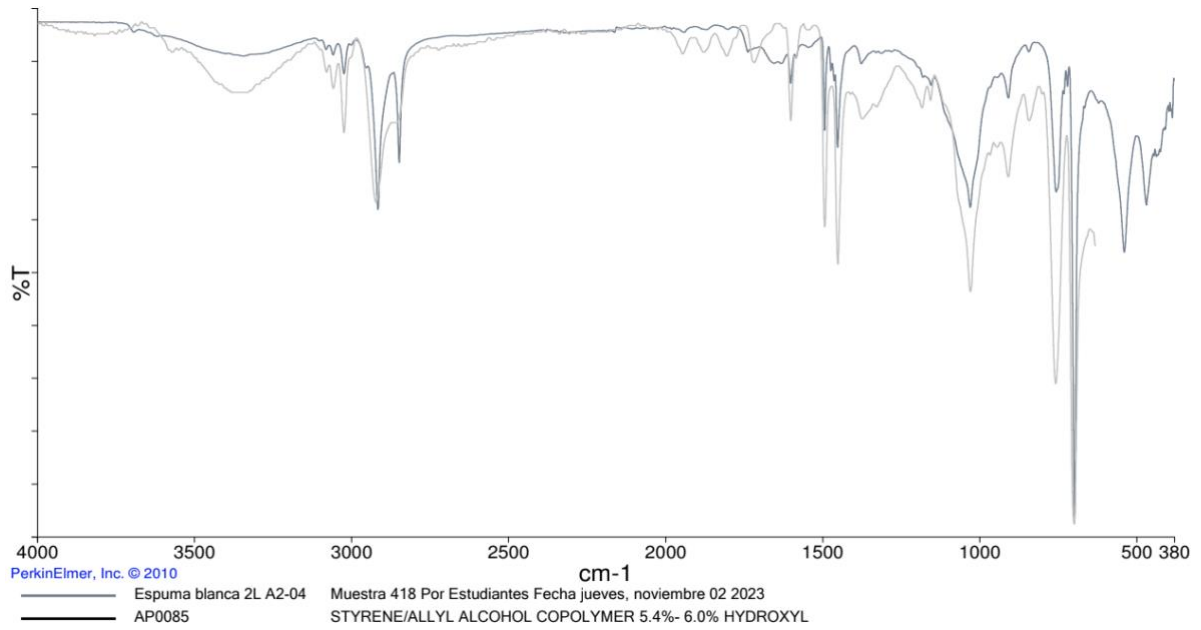


Figura 88. Espectro infrarrojo de fibra azul A.2-01 de agua superficial.

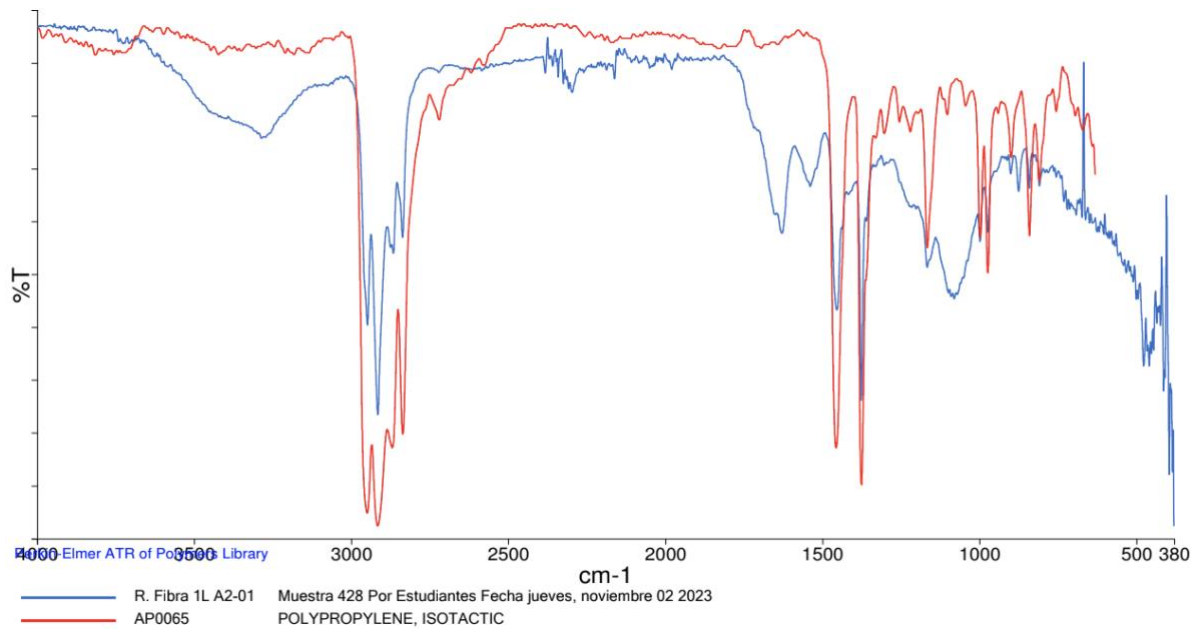


Figura 89. Espectro infrarrojo de fibra azul A.2-02 de agua superficial.

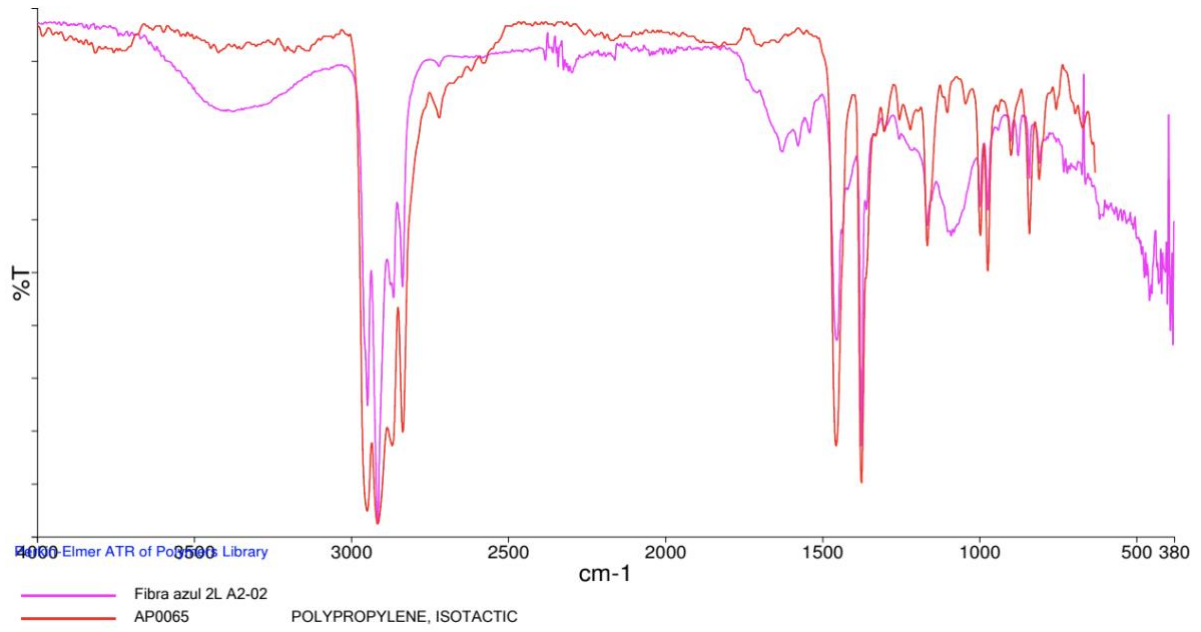


Figura 90. Espectro infrarrojo de fibra rosada A.2-05 de agua superficial.

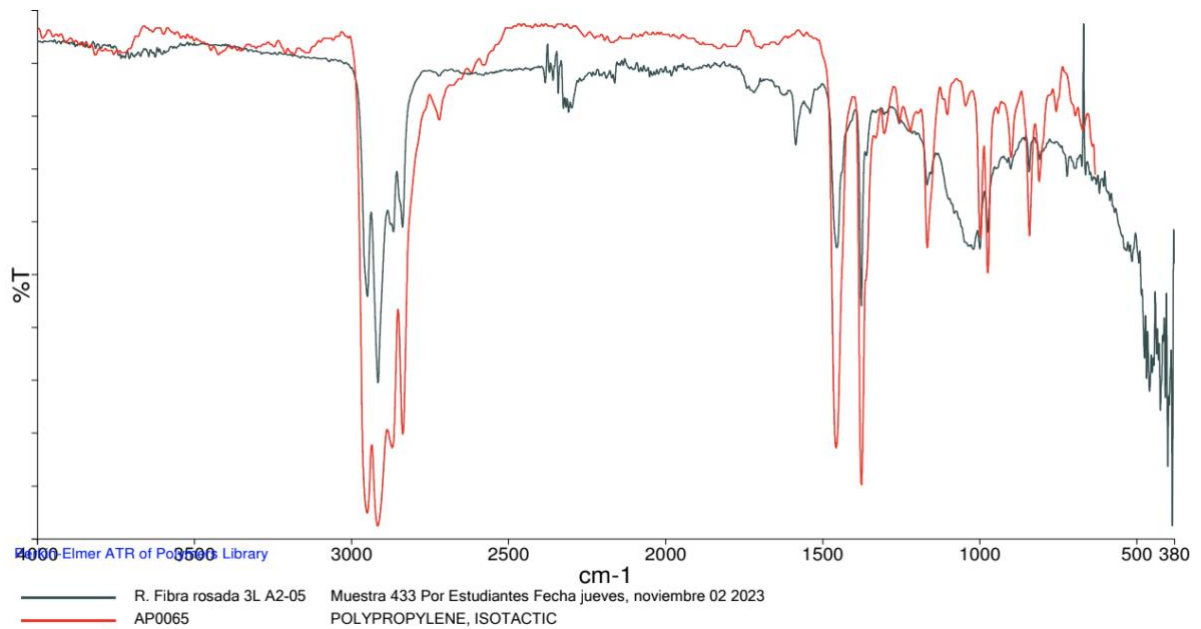


Figura 91. Espectro infrarrojo de fibra negra A.2-03 de agua superficial.

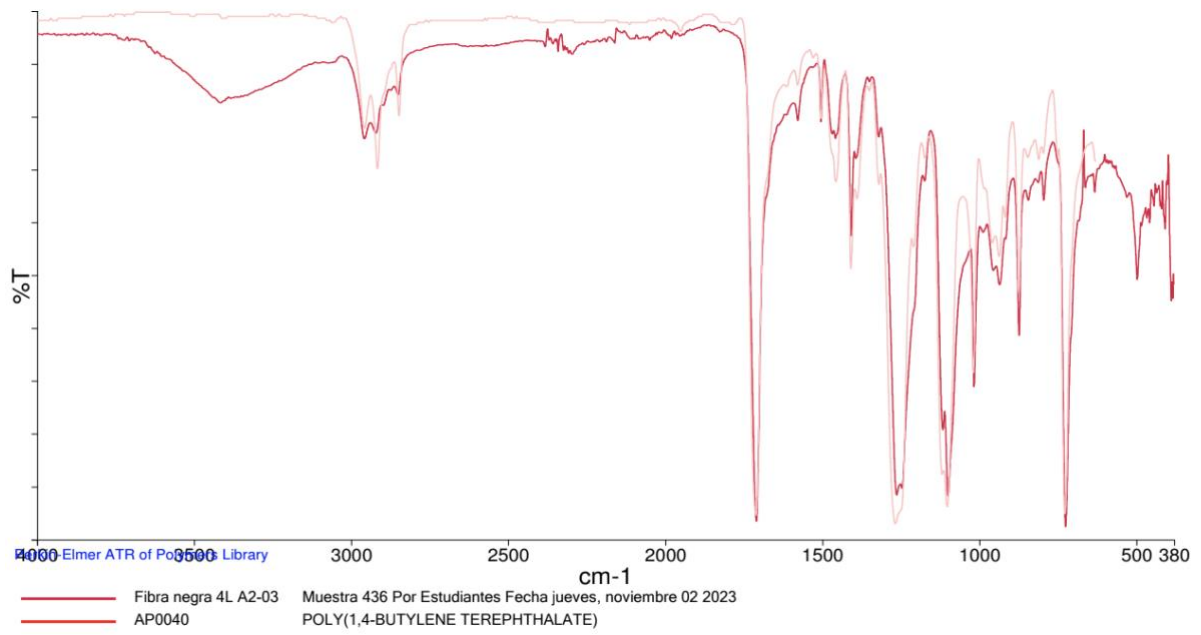


Figura 92. Espectro infrarrojo de fragmento negro A.2-01 de agua superficial.

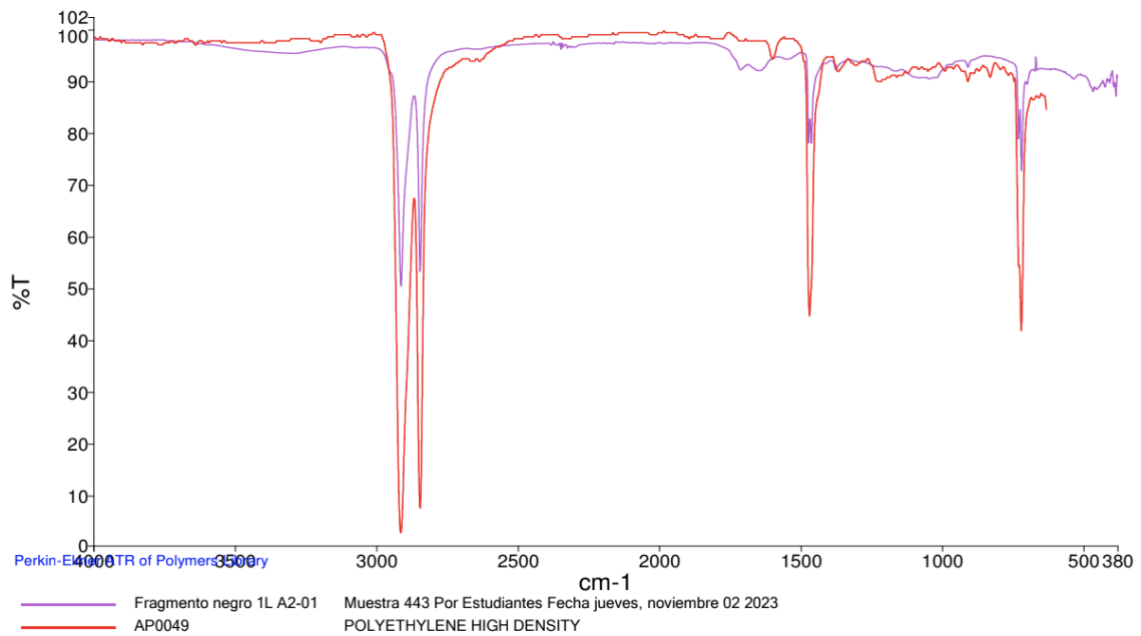


Figura 93. Espectro infrarrojo de fragmento verde A.2-02 de agua superficial.

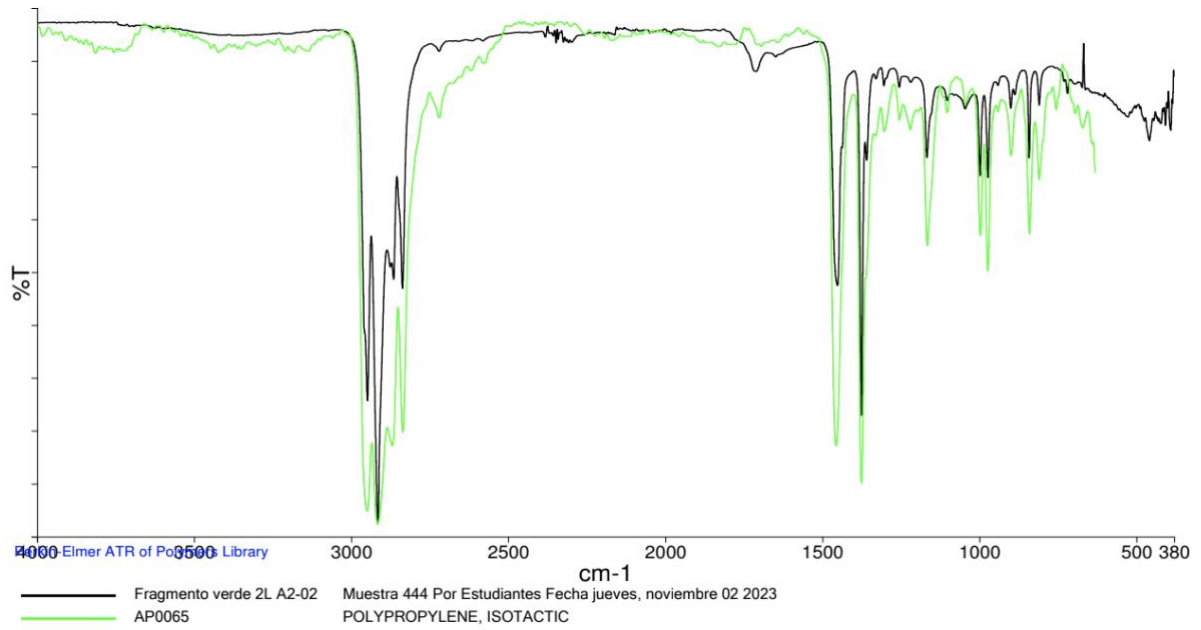


Figura 94. Espectro infrarrojo de fragmento transparente A.2-02 de agua superficial.

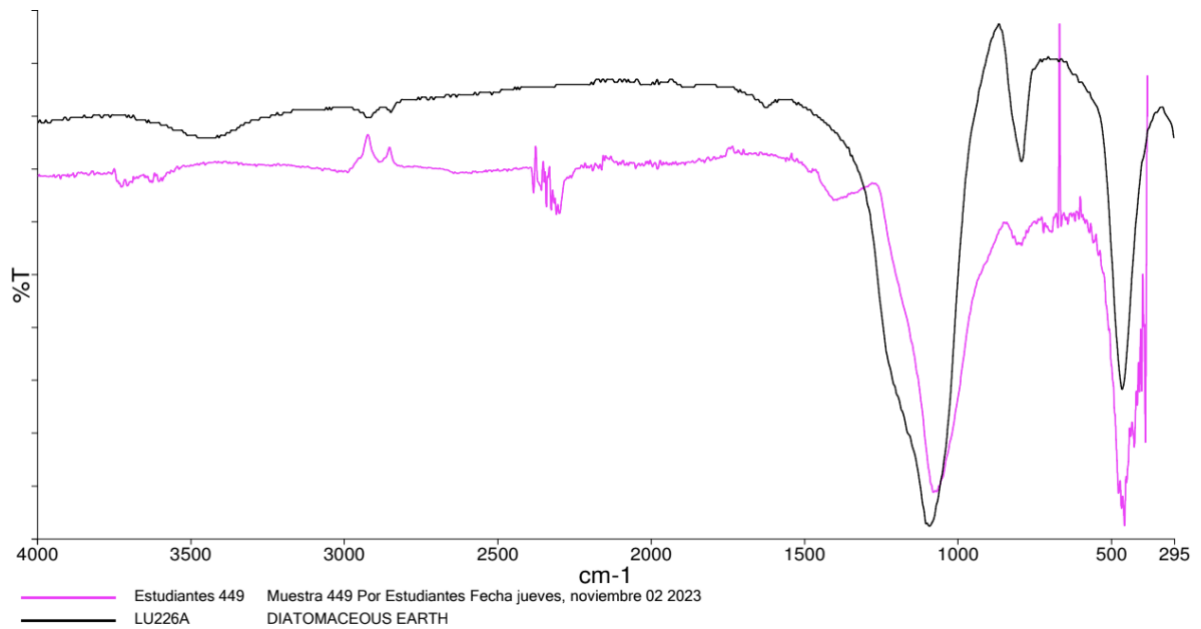


Figura 95. Espectro infrarrojo de fragmento azul A.2-02 de agua superficial.

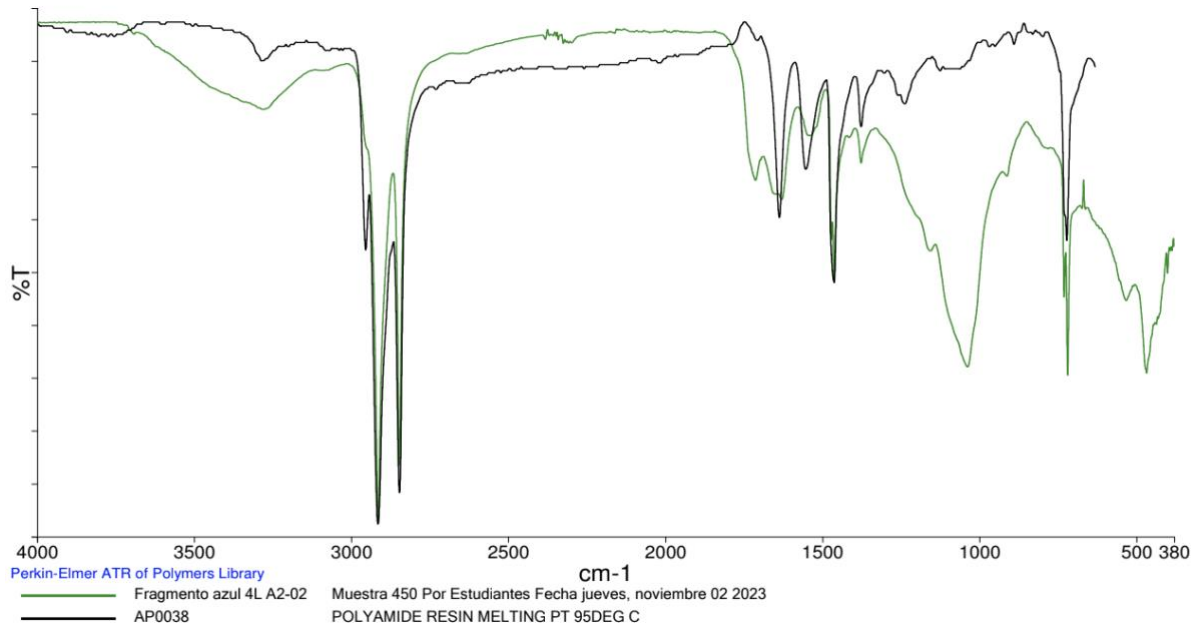


Figura 96. Espectro infrarrojo de fragmento azul A.2-03 de agua superficial.

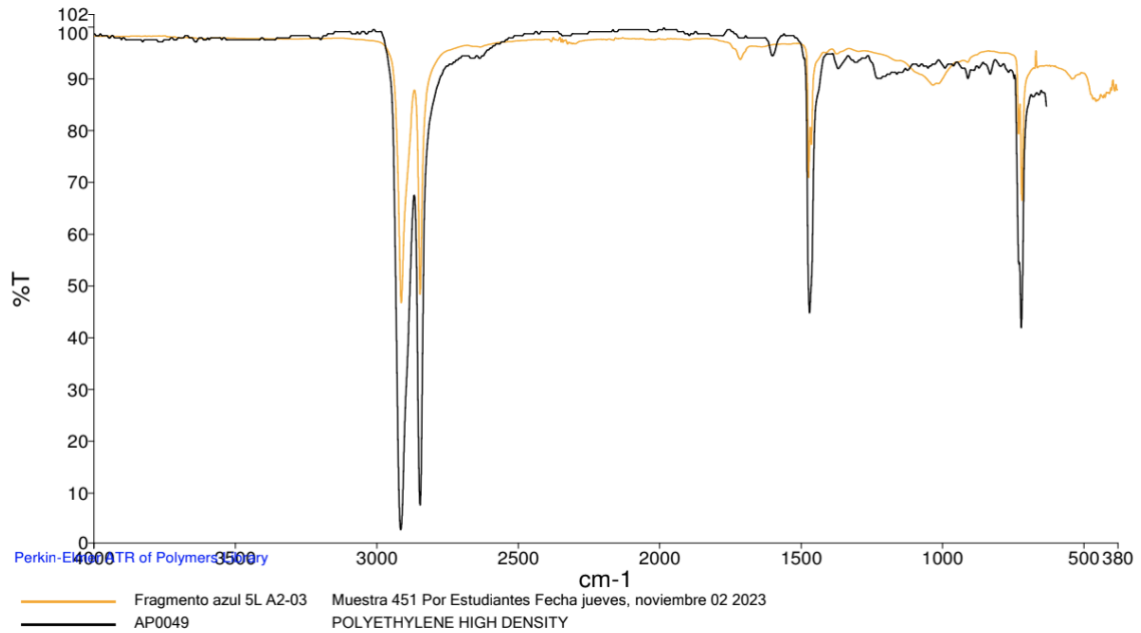


Figura 97. Espectro infrarrojo de fragmento transparente A.2-04 de agua superficial.

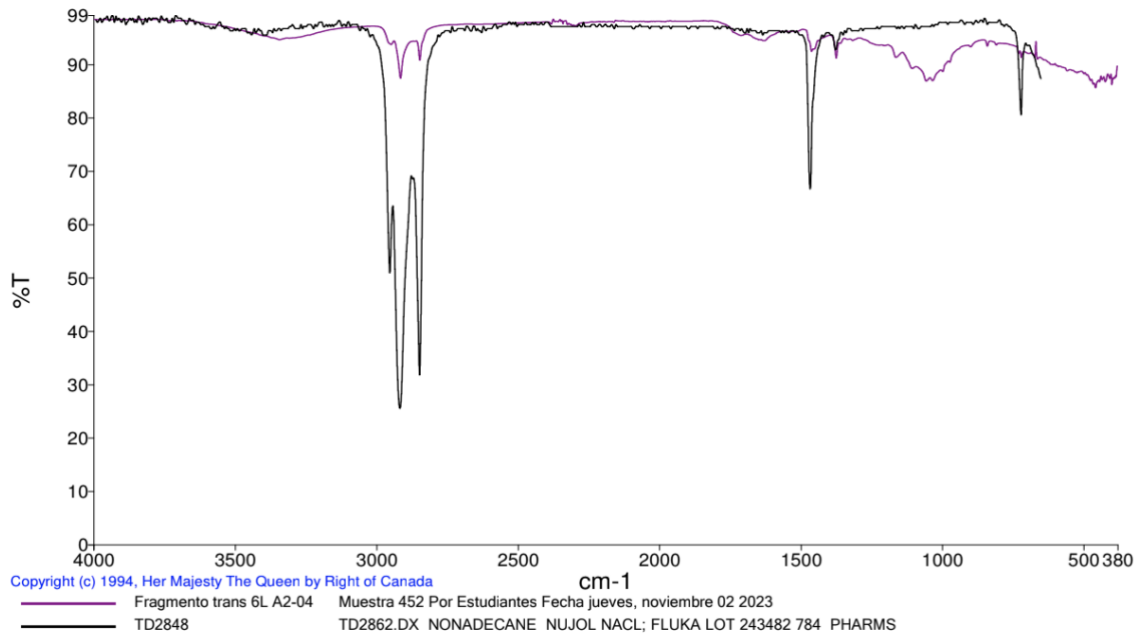


Figura 98. Espectro infrarrojo de fragmento rosado A.2-04 de agua superficial.

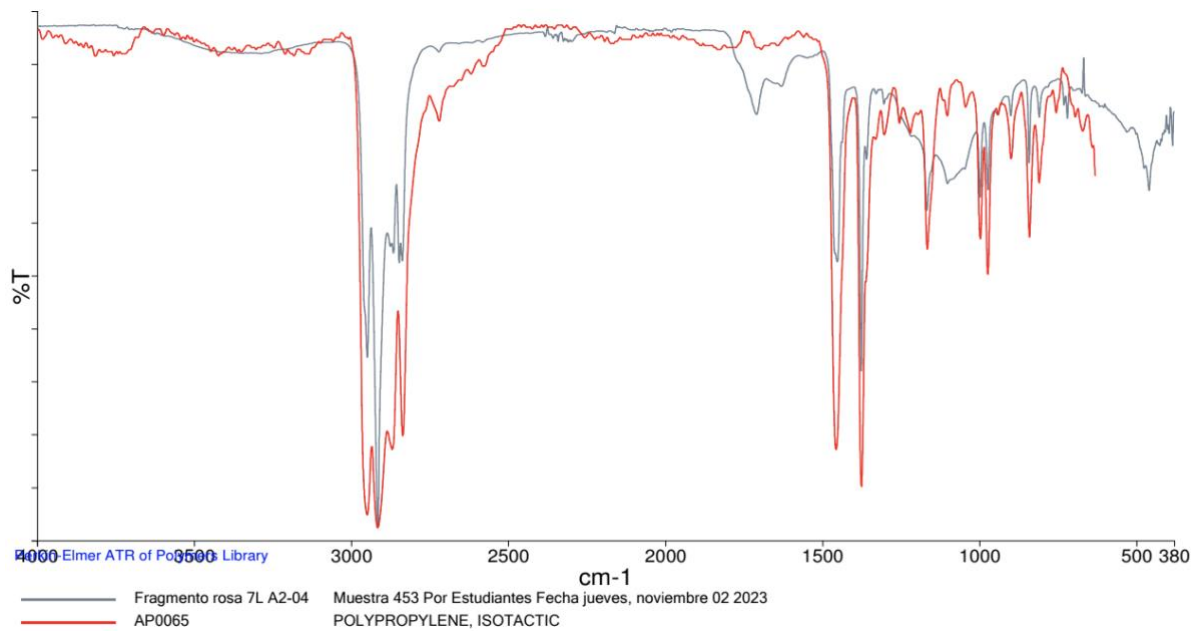


Figura 99. Espectro infrarrojo de fragmento amarillo A.2-04 de agua superficial.

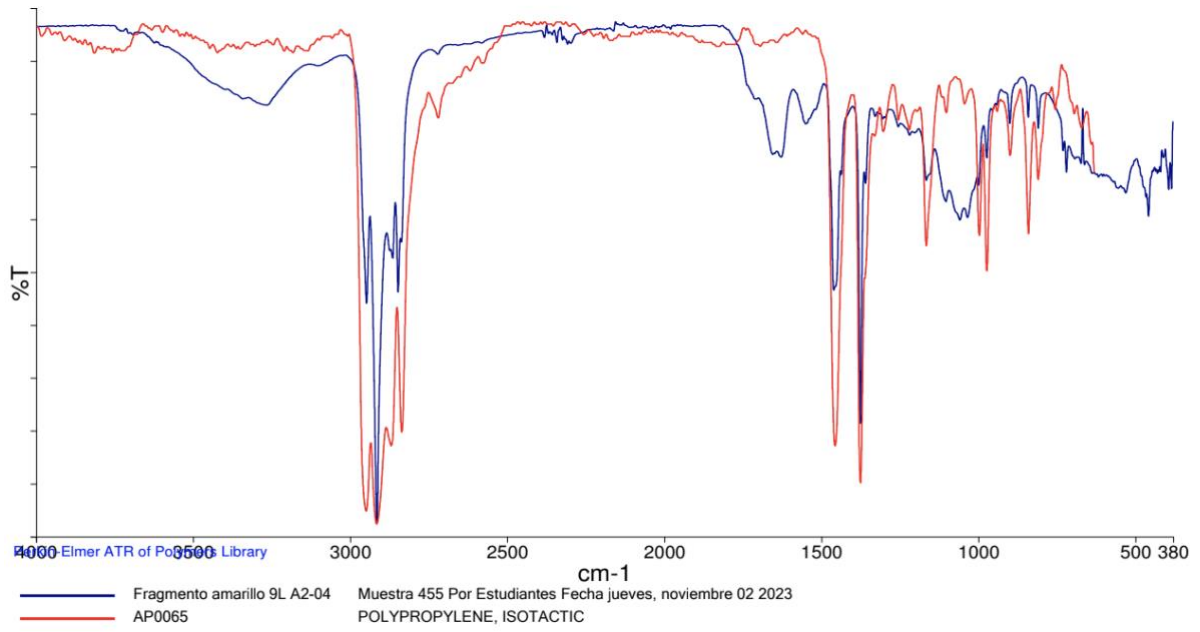


Figura 100. Espectro infrarrojo de fragmento blanco A.2-05 de agua superficial.

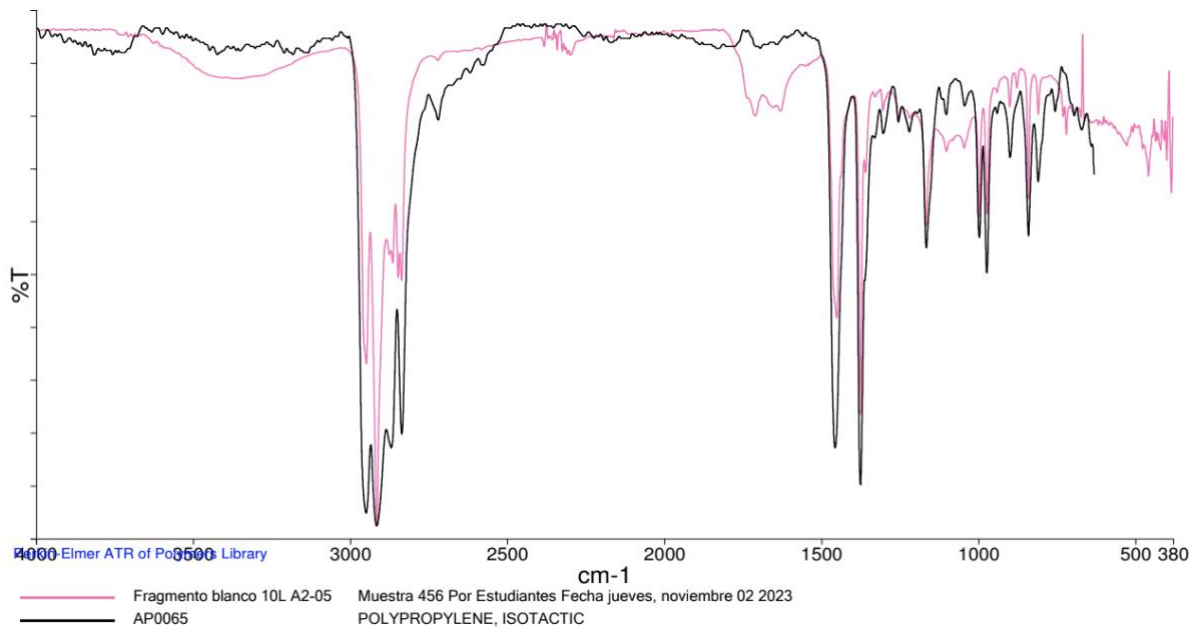


Figura 101. Espectro infrarrojo de fragmento azul A.2-05 de agua superficial.

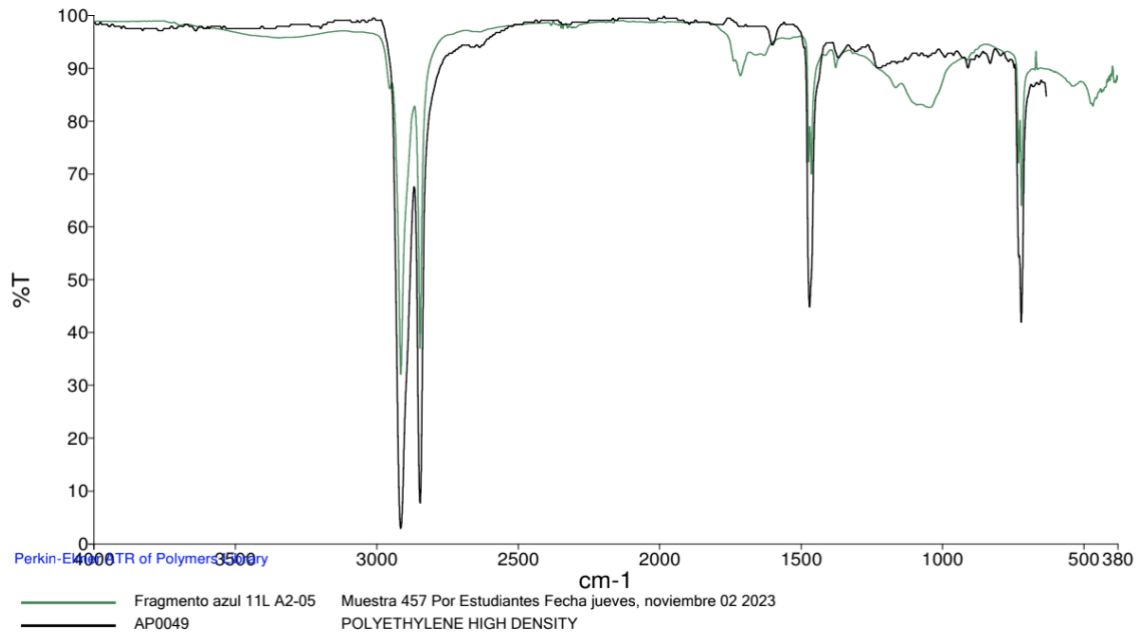


Figura 102. Espectro infrarrojo de microesfera transparente A.2-04 de agua superficial.

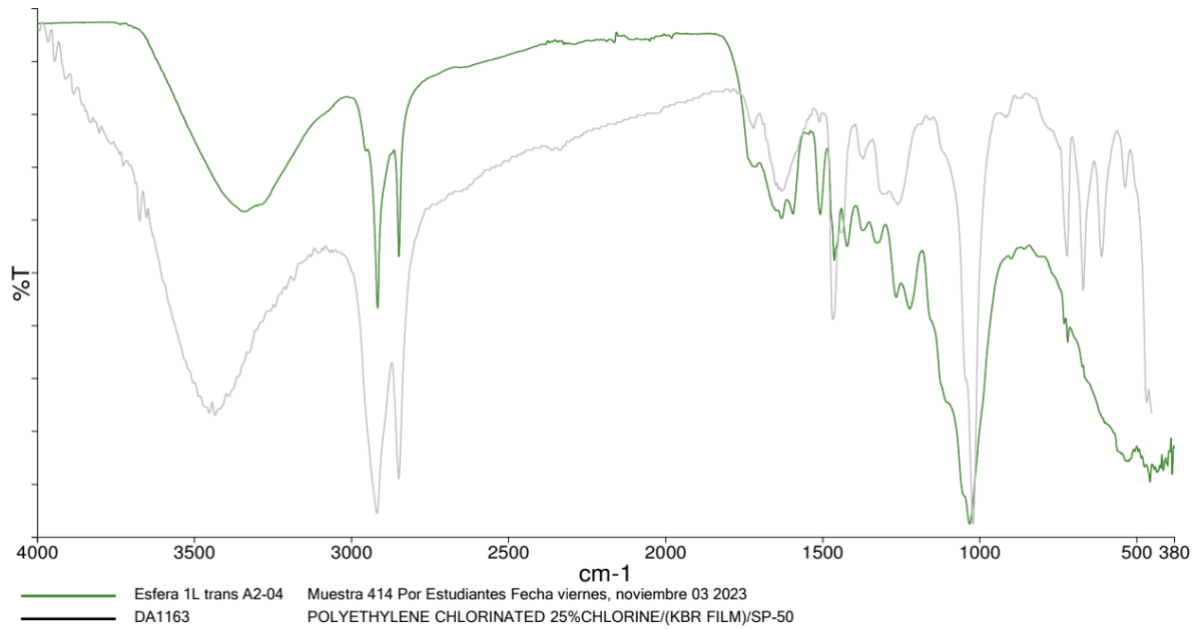


Figura 103. Espectro infrarrojo de microesfera blanca A.2-04 de agua superficial.

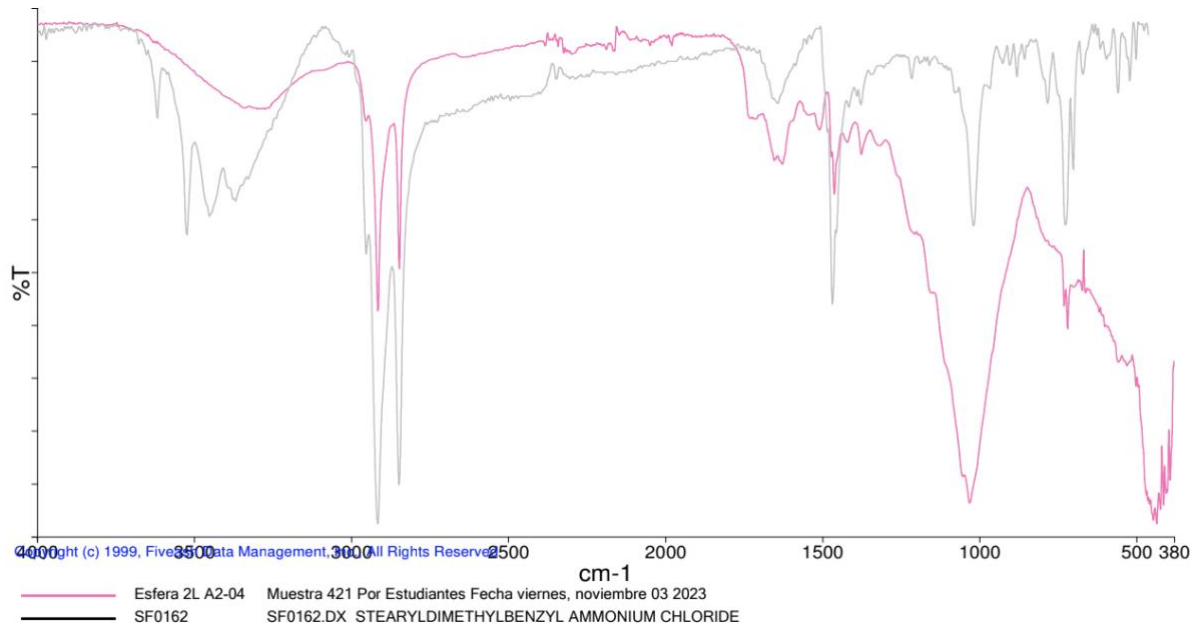


Figura 104. Espectro infrarrojo de microesfera negra A.2-04 de agua superficial.

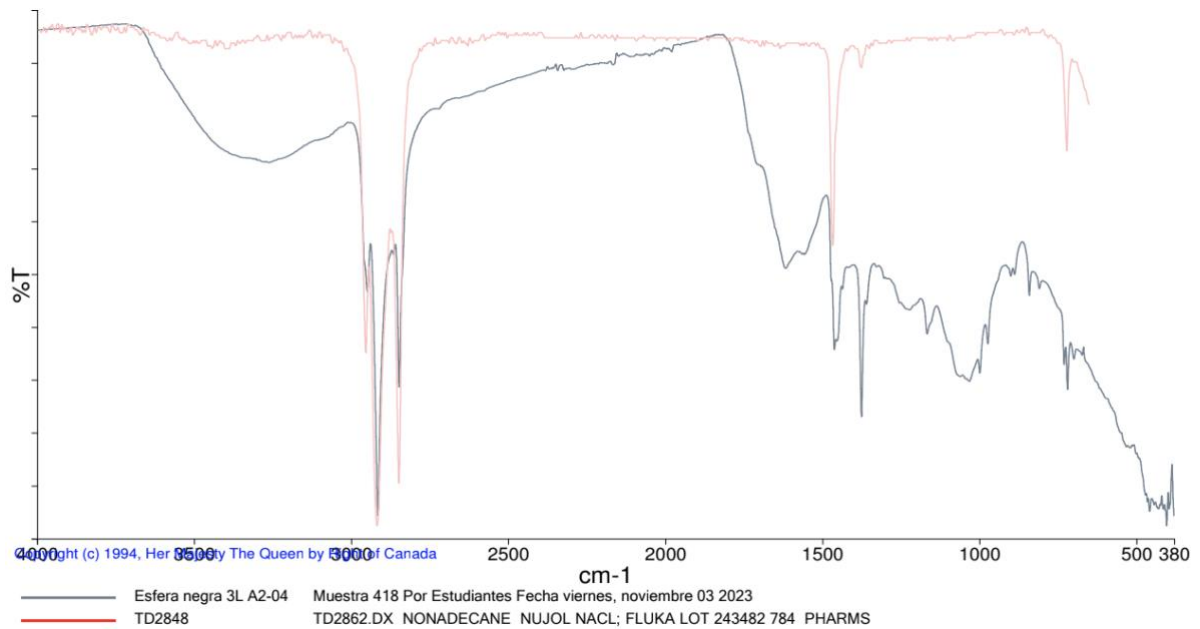


Figura 105. Espectro infrarrojo de microesfera transparente A.2-05 de agua superficial.

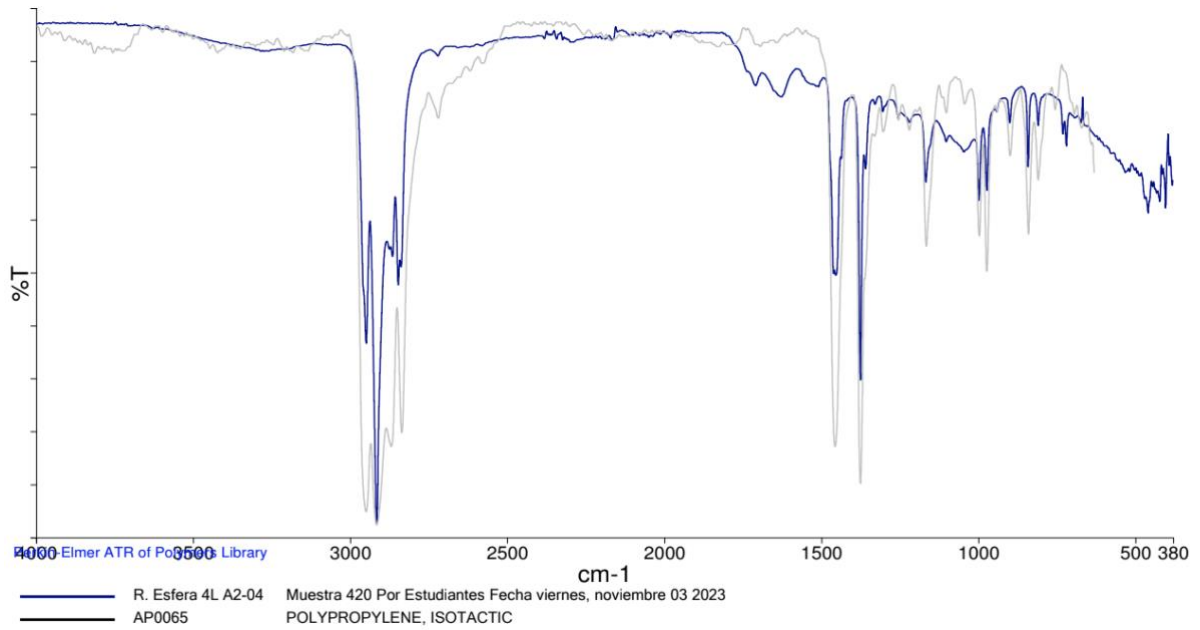
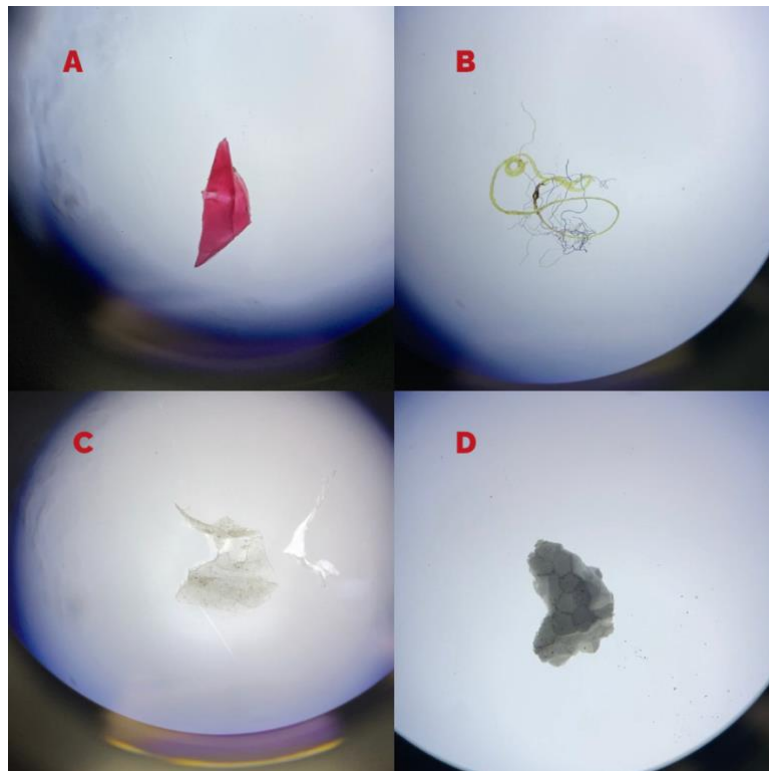


Figura 106. Visualización de los tipos de microplástico analizados.



En la Figura 106 se muestran las formas de microplásticos con los que se hizo el análisis bajo un estereoscopio a 10X, donde A es fragmento, B es fibra, C es film y D es espuma.

Figura 107. Comparación visual de los diferentes tipos de microplástico.

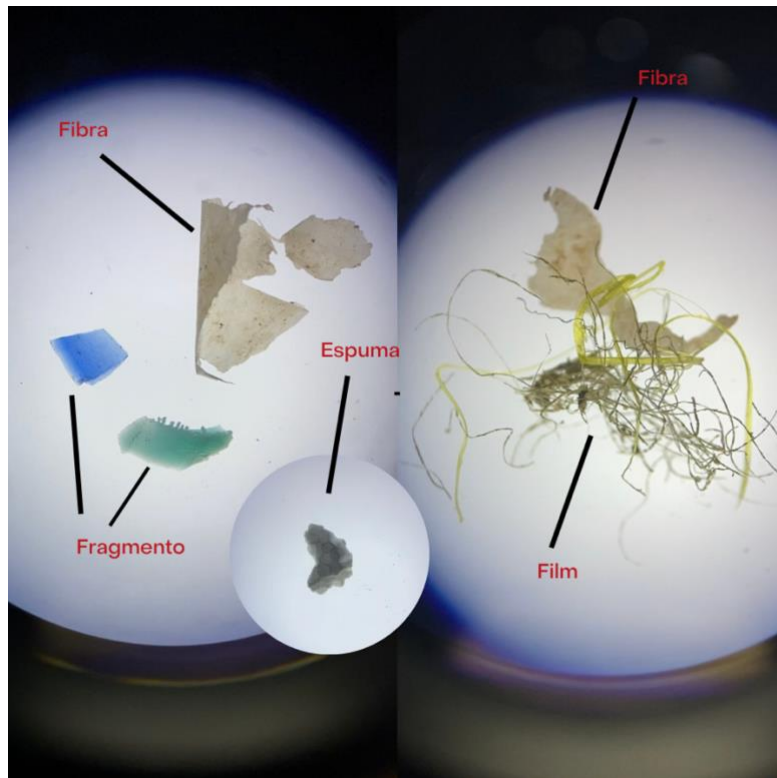


Figura 108. Frascos con muestras de microplásticos.



La Figura 108 muestra la presentación en la cual fueron entregadas las muestras por parte de los investigadores. Estas se presentaban en frascos ámbar clasificados por matriz y forma, y, además unas pinzas para poder manipular las muestras de microplásticos.