
Muestreo cualitativo de contaminantes orgánicos en la Cuenca del Lago de Atitlán, ubicada en Sololá, Guatemala

Javier Andrés Rivas Núñez



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



**Muestreo cualitativo de contaminantes orgánicos en
la Cuenca del Lago de Atitlán, ubicada en Sololá,
Guatemala**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Javier Andrés Rivas Núñez para optar al grado académico de
Licenciado en Química

Guatemala,
2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



**Muestreo cualitativo de contaminantes orgánicos en
la Cuenca del Lago de Atitlán, ubicada en Sololá,
Guatemala**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Javier Andrés Rivas Núñez para optar al grado académico de
Licenciado en Química

Guatemala,
2024

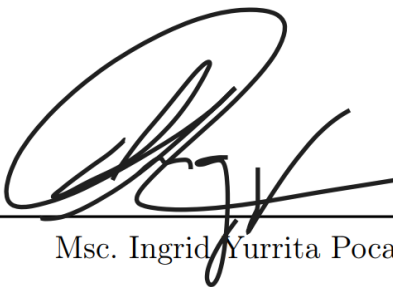
Vo.Bo.:

(f) 
Msc. Ingrid Yurrita Pocasangre

(f) 
Lic. Mónica Martínez Fausto

Tribunal Examinador:

(f) 
Msc. Irma Orellana Catalán

(f) 
Msc. Ingrid Yurrita Pocasangre

(f) 
Lic. Mónica Martínez Fausto

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre del 2024.

Agradecimientos

Agradezco sobre todo a Dios por darme la oportunidad de estudiar una carrera que me apasionó por cuatro años y porque me rodeó de amigos y catedráticos que me apoyaron en todo el camino.

A mis increíbles asesoras que creyeron en mí desde el inicio y me apoyaron con todo lo que les pedí y mucho más. Agradezco a Ingrid Yurrita por hacer tiempo para mí dentro de su horario, me guió durante todo el proyecto y me enseñó mucho. Agradezco a Mónica Martínez porque desde el inicio me abrió las puertas del CEA y con mucha emoción estuvo dispuesta a colaborar en el proyecto, sin ella no podría haber trabajado este tema.

A mis papás por estar siempre a mi lado, apoyarme con todo lo que he necesitado y por darme la oportunidad de estudiar.

A Irma Orellana por estar siempre atenta a los químicos y por su pasión por enseñar y mejorar la carrera.

A Ana Luisa Mendizábal por tenerme paciencia y apoyarme con los análisis, además de enseñarme a trabajar con el GC.

Agradezco a mis compañeros Hugo, Sof, Pau, Cam, Diego y Mario porque se convirtieron en una segunda familia para mí durante estos años de universidad. Ellos fueron mi compañía y motivación para seguir aprendiendo.

A Mateo, Amelia, Nina, Kevin, Ángel, Erick y Astrid, porque vieron el proyecto desde su inicio.

A la UVG por recibirme estos cuatro años y permitirme crecer intelectualmente y desarrollarme como persona.

Índice

Agradecimientos	III
Lista de figuras	VI
Lista de cuadros	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
Introducción	1
Objetivos	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Justificación	3
Marco Teórico	5
Contexto del Lago de Atitlán	5
Ubicación	5
Población	6
Ecosistema	7
Impacto social y económico	7
Impacto humano en la calidad del agua del lago	8
Causas de contaminación	8
Aguas residuales	8
Contaminación por vertederos	10
Uso de plaguicidas y detergentes	10
Contaminantes orgánicos	11
Pesticidas	11
Fármacos y productos de cuidado personal	11
Compuestos ignífugos y plastificantes	12
Lixiviados	12
Contaminantes emergentes	12
Análisis cualitativo de contaminantes orgánicos	13
Métodos de análisis	13
Extracción a partir de soluciones acuosas	13
Micro extracción líquido-líquido dispersiva	14
Cromatografía de gases	14
Cromatografía de gases con detector de masas	16
Antecedentes	17
Metodología	19
Sitio de estudio	19
Diseño, enfoque y tipo de investigación	19
Tipo y tamaño de muestra	19
Hipótesis	19
Criterios de inclusión y exclusión	20
Variables (conceptualización y operacionalización)	20
Instrumentos de medición	20
Metodología	21

Recolección de muestras	21
Aparatos y software	22
Procesamiento de la muestra	22
Análisis de muestras	23
Diagrama de flujo	23
Resultados	24
Discusión de resultados	27
Conclusiones	30
Recomendaciones	31
Referencias	32
Referencias	32
Anexos	36
A Cromatogramas de muestras de agua tomadas el 7 de agosto de 2024	37
B Cromatogramas de muestras de agua tomadas el 28 de octubre 2024	46
C Fotografías de los sitios de muestreo	58

Lista de Figuras

1	Municipios en la cuenca del Lago de Atitlán	6
2	Florecimiento de cianobacterias en el Lago de Atitlán el 22 de noviembre de 2009 . .	9
3	Vertedero El Picacho	10
4	Diagrama con los pasos de la micro extracción líquido-líquido dispersiva	14
5	Diagrama de bloques para un cromatógrafo de gases	15
6	Cromatograma para una muestra de agua contaminada	15
7	Sitios de toma de muestra para el análisis	21
8	Diagrama de flujo de la metodología	23
9	Cromatograma blancos	38
10	Muestra 1 - desembocadura de Río San Francisco	39
11	Muestra 2 - desembocadura de Río Quiscab	40
12	Muestra 3 - Río San Francisco	41
13	Muestra 4 - cuenca alta del Río Tzalá	42
14	Muestra 5 - cuenca media del Río Tzalá	43
15	Muestra 6 - cuenca baja del Río Tzalá	44
16	Muestra 7 - Río San Buenaventura	45
17	Cromatograma blancos	47
18	Muestra 1 - desembocadura Río San Francisco	48
19	Muestra 2 - desembocadura de Río Quiscab	49
20	Muestra 3 - Río San Francisco	50
21	Muestra 4 - cuenca alta del Río Tzalá	51
22	Muestra 5 - cuenca media del Río Tzalá	52
23	Muestra 6 - cuenca baja del Río Tzalá	53
24	Muestra 7 - Río San Buenaventura	54
25	Muestra 8 - Río Catarata	55
26	Muestra 9 - PTAR1	56
27	Muestra 10 - PTAR2	57

Lista de Cuadros

1	Estimación de la población de los municipios alrededor del Lago de Atitlán en 2024 .	7
2	Plantas de tratamiento de aguas residuales que cumplen la normativa del Acuerdo Gubernativo No. 12-2011	9
3	VARIABLES ESTUDIADAS	20
4	Instrumento de medición	21
5	Cuadro para tabular resultados	21
6	Puntos de muestreo con coordenadas	22
7	Compuestos orgánicos identificados en muestreo del 7 de agosto	24
8	Descripción de los compuestos identificados en muestreo 7 de agosto	25
9	Compuestos orgánicos identificados en muestreo del 28 de octubre	25
10	Descripción de los compuestos identificados en muestreo 28 de octubre	26
11	<i>Fotografías de los sitios de muestreo</i>	<i>58</i>

Durante los últimos años, el Lago de Atitlán representa una preocupación constante debido a la creciente contaminación por aguas residuales, plaguicidas y otros contaminantes orgánicos. Esta contaminación provoca el deterioro de la calidad del agua, el florecimiento de cianobacterias tóxicas y riesgos significativos para la salud humana y el ecosistema. Este estudio evalúa la presencia de contaminantes orgánicos en la Cuenca del Lago de Atitlán mediante cromatografía de gases-masas, con el objetivo de determinar los patrones de distribución de estos compuestos en distintos puntos de la cuenca. Se analizan muestras de agua recolectadas en diez puntos: Río Tzalá (cuenca alta, media y baja), desembocadura del Río San Francisco, desembocadura del Río Quiscab, Río San Francisco, Río San Buenaventura, Río Catarata, efluente de la PTAR Tzanjuyú y afluente de la PTAR de San Andrés Semetabaj. Las muestras se procesan mediante micro extracción líquido-líquido dispersiva, utilizando cloroformo como solvente de extracción, seguida de análisis mediante cromatografía de gases-masas.

Los resultados indican que los contaminantes predominantes corresponden a productos químicos plastificantes, productos de cuidado personal, detergentes y fragancias/aromas. Se identifica el ingreso de aguas residuales y el lavado de ropa en ríos y el lago como las principales fuentes de estos contaminantes, en particular los detergentes. La presencia de estas sustancias se considera perjudicial para el ecosistema, ya que pueden actuar como disruptores endocrinos en animales y humanos. Para futuros análisis, se recomienda cuantificar los compuestos detectados, especialmente los plastificantes, con el fin de comparar su concentración entre los distintos sitios de muestreo. Además, se sugiere realizar estudios adicionales con muestreos más frecuentes y prolongados para evaluar la variabilidad de los contaminantes en función del tiempo.

Palabras clave: contaminantes emergentes, cromatografía de gases-masas, micro extracción líquido-líquido dispersiva, aguas residuales, compuestos plastificantes, detergentes.

Abstract

In recent years, Lake Atitlán remains a major concern due to increasing pollution from wastewater, pesticides, and other organic contaminants. This pollution leads to the deterioration of water quality, the proliferation of toxic cyanobacterial blooms, and significant risks to human health and the ecosystem. This study evaluates the presence of organic contaminants in the Lake Atitlán watershed using gas chromatography-mass spectrometry to identify contamination patterns across different locations. Water samples are collected from ten sites: Río Tzalá (upper, middle, and lower basin), Río San Francisco mouth, Río Quiscab mouth, Río San Francisco, Río San Buenaventura, Río Catarata, the Tzanjuyú WWTP (wastewater treatment plant) effluent, and the influent of the San Andrés Semetabaj WWTP. The samples undergo treatment using dispersive liquid-liquid microextraction (DLLME) with chloroform as the extraction solvent, followed by gas chromatography-mass spectrometry analysis.

The results indicate that plasticizers, personal care products, detergents, and fragrances are the predominant contaminants. Wastewater discharge and laundry activities in rivers and the lake are identified as major sources of contamination, particularly for detergents. These contaminants pose a risk to the ecosystem due to their endocrine-disrupting potential in both wildlife and humans. Future research should focus on quantifying detected compounds, particularly plasticizers, to compare their concentrations across sampling sites. Additionally, long-term and more frequent monitoring is recommended to better understand the diversity of contaminants present in the lake over time.

Keywords: emerging contaminants, gas chromatography-mass spectrometry, dispersive liquid-liquid microextraction, wastewater, plasticizers, detergents.

El Lago de Atitlán es uno de los cuerpos de agua más importantes de Guatemala; es conocido como un ícono nacional por los paisajes que ofrece. Además, la cuenca del lago es habitada por alrededor de 320,000 personas (INE, 2020). El lago es una fuente de alimento y agua para los habitantes de la cuenca; además, sustenta los medios de vida de la población local al proveer servicios como turismo, restaurantes y transporte (Neher et al., 2021). En los últimos años se ha evidenciado un deterioro en la calidad del agua del lago, especialmente desde 2009, cuando se registró una proliferación de cianobacterias en su superficie (Rejmánková et al., 2011).

Debido a la preocupación por los posibles efectos de la contaminación del lago en la población y en el ecosistema, se ha comenzado a monitorear varios parámetros del agua. Dentro de estos parámetros se pueden mencionar mediciones de pH, oxígeno disuelto, temperatura, concentración de clorofilas α , florecimientos de cianobacterias, niveles de fósforo y nitrógeno, coliformes totales, *E. coli*, etc (Reyes et al., 2019). Existen otros parámetros de importancia de los cuales se tiene poca información y que es importante incluirlos en futuros monitoreos. Entre estos destacan los niveles de contaminantes orgánicos, como pesticidas, detergentes, fármacos y compuestos plastificantes, algunos de los cuales pueden actuar como disruptores endocrinos (Khalid y Abdollahi, 2021), además de tener otros posibles efectos en la salud.

El objetivo de este proyecto fue evaluar contaminantes orgánicos en la Cuenca del Lago de Atitlán mediante cromatografía de gases-masas para identificar patrones de presencia en distintos puntos de la cuenca. Para lograr esto, se evaluaron muestras de agua de distintos puntos de la cuenca, incluyendo puntos de muestreo en ríos y en el lago. Con esta información, se determinó cuáles son los contaminantes que se identificaron con más frecuencia y los que deberían ser priorizados para siguientes monitoreos.

Para el análisis de las muestras se realizó una micro extracción líquido-líquido (DLLME, por sus siglas en inglés), seguido de una inyección en un cromatógrafo de gases acoplado a detector de masas. Este análisis permitió identificar los compuestos orgánicos en las muestras de agua al comparar los espectros obtenidos con la base de datos NIST 2.0 de espectros de masas. Los datos recopilados permitieron determinar los patrones de contaminación en distintos puntos de la cuenca del lago e identificar algunas de sus posibles causas.

Objetivo general

Determinar la presencia de contaminantes orgánicos en la Cuenca del Lago de Atitlán que presentan un problema potencial de contaminación al agua.

Objetivos específicos

- Evaluar contaminantes orgánicos en la Cuenca del Lago de Atitlán por medio de cromatografía de gases-masas para determinar los patrones en la presencia de contaminantes en diferentes puntos de la cuenca.
- Determinar los compuestos orgánicos que representan un problema potencial de contaminación en el agua, para evaluar las posibles causas de su presencia.

El Lago de Atitlán es uno de los lagos más importantes en Guatemala debido al gran volumen de agua que almacena y por su posición geográfica; está rodeado por 15 municipios en donde habitan cerca de 320,000 personas (INE, 2020). El lago es un ícono nacional debido al paisaje que ofrece, los tres volcanes a su alrededor (Tolimán, Atitlán y San Pedro) lo hacen atractivo para turistas locales y extranjeros. Además, el lago es una fuente de alimento, energía y agua para la población que lo rodea; proporciona agua, alimento diario y agua de riego para la agricultura. También sustenta los medios de vida de las personas al brindar servicios rentables como turismo, restaurantes y transporte (Neher et al., 2021).

El lago ha sido monitoreado extensamente durante los últimos años a causa de la creciente contaminación y empobrecimiento de la calidad de su agua. Uno de los primeros problemas que llamó la atención de la comunidad científica fue el florecimiento de cianobacterias registrado en 2008 seguido de uno en 2009, año en que las cianobacterias llegaron a cubrir hasta el 40 % de la superficie del lago (Rejmánková et al., 2011). Este acontecimiento generó preocupación pero también interés por monitorear distintos parámetros del lago. Desde entonces, el lago se ha estudiado para determinar causas y consecuencias de su contaminación.

Con el aumento de la población alrededor del lago, también ha aumentado la cantidad de desechos que llegan a él, incluyendo aguas residuales domiciliarias y agroindustriales (Romero, 2013). Debido al mal manejo de residuos en la cuenca, también ha aumentado el ingreso de basura al lago; ya que muchas personas depositan la basura de sus hogares en vertederos clandestinos (Sáenz, 2015). Estos vertederos contaminan el agua cuando el viento y la lluvia arrastran la basura y lixiviados al lago (Noriega et al., 2020).

Una fuente de preocupación reciente ha sido el vertedero el Picacho, ubicado entre Sololá y Santa Cruz la Laguna (Julajuj, 2017). Este es un vertedero a cielo abierto que por medio de erosión contamina el suelo y cuerpos de agua de la cuenca (Aquino, 2021). Los lixiviados liberados por la basura van directamente al lago y se desconoce cuáles contaminantes pueden estar presentes en ellos. La Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno (AMSCLAE) ha estado proponiendo el cierre de este vertedero desde el 2015 ya que es un vertedero clandestino que no cuenta infraestructura adecuada para el tratamiento de basura y que además se encuentra dentro de un área protegida (AMSCLAE, 2015).

Dentro de las principales problemáticas también se debe mencionar la incapacidad de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) alrededor del lago para tratar las aguas a él: las PTAR pueden tratar únicamente el 20 % de las aguas residuales producidas en la cuenca (Ferráns et al., 2018). Además, es importante considerar el ingreso de nutrientes al lago por medio de detergentes y plaguicidas. El ingreso excesivo de nutrientes al lago favorece los florecimientos de cianobacterias,

algunas de ellas tienen la capacidad de producir cianotoxinas que afectan la salud humana (Romero, 2013).

La contaminación de ecosistemas acuáticos suele resultar en importantes problemas negativos para la salud y la mortalidad. Considerando que el Lago de Atitlán es la principal fuente de agua potable para más de 70,000 personas de al menos cinco municipios (Ferrás et al., 2018), es importante asegurar la calidad del agua y velar por la seguridad de quienes dependen del lago. La degradación en la calidad del agua puede conducir a la propagación de enfermedades como diarrea, disentería e ictericia (Bashir et al., 2020).

También se conoce que los organismos que viven en el agua y en sus alrededores pueden ser afectados por los contaminantes, especialmente si se trata de pesticidas y otros disruptores endocrinos. Debido a que en la cuenca del lago se cultiva café, maíz, frijol, trigo, papas, caña de azúcar y algunos vegetales (Neher et al., 2021), los agricultores utilizan de abonos, fertilizantes y pesticidas para maximizar el rendimiento de sus cosechas. Algunas veces estos agroquímicos se aplican sin conocer el contenido nutricional de un suelo, lo que provoca su acumulación. Con la lluvia, los químicos y nutrientes se trasladan a los cuerpos de agua y los contaminan (Noriega et al., 2020).

En el lago se suelen monitorear parámetros como los niveles de fósforo, nitrógeno y carbono, temperatura, pH, turbidez, carbono total, carbono inorgánico, carbono orgánico, etc. Además de bacterias como *E. coli* coliformes totales (Reyes et al., 2019). Sin embargo, se desconoce cuáles otros contaminantes deberían estarse midiendo. Algunos posibles compuestos de interés pueden incluir pesticidas, detergentes, fármacos, compuestos plastificantes y otros. Dependiendo de la toxicidad conocida de los compuestos encontrados, se puede determinar cuáles contaminantes presentan mayor relevancia para continuar estudiándolos más a detalle.

El análisis de moléculas orgánicas con un equipo de cromatografía de gases-masas permite identificar compuestos no monitoreados que influyen en la contaminación del lago. A partir de esta información, se pueden priorizar los compuestos más relevantes en futuras investigaciones, con el objetivo de cuantificar sus concentraciones e identificar las causas de su presencia. Como parte del compromiso con la investigación y el bienestar del país, la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) contribuye activamente a estos estudios a través del Centro de Estudios de Atitlán (CEA), un instituto de investigación vinculado a la universidad que desarrolla estudios enfocados en el monitoreo de contaminantes y la conservación del ecosistema. El CEA se describe como un agente generador, integrador, formador, coordinador y comunicador de investigación científica en el Lago de Atitlán y su cuenca, en las áreas de estado ecológico, ambiental y salud de sus habitantes" (UVG, s.f.). Con el apoyo del CEA y los laboratorios de la UVG, es posible llevar a cabo el muestreo del lago y la identificación de contaminantes de interés, contribuyendo así a la protección del ecosistema y al bienestar de las comunidades que dependen de él.

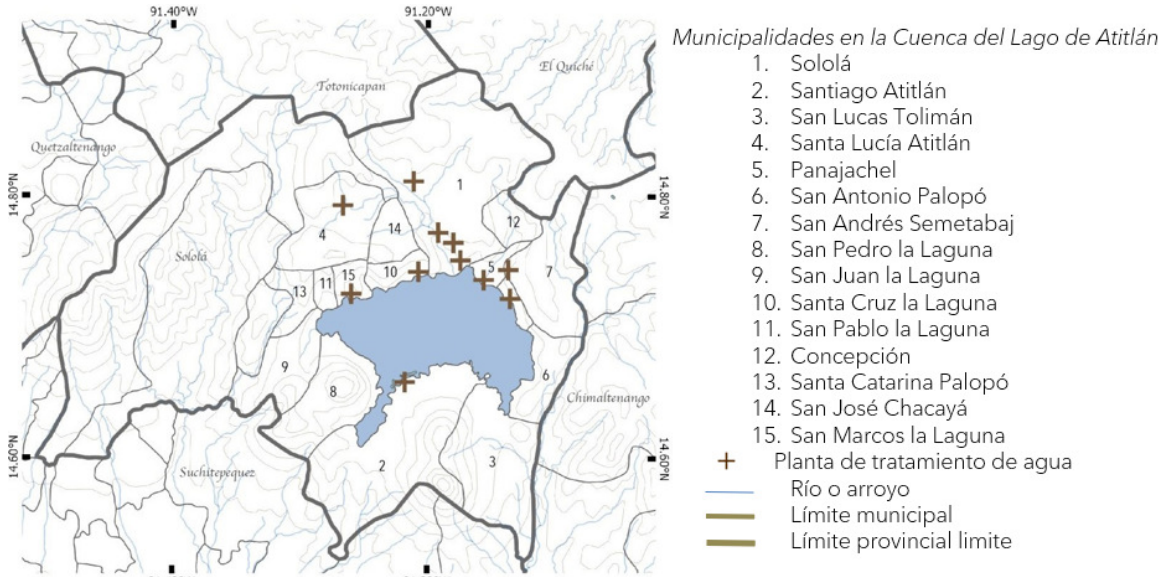
Contexto del Lago de Atitlán

El Lago de Atitlán fue formado hace aproximadamente 84,000 años, cuando un volcán hizo erupción y la caldera formada se llenó con agua de los ríos San Francisco y Quiskab, que aún hoy desembocan en el lago (Neher et al., 2021). El área total de la cuenca es de 580 km² y el área del lago es de 130 km², se estima que el volumen del lago es de 25 km³ (Oliva et al., 2010). Un aspecto característico de la cuenca es la rica biodiversidad que presenta, incluyendo diversas especies de plantas y mamíferos endémicos a la región (GNF, s.f.). Además, en la cuenca habitan más de 300,000 personas, de las cuales se estima que unas 70,000 utilizan el agua del lago como su principal fuente de agua potable (INE, 2020; Ferráns et al., 2018).

Ubicación

El Lago de Atitlán se ubica en la parte suroeste de Guatemala en el departamento de Sololá, a una altitud de 1,562 m sobre el nivel del mar (Ferráns et al., 2018). Es uno de los lagos más grandes de Guatemala, con 125.77 km²; además es el más profundo de Centroamérica, con una profundidad máxima de 327.56 m (Morales et al., 2018). El lago se encuentra rodeado por tres volcanes: Atitlán (con una altura de 3,537 m sobre el nivel del mar), Tolimán (con 3,158) y San Pedro (con 3,020 m) (INGUAT, 2016). Además, alrededor del lago hay 15 municipios, en los cuales se estima que en 2024 habitan unas 317,000 personas (INE, 2020). En la Figura 1 se presenta la ubicación de cada uno de los municipios.

Figura 1
Municipios en la cuenca del Lago de Atitlán



Nota. Adaptado de Ferráns et al. (2018).

Población

El Lago de Atitlán es rodeado por 15 municipios en los cuales se estima que para 2024 habitan 316,862 personas (INE, 2020). Cerca del 70% de estas personas viven en pobreza y el 32% vive en pobreza extrema. Los municipios con mayor población son Sololá y Santiago Atitlán, con 102,000 y 47,000 habitantes respectivamente. Las principales actividades económicas de la región son el turismo, seguido de la agricultura y la ganadería. Alrededor de la cuenca se cultiva café, maíz, frijoles, papas, caña de azúcar y algunos vegetales (Neher et al., 2021). En el cuadro 1 se presenta una estimación de la población por cada municipio para el año 2024.

Cuadro 1

Estimación de la población de los municipios alrededor del Lago de Atitlán en 2024

Municipio	Población
Sololá	102,208
San José Chacayá	5,491
Santa Lucía Utatlán	22,064
Concepción	7,562
San Andrés Semetabaj	15,531
Panajachel	16,903
Santa Catarina Palopó	5,008
San Antonio Palopó	16,085
San Lucas Tolimán	32,465
Santa Cruz La Laguna	8,122
San Pablo La Laguna	8,184
San Marcos La Laguna	3,044
San Juan La Laguna	14,260
San Pedro La Laguna	12,528
Santiago Atitlán	47,407
Total	316,862

Nota. Se presenta la estimación de la población de cada municipio alrededor del lago para el año 2024, adaptado de INE (2020)

Alrededor del lago habitan muchas personas mayas, las comunidades mayas son una parte importante del lugar ya que viven ahí desde hace muchos años. Hay tres grupos Mayas que viven en la cuenca: K'iches, kaqchikeles y Tz'utujiles. Estos grupos mayas tienen gran influencia en la sociedad que rodea el lago ya que gran parte de la población tiene raíces conectadas a estos grupos (Neher et al., 2021).

Ecosistema

Las regiones que rodean el lago se componen de bosques nubosos y lluviosos, donde se puede encontrar pino-encino y coníferas. También se pueden encontrar 798 especies de plantas diferentes, 61 de ellas endémicas. En cuanto a la fauna, rica biodiversidad incluye diversos animales: 116 especies de reptiles y anfibios, 12 de ellas endémicas (GNF, s.f.).

En la región también hay una variedad de mamíferos. Se han reportado 141 especies, de las cuales 7 son endémicas. Dentro de estas se puede mencionar el ratón ciervo (*Peromyscus guatemalensis*), el mono araña de manos negras (*Ateles geoffroyi*), y el oso hormiguero (*Tamandua mexicana*). De las especies de mamíferos, el 28 % se encuentran en la lista de especies amenazadas del Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP). Además, alrededor del lago también se pueden encontrar 236 especies de aves, de las cuales el 28 % se encuentran en la lista de especies amenazadas (GNF, s.f.).

Impacto social y económico

Debido a que el Lago de Atitlán es considerado como uno de los más bellos del planeta, el turismo es una de las principales actividades económicas de la región. Los turistas pueden visitar las playas lacustres de Panajachel, San Lucas Tolimán, San Pablo la Laguna entre otras. Así como los centros mayas de San Antonio Palopó, San Pedro la Laguna y Santiago Atitlán, además del atractivo que ofrecen los volcanes Atitlán, Tolimán y San Pedro (Sánchez y Propin, 2017).

El sector de servicios también es de gran importancia; en el área existen varios restaurantes, hoteles, tiendas de abarrotes, tiendas de artesanías y empresas de transporte (autobús y barco). Para los municipios donde el turismo no es la actividad principal, las personas se dedican a la agricultura y ganadería. Alrededor del lago se cosecha café, maíz, frijol, trigo, papa, caña de azúcar y hortalizas (Ferráns et al., 2018)

Las cifras del Instituto Guatemalteco de Turismo (INGUAT) indican que en el año 2022 el turismo interno en el país generó Q48 mil millones de quetzales. Esta cifra aumentó a Q50 mil millones en el 2023 (Bolaños, 2024). El turismo representa una oportunidad de trabajo para muchas personas en los alrededores del lago. Además de proveer de agua y alimento, el lago también permite generar ingresos e impulsar los negocios de muchos guatemaltecos (Ferráns et al., 2018)

Impacto humano en la calidad del agua del lago

Debido a la gran población que rodea al lago, este es amenazado por la descarga de aguas residuales, deforestación, erosión, mal manejo de recursos y falta de conciencia ambiental (Ferráns et al., 2018). La Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno (AMSCLAE) ha reportado por varios años que el agua del lago no es apta para el consumo humano sin un previo tratamiento. Esto se debe a que el agua presenta microorganismos que llegan a ella por medio de actividades de agricultura, aguas residuales, lixiviados de rellenos sanitarios, etc. que implican un riesgo de transmisión de enfermedades hídricas (AMSCLAE, 2018).

Además del efecto en la salud humana, el deterioro en la calidad del agua también puede afectar el ecosistema y el desarrollo económico de la región. El ingreso de aguas residuales al lago cambia su ecología, promoviendo la proliferación de bacterias que utilizan recursos que estarían destinados a otras especies (Neher et al., 2021). Además, el cambio en la acidez y la temperatura del lago a causa de los contaminantes que llegan a él también puede tener un efecto negativo en el ecosistema (Romero, 2013)

Debido al aumento en turbidez del agua y la presencia de cianobacterias, el lago también sufre un deterioro estético. Esto lo hace menos atractivo a turistas y disminuye la cantidad de personas viajan a él. La contaminación del lago también hace que disminuyan sus especies animales, lo cual disminuye la pesca y los ingresos de las personas que dependen de esta actividad (Ferráns et al., 2018).

Causas de contaminación

Aguas residuales

En 2013 se estimó que en la cuenca del lago se producen 7.75 millones de m³/año de aguas residuales domésticas, de las cuales el 17.77 % (1.37m³/año) se vierte directamente al lago. Además, se producen 15,562 m³/año de aguas residuales de agroindustria, de las cuales el 100 % se vierte al lago directamente (Romero, 2013).

El estudio realizado por Ferráns et al. en 2018 indicó que del 55 % de la población que vierte sus aguas residuales por sistemas de alcantarillado, las plantas de tratamiento pueden tratar únicamente el 20 %; el otro 35 % se pierde por fugas o se vierte directamente a los ríos afluentes al lago. El restante 45 % de la población utiliza sistemas de saneamiento *in situ* (fosas sépticas, pozos de absorción y letrinas secas) aunque no hay información acerca del mantenimiento o funcionamiento de estos.

Otro gran problema con las aguas residuales es que las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) no cumplen con los parámetros de remoción de nutrientes y contaminantes.

En el cuadro 2 se presenta la información obtenida de muestreos de PTAR realizados en 2019 y 2020 para verificar el cumplimiento de las normativas establecidas para cada parámetro. Se puede notar que en su mayoría, las PTAR no funcionan de acuerdo con las normativas.

Cuadro 2

Plantas de tratamiento de aguas residuales que cumplen la normativa del Acuerdo Gubernativo No. 12-2011

Año	2019	2020
Potencial de hidrógeno (pH)	8	7
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	4	2
Demanda química de oxígeno (DQO)	2	1
Fósforo total	5	4
Nitrógeno total	2	0
Sólidos en suspensión	1	4
Coliformes fecales	3	2
Plantas muestreadas	9	7

Nota. Se presenta el total de PTAR muestreadas en los años 2019 y 2020 y el número de PTAR que cumplen los parámetros estudiados. Los datos fueron adaptados de Barreno y cols. (2019) y Barreno y cols. (2020).

Otro problema causado por el ingreso de las aguas residuales al lago son los florecimientos de cianobacterias; este fenómeno ha sido documentado en varios estudios sobre la calidad del agua. Las cianobacterias crecen de manera desproporcionada con el incremento de los niveles de fósforo y nitrógeno provenientes de los desechos domésticos e industriales. Los primeros florecimientos fueron observados en los años 2008 y 2009. En 2009 se reportó que las cianobacterias cubrieron el 40%, como se observa en la Figura 2. Debido a que las cianobacterias producen toxinas dañinas a humanos y animales, es importante monitorear sus niveles en el lago para determinar si presentan un riesgo a la salud, especialmente en los meses donde se observan florecimientos (Rejmánková et al., 2011).

Figura 2

Florecimiento de cianobacterias en el Lago de Atitlán el 22 de noviembre de 2009



Nota. Imagen obtenida de NASA Earth Observatory (2009). Recuperado de <https://earthobservatory.nasa.gov/images/41385/harmful-bloom-in-lake-atitlan-guatemala>.

Contaminación por vertederos

Debido al mal manejo de desechos sólidos en las municipalidades que rodean al lago, muchas personas optan por desechar los residuos de sus hogares en vertederos públicos. Esta basura es arrastrada por la lluvia y los ríos a los cuerpos de agua donde se acumula año con año (Noriega et al., 2020). En 2015 se reportó que hay al menos 100 vertederos clandestinos en la cuenca, aunque se desconoce el dato exacto (Sáenz, 2015). Uno de los vertederos más grandes es el Picacho (Figura 3), debido a su cercanía al lago es de preocupación, ya que la basura y lixiviados llegan fácilmente a él. Desde 2015 se ha intentado clausurar el vertedero, aunque los planes no han sido exitosos (Aquino, 2021).

El vertedero Picacho recibe 23.7 toneladas de basura cada día, cuenta con una superficie de 6,794 m². Además de no contar con infraestructura adecuada para el tratamiento y reciclaje, el vertedero se encuentra en un área protegida (Aquino, 2021). A pesar de que se han propuesto alternativas para cerrar y movilizar el vertedero desde hace varios años (AMSCCLAE, 2016) el proceso aún no se ha llevado a cabo.

Figura 3

Vertedero El Picacho



Nota. Imagen obtenida de proceso.gt (2021). Recuperado de <https://procesogt.gt/2021/02/22/borrador-automatico-solola/>

Uso de plaguicidas y detergentes

Debido a que alrededor del lago se cultiva café, maíz, frijol, trigo, papa, caña y algunos vegetales (Ferráns et al., 2018), los agricultores utilizan agroquímicos como abonos, plaguicidas y herbicidas para garantizar el desempeño de sus cosechas. En ocasiones los agroquímicos son aplicados sin control y medida. Debido a que estos contienen contenidos tóxicos al ecosistema, además de fósforo y nitrógeno, son uno de los principales contaminantes que provocan la eutrofización y los florecimientos de cianobacterias (Noriega et al., 2020). Además, la deforestación ha permitido que el suelo se filtre

hacia el lago durante la temporada de lluvias en la región, arrastrando los agroquímicos al lago (Fieser, 2009).

Aparte del fósforo que ingresa a causa de los agroquímicos, algunos productos de limpieza también contienen fósforo. Debido a que algunas personas lavan su ropa en las orillas del lago utilizando jabones fosfatados, esta también es una fuente de contaminación que se debe considerar (Bocel, 2013)

Contaminantes orgánicos

Las fuentes de agua como ríos y lagos pueden ser contaminados por cientos de químicos provenientes de emisiones industriales, aguas residuales domésticas y de agroindustria. Dentro de estos contaminantes se puede mencionar compuestos cuyos efectos son conocidos desde hace varios años, como los plaguicidas algunos residuos industriales. Otros contaminantes entran en la clasificación de “sustancias químicas de preocupación emergente”, o “contaminantes emergentes”. Dentro de estos se incluyen todas las sustancias detectadas en el medio ambiente, pero que actualmente no están incluidas en los programas de seguimiento rutinarios y cuyo destino, comportamiento y efectos (eco)toxicológicos aún no se conocen bien (Houtman, Kroesbergen, Baggelaar, y Van Lieverloo, 2019). Algunos de los contaminantes de mayor interés en cuerpos de agua se discuten a continuación:

Pesticidas

La agricultura depende fuertemente del uso de pesticidas sintéticos (herbicidas, fungicidas e insecticidas) para prevenir pérdidas a causa de plagas. Debido a que los pesticidas se aplican en grandes cantidades, a veces sin control, existe una alta posibilidad de que causen daños en comunidades distintas a su objetivo (Schäfer, Van Den Brink, y Liess, 2011). Estos químicos pueden contaminar el aire, el agua y el suelo, afectando tanto a las plantas como a la fauna. Además, los pesticidas pueden acumularse en el cuerpo humano, causando distintos problemas de salud; se ha determinado una relación entre la exposición a insecticidas y el riesgo de cáncer, diabetes, problemas respiratorios, desórdenes neurológicos y síndromes reproductivos (Rani et al., 2021).

Cuando los pesticidas llegan a un ecosistema acuático, pueden interactuar con factores bióticos y abióticos. Los factores abióticos pueden provocar degradación o adsorción de los compuestos en sedimentos o materia orgánica. La interacción con las partes bióticas implica la absorción, metabolización y acumulación en los organismos. Esto puede afectar tanto a animales, plantas, humanos y otros organismos del ecosistema (Schäfer et al., 2011).

Fármacos y productos de cuidado personal

A pesar del gran beneficio que presentan los medicamentos a las personas, estos pueden tener efectos no deseados en animales, microorganismos y el ecosistema en general. Se conocen los efectos de algunos medicamentos en ciertos animales, pero hay otros que no están documentados. Además, algunos medicamentos pueden tener efectos en bacterias y animales muy por debajo de las concentraciones que se utilizan habitualmente en las pruebas de seguridad y eficacia, lo cual dificulta conocer su impacto (Boxall, 2004).

De manera similar, los productos de cuidado personal, dentro de los cuales se puede mencionar productos de cuidado para cabello y piel, bloqueadores solares, repelentes, detergentes, jabones, etc. También pueden afectar de maneras no deseadas el ecosistema acuático cuando llegan a él por medio

del descarte de aguas sin previo tratamiento o incluso en la piel de las personas que se duchan en el lago. Uno de los mayores problemas con los fármacos y productos de cuidado personal es que pueden actuar como disruptores endocrinos. Esto provoca irregularidades en los sistemas hormonales de animales y humanos que utilizan el agua contaminada (Khalid y Abdollahi, 2021). Por esta razón es de importancia conocer la presencia de dichos compuestos en el ecosistema.

Compuestos ignífugos y plastificantes

Los compuestos ignífugos son sustancias que poseen un esqueleto organofosforado o halogenado. Se utilizan en productos comerciales y de consumo (como muebles y aislamiento de edificios) para cumplir con los estándares de inflamabilidad. También están presentes en electrónicos como computadoras y televisores, además de algunos textiles. Estos compuestos inhiben o retrasan la propagación del fuego suprimiendo las reacciones de combustión o formando una capa protectora en la superficie del material. Algunos compuestos ignífugos son de importancia en el estudio de contaminantes ya que se suelen encontrar en aguas residuales domésticas. También pueden llegar a cuerpos de agua a través de plantas de tratamiento incapaces de filtrar estos contaminantes (Houtman et al., 2019; Speight, 2017).

En muchos casos, además de tener una toxicidad reportada, los compuestos ignífugos pueden degradarse en compuestos que también son tóxicos, algunas veces incluso más tóxicos que el compuesto original. Esto es cierto para compuestos halogenados con anillos aromáticos que sufren degradación cuando se calientan, ya sea durante su producción, incendios, reciclaje o exposición al sol. El desecho de materiales con compuestos ignífugos es complicado, pues los compuestos pueden contaminar comunidades cercanas a vertederos e incluso al reciclarlos es difícil controlar los subproductos. En algunos países se ha observado que los compuestos ignífugos filtran de los vertederos dentro de los lixiviados producidos (Speight, 2017).

Los plastificantes son compuestos orgánicos de bajo peso molecular que se utilizan en la producción de plásticos. Los plastificantes se suelen encontrar en cuerpos de agua que son afectados por la contaminación plástica, debido a que se desprenden de botellas y recipientes. El problema con estos compuestos es que pueden actuar como disruptores endocrinos, por lo que su impacto en ríos y lagos debe ser estudiado a profundidad (Chakraborty et al., 2021).

Lixiviados

Se conoce como lixiviado a cualquier líquido contaminado que se genera a partir del agua que se filtra a través de un sitio de eliminación de desechos sólidos, acumula contaminantes y se mueve hacia áreas subterráneas o cuerpos de agua (Cheremisinoff, 1997). Debido a la gran cantidad de vertederos que se encuentran en la cuenca del lago (Sáenz, 2015), es importante determinar si los lixiviados generados están llegando al lago. En caso de que fuera así, es importante conocer cuáles compuestos orgánicos están ingresando para monitorear estos contaminantes más de cerca.

Para determinar la presencia de contaminantes en el lago provenientes de un vertedero es importante seleccionar un punto de muestreo de agua cercano a dicho vertedero. Al establecer la presencia de algún contaminante con mayor frecuencia en este punto que en otros sitios de muestreo más alejados, es posible determinar una relación entre el vertedero y el contaminante encontrado.

Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes se definen como un grupo de sustancias químicas y microorganismos que han generado preocupación debido a los riesgos significativos que representan

para la salud humana y los ecosistemas. Aunque muchos de estos contaminantes aún no están incluidos en los protocolos de gestión existentes, su presencia ambiental y efectos tóxicos potenciales los han colocado en el foco de atención científica y regulatoria (Feng, Deng, Yang, Miao, y Ngien, 2023). La denominación “emergentes” refleja el hecho de que están “emergiendo” en términos de conciencia pública y científica debido a avances en la tecnología de detección y a una mayor atención sobre sus posibles impactos.

Dentro de los principales contaminantes presentes en este grupo se encuentran los productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, insecticidas, retardantes de llama, aditivos industriales, surfactantes, plastificantes y nano materiales (Feng et al., 2023). Se conoce que los contaminantes emergentes pueden demostrar una baja toxicidad aguda, pero causar efectos reproductivos significativos a niveles muy bajos de exposición. Además, en organismos acuáticos, es difícil determinar los efectos de exposición hasta que alcanzan la vida adulta; por lo que es difícil determinar el grado intoxicación utilizando pruebas convencionales (EPA, 2024a).

Análisis cualitativo de contaminantes orgánicos

Para monitorear un río o lago es importante primero determinar cuáles parámetros o contaminantes son de mayor relevancia para poder enfocarse en estos. La selección de contaminantes se basa predominantemente en la información disponible sobre su relevancia ambiental, basándose en parámetros como persistencia, potencial de bioacumulación, propiedades toxicológicas y eco-toxicológicas (Schwarzbauer y Ricking, 2009). Para identificar los contaminantes orgánicos es posible analizar una muestra del agua con un equipo de cromatografía líquida o gaseosa, acoplado a un detector de masas. El detector de masas permite conocer la estructura molecular de los compuestos presentes en la muestra, para luego determinar qué tipo de contaminante es y cómo podría estar afectando al ecosistema (Houtman et al., 2019).

Conociendo cuáles contaminantes están presentes en un río o lago, se puede determinar cuáles son de mayor relevancia para su monitoreo. A continuación se consigue un estándar de dicho compuesto determinar su concentración en una muestra de agua. Estos monitoreos se realizan en países tales como Alemania (Schwarzbauer y Ricking, 2009), España (Gómez et al., 2009) y (Peñalver et al., 2022) , China (Yao et al., 2013), Países Bajos (Houtman et al., 2019) y algunos otros.

A pesar de que los monitoreos cualitativos de contaminantes orgánicos permiten conocer cuáles contaminantes están presentes en un cuerpo de agua, no permiten obtener información acerca de su concentración. Esta es una limitación importante debido a que la toxicidad de un compuesto está fuertemente vinculada a su concentración. Si se desea determinar la concentración de alguno de los contaminantes seleccionados, se debe preparar una curva de calibración utilizando reactivos de referencia (estándar) de alta pureza, lo cual representa un costo significativo, además de tiempo.

Métodos de análisis

Extracción a partir de soluciones acuosas

Debido a que los contaminantes orgánicos suelen presentar bajas concentraciones en muestras acuosas, en el rango de $\mu\text{g/L}$, o ng/L en algunos casos (Özcan, 2011), no es posible analizar las muestras directamente con un equipo analítico. A pesar de que estos equipos presentan alta resolución, las muestras deben de ser sometidas a un proceso de extracción para poder concentrar los analitos y facilitar su lectura.

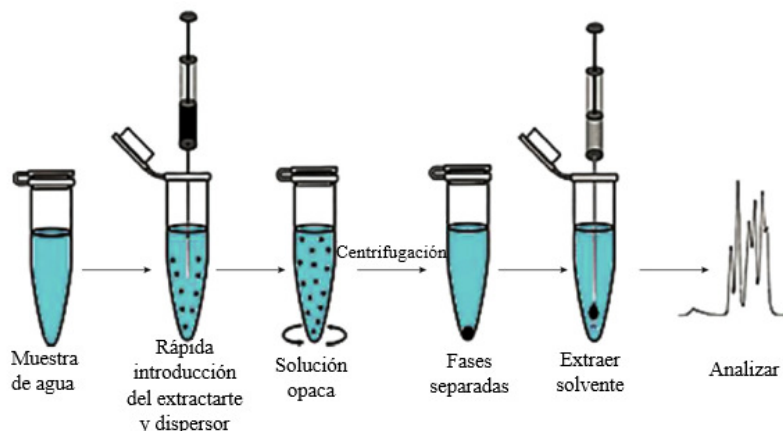
Micro extracción líquido-líquido dispersiva

Una técnica de extracción para muestras líquidas que ha ganado popularidad en los últimos años es la Micro Extracción Líquido-Líquido Dispersiva (DLLME por sus siglas en inglés). Esta extracción fue descrita por primera vez en 2006 por Rezaee et al.; la técnica se basa en una extracción líquido-líquido, en donde un soluto es extraído de un solvente a otro debido a que es más soluble en el segundo solvente que en el primero (Pavia et al., 2016). La DLLME utiliza unos cuantos microlitros de un solvente orgánico extractor de alta densidad y un solvente dispersivo como metanol o acetonitrilo miscible en el solvente extractor y en la fase acuosa. Esta mezcla de solventes se inyecta rápidamente en la muestra y se forma una solución turbia. La turbidez se debe a la formación de pequeñas gotas que se dispersan por toda la muestra acuosa. El área superficial entre el disolvente de extracción y la muestra acuosa se vuelve muy grande, por lo que el estado de equilibrio se alcanza rápidamente, esto hace que el tiempo de extracción sea muy corto (Rezaee, Yamini, y Faraji, 2010).

La solución opaca se debe centrifugar para que se deposite una fase sedimentada al fondo del recipiente. Esta fase se puede extraer con una jeringa y analizar con la técnica analítica seleccionada. Dentro de las ventajas de la DLLME se puede mencionar la simplicidad, rapidez, bajo costo, alto factor de enriquecimiento y bajo impacto ambiental debido al poco volumen de solvente orgánico utilizado (Rezaee et al., 2010). En la Figura 4 se presentan los pasos para la extracción DLLME.

Figura 4

Diagrama con los pasos de la micro extracción líquido-líquido dispersiva



Nota. Obtenido de Dmitrienko et al.(2020)

Cromatografía de gases

La cromatografía es una técnica de separación en donde una fase móvil transporta una mezcla a través de una fase estacionaria. La separación se basa en las diferencias de las velocidades de migración entre los componentes de la fase móvil (Skoog, West, Holler, y Crouch, 2015). Existen diferentes tipos de cromatografía, como la cromatografía de capa fina, la cromatografía líquida y la cromatografía gaseosa. Se debe escoger la técnica cromatográfica adecuada para una separación dependiendo del tipo de muestra y analito que se desee analizar.

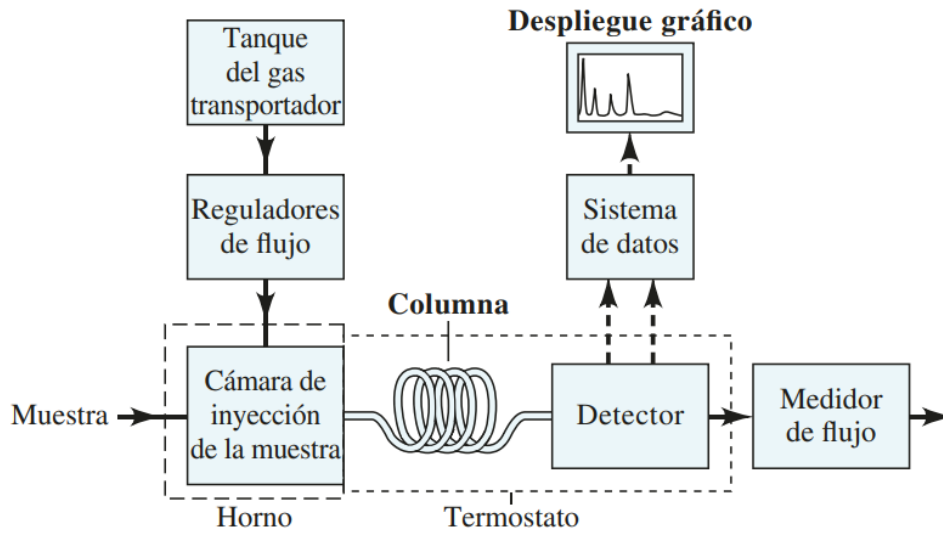
En la cromatografía de gases (CG), los componentes de una muestra vaporizada se separan al ser distribuidos entre una fase móvil gaseosa y una fase estacionaria retenida en una columna. La CG es aplicable a especies que tienen una volatilidad considerable y que son térmicamente estables a una temperatura de unos pocos cientos de grados Celsius (Skoog et al., 2015). La técnica permite realizar análisis cualitativos ya que cada compuesto en una mezcla es representado por un diferente pico en

el cromatograma (diagrama en donde se representan los resultados del análisis). También permite realizar análisis cuantitativos al comparar la altura del pico de un analito con su concentración en la mezcla (Skoog et al., 2015).

A continuación se presenta el diagrama de bloques para un equipo de cromatografía de gases (fig. 5), seguido de un ejemplo de un cromatograma obtenido en el análisis de una muestra de agua con varios contaminantes (fig. 6). Cada uno de los picos representa un diferente compuesto.

Figura 5

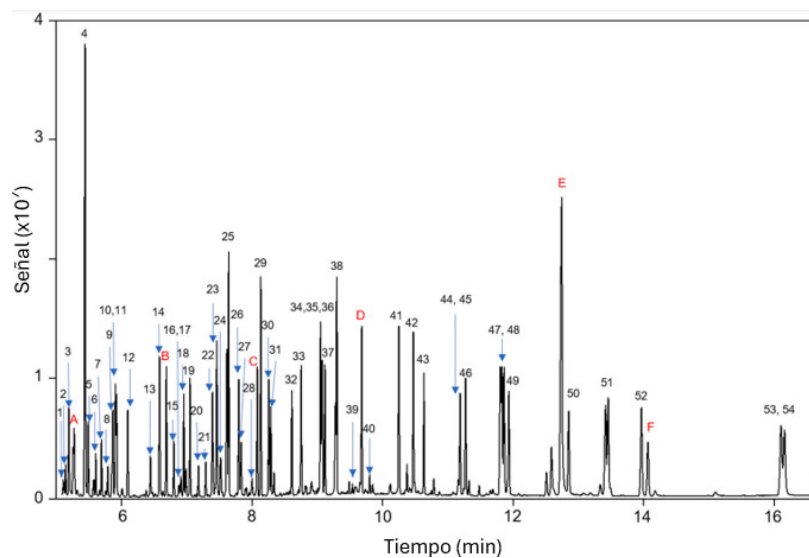
Diagrama de bloques para un cromatógrafo de gases



Nota. obtenido de Skoog y cols.(2015)

Figura 6

Cromatograma para una muestra de agua contaminada



Nota. Obtenido de Peñalver y cols.(2021)

Cromatografía de gases con detector de masas

En la espectrometría de masas, las moléculas de un compuesto se convierten a iones al aplicarles energía. Estos iones se separan de acuerdo con su relación masa-carga (m/z) y son dirigidos a un dispositivo que convierte la abundancia de cada ion a una señal eléctrica. Luego la abundancia de los iones se grafica contra la relación m/z en un espectro de masas. El espectro obtenido permite obtener información acerca la masa y estructura molecular del compuesto analizado (Skoog et al., 2015).

La técnica de espectrometría de masas permite obtener información estructural detallada de los compuestos que puede identificar, pero no permite separarlos. Los detectores analizan un compuesto a la vez para poder fragmentarlo en sus iones moleculares, pero esto no es posible cuando se trabaja con mezclas que contienen varias moléculas orgánicas. Sin embargo, la cromatografía de gases si es capaz de separar una mezcla de varios componentes, por lo que resulta útil acoplar estos métodos (Settle y Hites, 1997).

Al colocar un detector de masas al final de una columna de cromatografía de gases (GC-MS, por sus siglas en inglés), es posible analizar individualmente cada uno de los componentes de la mezcla a medida que van eluyendo de la columna. Los analitos son fragmentados en sus respectivos iones moleculares y se obtiene la información acerca de su masa molecular y estructura. La técnica permite analizar cualitativamente una mezcla para determinar de qué está compuesta, pero también tiene aplicaciones cuantitativas que permiten relacionar la señal de un analito con su concentración en la muestra (Skoog et al., 2015).

El Lago de Atitlán ha sido monitoreado extensamente durante los últimos años para medir distintos factores indicativos de la calidad del agua. El interés científico por conocer el estado del lago aumentó significativamente por florecimientos de cianobacterias que ocurrieron en 2008 y 2009; año en que las cianobacterias llegaron a cubrir hasta el 40 % de la superficie del lago (Rejmánková et al., 2011). Desde entonces se han realizado diversas investigaciones enfocándose en la cuenca del lago, lo cual ha permitido documentar información de varios parámetros a lo largo de los años.

Las cianobacterias del lago se continuaron estudiando a profundidad luego de lo sucedido en 2009. A pesar de que estos organismos contribuyen a producción primaria acuática, por medio de la generación de oxígeno utilizando clorofila α (CEA-AMSCLAE, 2022), también se ha podido determinar que generan algunas cianotoxinas peligrosas al ecosistema. Dentro de estas se puede mencionar las microcistinas, metabolitos con efectos carcinogénicos y hepatotóxicos (Anival, 2017)

Otro parámetro que ha sido de consideración son las aguas residuales que desembocan en la cuenca del lago. Se conoce que las plantas de tratamiento de aguas que se encuentran en los alrededores del lago no siempre cumplen con las normativas para la remoción de nutrientes que ingresan al lago (Barreno et al., 2019). En 2013 se determinó que en la cuenca del lago se producen 7.75 millones de m^3 al año de aguas residuales, de las cuales se vierten directamente al lago 1.37 millones de m^3 /año de aguas residuales domésticas y 18,562.50 m^3 /año de aguas residuales de agroindustria (Romero, 2013). También se ha determinado la presencia de algunos fármacos (desketoprofeno, ibuprofeno y diclofenaco) en agua de la salida de la Planta de Tratamiento “Los Cebollales”, ubicada en Panajachel (Pérez et al., 2014).

Debido a la gran población que habita en los alrededores del lago, este recibe una gran cantidad de desechos sólidos. Recientemente se comenzó a estudiar los microplásticos en el lago, se determinó que el agua presenta alta abundancia de microplásticos (128, 763 partículas/ km^2), lo cual evidencia el alto nivel de contaminación por desechos de plástico (Analí, 2018). Las plantaciones alrededor de la cuenca también contribuyen a su contaminación por medio de plaguicidas y pesticidas que llegan al lago por la erosión y los aerosoles aplicados (Noriega et al., 2020).

A pesar de que se realizan monitoreos frecuentes del lago para evaluar algunos parámetros tales como pH, oxígeno disuelto, temperatura, concentración de clorofilas α , abundancia de fitoplancton, florecimientos de cianobacterias, niveles de fósforo y nitrógeno, coliformes totales, *E. coli*, etc (Reyes et al., 2019). Existen otros parámetros de importancia de los cuales se tiene poca información y que es importante incluirlos en monitoreos futuros. Dentro de estos se puede mencionar los niveles pesticidas, detergentes, fármacos, compuestos plastificantes y otros; se conoce que algunos de estos pueden actuar como disruptores endocrinos (Khalid y Abdollahi, 2021), además de tener otros posibles efectos en la salud.

Para determinar la concentración de contaminantes orgánicos en el lago es necesario determinar primero cuáles son las moléculas que se desea estudiar. Para esto se puede hacer referencia a estudios realizados en otros países donde se lleva a cabo un monitoreo cualitativo de contaminantes en cuerpos de agua para luego evaluar su concentración en un estudio posterior. Ejemplo de este tipo de muestreos son el estudio realizado por (Houtman et al., 2019) para evaluar y priorizar contaminantes orgánicos en aguas superficiales y potables de los Países Bajos; el estudio realizado por (Yao et al., 2013) para investigar de la contaminación de los ríos que desembocan en el lago Dianchi, China; el estudio de (Peñalver et al., 2022) donde se realizó un análisis no específico para el seguimiento de contaminantes en la laguna del Mar Menor, España, etc. En estos estudios se realiza un muestreo utilizando la técnica de cromatografía de gases-masas para determinar las moléculas orgánicas presentes en las muestras de agua.

Sitio de estudio

El estudio se realizó utilizando muestras de agua recolectadas ríos de la cuenca del Lago de Atitlán. Las muestras fueron analizadas en la Universidad del Valle de Guatemala, campus central.

Diseño, enfoque y tipo de investigación

La investigación se realizó con un enfoque mixto, del tipo exploratorio y descriptivo. El diseño fue experimental.

Tipo y tamaño de muestra

Se llevó a cabo un muestreo no probabilístico, por conveniencia. Esto se debe a que se consideró los puntos de muestreo incluidos en el monitoreo mensual realizado por el Centro de Estudios Atitlán para evaluar distintos parámetros del agua de los ríos de la cuenca. A partir de este monitoreo se agregaron algunos puntos al trayecto y se tomó muestras adicionales, únicamente para este estudio. Los puntos de muestreo se presentan en la figura 7. Las muestras analizadas consistieron en muestras de agua de ríos de la cuenca y algunos puntos en el Lago de Atitlán, se recolectaron a profundidades cercanas a 0.5 m en donde el agua se encontraba fluyendo, se mantuvieron a 4 °C antes de su análisis.

Hipótesis

- **Hipótesis nula:** El Lago de Atitlán y los ríos de su cuenca contienen contaminantes orgánicos tales como pesticidas, fármacos, compuestos plastificantes, productos de cuidado personal y otros compuestos que actúan como disruptores endocrinos o que pueden afectar negativamente el ecosistema.
- **Hipótesis alternativa:** El Lago de Atitlán y los ríos de su cuenca no contienen contaminantes orgánicos tales como pesticidas, fármacos, compuestos plastificantes, productos de cuidado

personal y otros compuestos que actúan como disruptores endocrinos o que pueden afectar negativamente el ecosistema.

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión:

- Muestras de agua recolectadas en la Cuenca del Lago de Atitlán, incluyendo ríos y el Lago.
- Muestras almacenadas a 4 °C previo a su análisis en el laboratorio.

Criterios de exclusión:

- Muestras de agua recolectadas en sitios ajenos a la Cuenca del Lago de Atitlán.
- Muestras almacenadas a una temperatura mayor a 4 °C previo a su análisis en el laboratorio.

Variables (conceptualización y operacionalización)

A continuación, se presentan las variables utilizadas en el estudio:

Cuadro 3

Variables estudiadas

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Naturaleza	Nivel de medición
Contaminantes en una muestra de agua	Compuestos orgánicos detectados en una muestra de agua	Compuestos orgánicos detectados en equipo GC-MS con coincidencia mayor a 900	Cualitativa	Nominal
Sitio de muestreo	Lugar de recolección de muestras	Lugar de recolección de muestras	Cualitativa	Nominal
Fecha de muestreo	Fecha de recolección de muestras	Fecha de recolección de muestras	Cualitativa	Ordinal

Instrumentos de medición

A partir de los cromatogramas obtenidos con el equipo GC-MS, se llevó un control de los resultados obtenidos tabulándolos como se presenta en el cuadro 4. Además, luego de analizar los datos, los resultados fueron tabulados en el cuadro 5, donde se presenta el ejemplo de un resultado.

Cuadro 4

Instrumento de medición

Compuesto	Tiempo de retención (min)	Masa molar (g/mol)	Nombre IUPAC	Número CAS
1				
2				
3				

Nota. Se muestra el cuadro que se utilizó para tabular los datos obtenidos del equipo GC-MS

Cuadro 5

Cuadro para tabular resultados

Compuesto (IUPAC)	Número CAS	Fórmula	Masa molar (g/mol)	Frecuencia de detección	Uso

Nota. Se muestra el cuadro en donde se presentaron los resultados luego del análisis de contaminantes

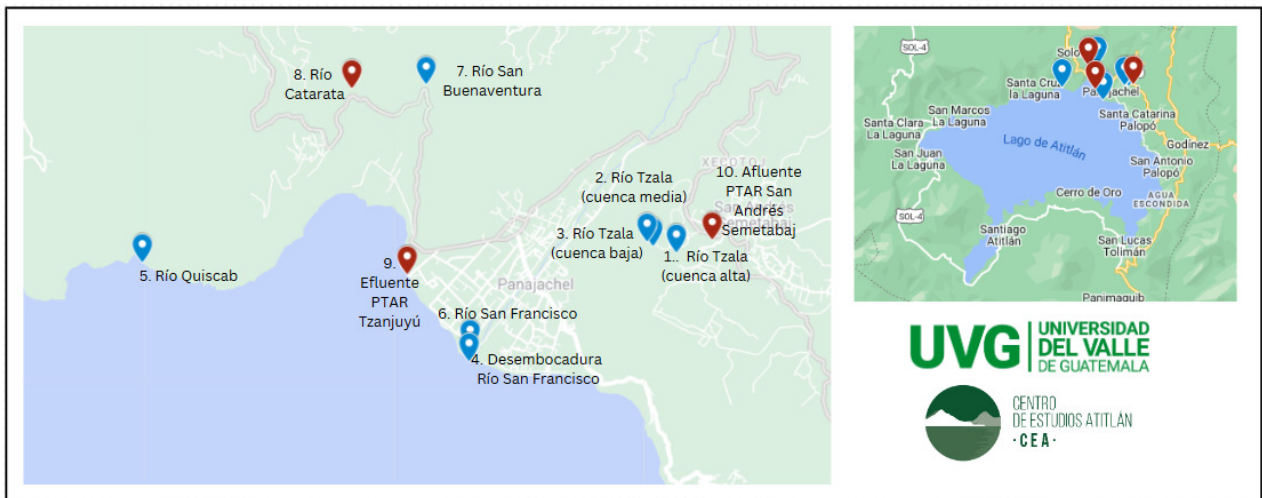
Metodología

Recolección de muestras

Las muestras de agua fueron recolectadas el día 7 de agosto de 2024 en los puntos presentados en la figura 7 (puntos azules). Se presentan en rojo los puntos que fueron agregados en el muestreo realizado el 28 de octubre. Las coordenadas de dichos puntos se presentan en la tabla 6.

Figura 7

Sitios de toma de muestra para el análisis



Nota. Elaboración propia.

Cuadro 6*Puntos de muestreo con coordenadas*

Punto	Ubicación	Abreviatura	Coordenadas (Norte, Oeste)
1	Río Tzala' parte alta	RTA	14.74340, 91.13831
2	Río Tzala' parte media	RTM	14.74350, 91.14182
3	Río Tzala' parte baja	RTB	14.74334, 91.14268
4	Río San Francisco (desembocadura)	RSFD	14.73421, 91.15798
5	Río Quiscab (desembocadura)	RQD	14.74190, 91.18688
6	Río San Francisco	RSF	14.73451, 91.15772
7	Río San Buenaventura	RSB	14.75761, 91.16187
8	Río Catarata	RC	14.75682, 91.16890
9	Efluente PTAR* Tzanjuyú	PTAR1	14.741240, 91.163485
10	Afluente PTAR San Andrés Semetabaj	PTAR2	14.744108, 91.136563

Nota. PTAR* = Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

En el cuadro anterior se presentan los puntos de muestreo junto con sus coordenadas. Adicionalmente, se presentan fotografías de cada punto de muestreo en el cuadro 11 en la página 58. Los sitios de muestreo se seleccionaron en base a algunos puntos incluidos en muestreos realizados anteriormente por el CEA, debido a que se tiene datos históricos acerca de otros parámetros en estos. Los demás puntos se seleccionaron por el interés que existe en estudiar el impacto del turismo en Panajachel y sus alrededores. El muestreo se limitó a la parte norte de la cuenca debido a su cercanía al campus UVG Altiplano, ya que se contaba con tiempo y recursos limitados para recolectar las muestras.

Para recolectar las muestras se utilizó frascos de vidrio de 250 mL, previamente lavados con etanol y esterilizados en un autoclave. Para recolectar las muestras se realizó tres lavados previos a los frascos con el agua del río (o del lago, según el punto de recolección), luego se llenó los frascos y se almacenaron en frío a 4 °C hasta ser analizados. Se utilizó únicamente recipientes de vidrio para evitar la contaminación por ftalatos.

Aparatos y software

Se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent modelo 6850 con una columna Agilent HP-5MS y un automuestreador. El cromatógrafo estaba conectado a un detector de masas Agilent modelo 5975. La identificación de los compuestos orgánicos se llevó a cabo utilizando la biblioteca de espectros NIST 2.0 y comparando el porcentaje de coincidencia obtenido mediante la comparación de los espectros experimentales con los de la base de datos. Para resolver los picos con baja resolución se utilizó el programa AMDIS, disponible gratuitamente en la página del NIST. Para el tratamiento de las muestras se utilizó una centrifugadora Hattich EBA 21 y un agitador vortex.

Procesamiento de la muestra

El procedimiento de extracción de muestras se tomó de Ozcán (2011). Para realizar la Micro Extracción Líquido-Líquido Dispersiva (DLLME, por sus siglas en inglés), se comenzó por colocar 5 mL de agua previamente filtrada (usando filtros cuantitativos, libres de ceniza) en un tubo de centrifuga de 15 mL. A continuación se inyectó al tubo 125 μ L de cloroformo (solvente extractor) utilizando una micro jeringa de 250 μ L y se mezcló utilizando un agitador vortex por 2 min. La solución resultante se centrifugó a 4000 rpm por 4 minutos para depositar las gotas de cloroformo al fondo del recipiente. Se recolectó aproximadamente 50 μ L de este solvente utilizando la micro

jeringa y se colocó en un microvial de 250 μL . Debido a que en esta extracción no se utilizó solvente extractor, sino que se agitó la solución con un vortex, el procedimiento es considerado una variación de la extracción DLLME; conocido como VA-DLLME (*Vortex Assisted-DLLME*) (Dmitrienko et al., 2020). La extracción fue realizada en triplicado para cada una de las muestras. Los viales fueron analizados por medio de cromatografía de gases-masas.

Análisis de muestras

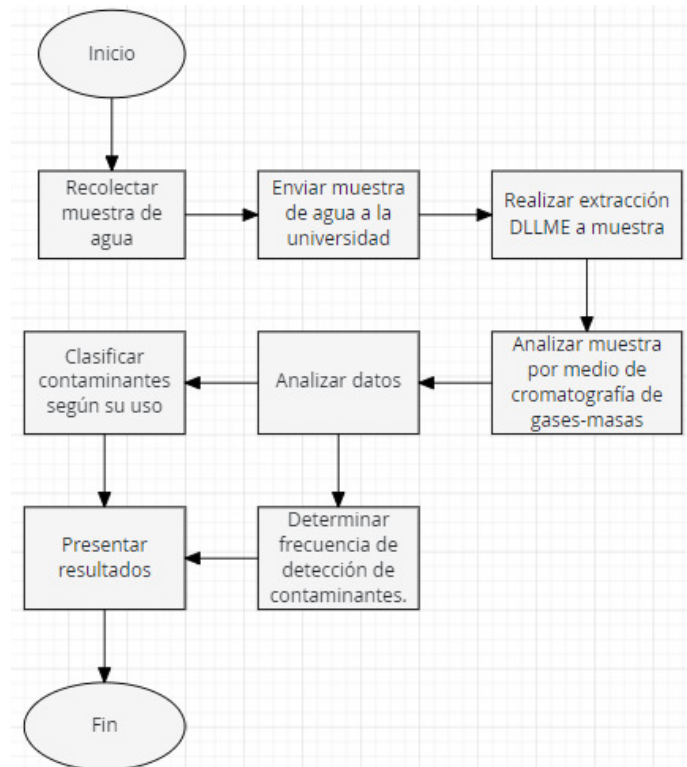
La metodología de análisis se tomó de Peñalver et al. (2022). Se utilizó la columna Agilent HP-5MS y helio como gas acarreador, con un flujo de 1 mL/min. La temperatura inicial para el cromatógrafo fue de 50 °C, se incrementó a 15 °C por minuto hasta llegar a 175 °C, donde se mantuvo por 3 minutos. Luego se elevó la temperatura a 250 °C con una velocidad de 10 °C/min. Por último, la temperatura aumentó 20 °C/min hasta llegar a 270 °C. El cuadrupolo, la fuente de iones y la línea de transferencia se fijaron a temperaturas de 150, 230 y 300 °C, respectivamente. Para el espectrómetro de masas se utilizó el modo de impacto electrónico (IE) a 70 eV. Los cromatogramas se obtuvieron en modo de exploración completa a m/z 35–500. Los compuestos se identificaron utilizando una base de datos NIST 2.0.

Diagrama de flujo

En la figura 8 se presenta un diagrama de flujo con la metodología del proyecto.

Figura 8

Diagrama de flujo de la metodología



En el siguiente cuadro se presenta el nombre de cada compuesto acompañado de su tiempo de retención en minutos. Los cheques representan las muestras en las que se identificó cada compuesto. Se consideró afirmativa la presencia de un compuesto cuando se obtuvo una coincidencia (Match) mayor a 900 en el programa NIST MS Search 2.0. Se presentan también los cromatogramas de cada muestra en la sección de Anexos (pag 37). En el cuadro, las abreviaturas representan el sitio de toma de muestra: RTA (Río Tzalá' parte alta), RTM (Río Tzalá' parte baja), RTB (Río Tzalá' parte baja), RSFD (Río San Francisco - desembocadura), RQD (Río Quiscab - desembocadura), RSF (Río San Francisco), RSB (Río San Buenaventura). Se presentan fotografías de cada sitio de muestreo en el cuadro 11 en la página 58.

Cuadro 7

Compuestos orgánicos identificados en muestreo del 7 de agosto

T.R. (min)	Nombre	1 RTA	2 RTM	3 RTB	4 RSFD	5 RQD	6 RSF	7 RSB
9.792	Diheptanoato de neopentil glicol	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9.89	Ftalato de dietilo	✓			✓	✓	✓	✓
13.824	Ftalato de diisobutilo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15.039	Ftalato de dibutilo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

En el siguiente cuadro se presentan los compuestos encontrados junto con su número de identificación CAS, masa molar, uso principal y la frecuencia de detección en las muestras (n = 10). Para identificar los compuestos se utilizó un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Cuadro 10

Descripción de los compuestos identificados en muestreo 28 de octubre

T.R. (min)	Nombre	CAS	Fórmula	Uso	Incidencia (n = 10)
6.111	Canfeno	79-92-5	C10H16	FA, A, LD	20 %
7.831	Diheptanoato de neopentil glicol	74381-40-1	C15H28O4	P	100 %
8.397	Cis-Geranylacetona	68228-05-7	C13H22O	A, FA	30 %
8.686	Imipramina	50-49-7	C19H24N2	F	10 %
8.996	2,4-di-terc-butilfenol	96-76-4	C14H22O	I	10 %
9.853	Ácido dodecanoico	143-07-7	C12H24O2	LD, PCP	10 %
9.958	Ftalato de dietilo	84-66-2	C12H14O4	P, PCP	70 %
10.694	Benzofenona	119-61-9	C13H10O	PCP, I	20 %
12.436	Ácido tetradecanoico	544-63-8	C14H28O2	PCP, LD, A	10 %
13.715	Galaxolide	1222-05-5	C18H26O	FA, LD	10 %
13.878	Ftalato de dibutilo	84-74-2	C16H22O4	P, PCP	100 %
14.201	Cafeína	58-08-2	C8H10N4O2	F	10 %
14.926	Tridecanal	10486-19-8	C13H26O	FA, LD	10 %
16.578	Metil Palmitoleato	1120-25-8	C17H32O2	PCP, BC	10 %
17.406	Ácido oleico	112-80-1	C18H34O2	A, PCP, LD	10 %

Uso*: P = Plastificante, PCP = Producto de Cuidado Personal, A = Alimentario, F = Farmacéutico, FA = Fragancia o Aroma, LD = Limpieza y Detergentes, I = Industrial, BC = Biocombustibles.

Discusión de resultados

El objetivo de este trabajo fue determinar la presencia de contaminantes orgánicos de la Cuenca del Lago de Atitlán que presentan un problema potencial de contaminación al agua. Se muestrearon diez puntos en la cuenca, consistiendo cinco de ellos en agua de río, tres tomadas directamente en el lago y una en el afluente de una planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en San Andrés Semetabaj (Figura 6, 22). Para someter las muestras al análisis con cromatografía de gases-masas se les realizó una extracción DLLME (micro extracción líquido-líquido dispersiva, por sus siglas en inglés) utilizando cloroformo como solvente de extracción.

Durante la experimentación fue necesario realizar un blanco para asegurar que los contaminantes encontrados no estuvieran ingresando a las muestras en el proceso de extracción. Los blancos se presentan en las Figuras 9 y 17, en la sección de anexos (pág. 37). También se realizó un control para verificar el funcionamiento de la extracción, este consistió en una muestra de agua enriquecida con dos pesticidas a concentraciones de aproximadamente 0.1 ppm. Los pesticidas utilizados fueron clorpirifós (0.099 ppm) y metil paratión (0.093 ppm). Se puede observar en la figura 10 que ambos pesticidas se lograron detectar en las dos extracciones enriquecidas, con el metil paratión detectado en 14.506 min y el clorpirifós a 15.474 min. El clorpirifós se logró detectar incluso a concentraciones de 0.0066 ppm.

Se puede observar en el cuadro 7 que 7 de las 7 muestras presentaron ftalato de dibutilo, ftalato de diisobutilo y diheptanoato de neopentil glicol, mientras que 5 muestras presentaron también ftalato de dietilo. Estos cuatro compuestos se clasifican como agentes plastificantes, además de que los ftalatos de dietilo y diisobutilo también se utilizan dentro de productos de cuidado personal (FDA, 2022). La detección de estos compuestos no es de extrañar, pues las principales fuentes de ftalatos y BPA en aguas superficiales y sedimentos son las descargas de aguas residuales, industriales, municipales y agrícolas, además del lixiviado infiltrado de vertederos (Dueñas-Moreno et al., 2022). Está bien reportado que todos estos problemas afectan el agua de la Cuenca del Lago de Atitlán (Romero, 2013; Aquino, 2021; Fieser, 2009).

La identificación de ftalatos concuerda con lo reportado en otros estudios similares a este; en Peñalver et al. (2021) se estudió la presencia de contaminantes la laguna del Mar Menor, en España, donde 6 de los 18 compuestos identificados fueron ftalatos. Estos ftalatos incluyeron el de dibutilo, diisobutilo y de dietilo. En Liang et al. (2008) también se demuestra la presencia de algunos ftalatos en muestras de agua recolectadas en un lago en China. Esto muestra el grado en que los ftalatos y plastificantes pueden llegar a contaminar muestras de agua ambiental.

La presencia de ftalatos en el agua puede tener varios efectos negativos en el ecosistema; se ha demostrado que estos actúan como disruptores endocrinos, además de presentar riesgos al sistema respiratorio y nervioso (Wang y Qian, 2021). Además, se ha estudiado el efecto de algunos ftalatos en

animales y se ha determinado que estos reducen la tasa de reproducción de algunas especies ya que impide el desarrollo de órganos reproductivos y la producción de hormonas sexuales (Przybylińska y Wyszowski, 2016).

En el segundo muestreo, realizado el 28 de octubre, se incluyó también dos plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ubicadas en la cuenca. La primera consistió en el efluente de la planta Tzanjuyú, que da directamente al lago (punto 9 en cuadro 6), la segunda consistió en el afluente de la planta San Andrés Semetabaj, ubicada en San Andrés Semetabaj (punto 10 en cuadro 6). El propósito de incluir estas plantas fue observar de manera directa los contaminantes producidos en la cuenca que pueden llegar a las PTAR y los que pueden estar llegando al lago a partir de estas.

En el cuadro 9 se presentan los contaminantes encontrados en esta fecha, se volvieron a encontrar ftalatos en la mayoría de las muestras. También se detectaron varios compuestos utilizados en productos de limpieza y otros usados en fragancias o aromas; la presencia de estos puede estar dada tanto por el ingreso de aguas residuales que contienen detergentes o por el hecho de que algunas personas lavan ropa en las orillas del lago o en los ríos (Romero, 2013). Otro grupo de contaminantes con incidencia fueron los productos de cuidado personal (PCP), se encontraron siete compuestos que pueden estar ligados a este grupo.

Uno de los sitios de muestreo con mayor variedad de contaminantes fue el afluente de la PTAR de San Andrés Semetabaj. Se desconoce de la eficiencia del funcionamiento de esta planta para tratar el agua, por lo que se recomienda cuantificar la concentración de contaminantes en el agua antes y después de pasar por la planta. En el efluente de la PTAR de Tzanjuyú, que da directamente al lago, no se encontró tanta variedad. Aunque sí se detectó el compuesto imipramina, catalogado como fármaco antidepresivo.

Otro resultado que llamó la atención fue la variación entre los compuestos detectados en las partes alta, baja y media del Río Tzalá el 28 de octubre. Se esperaba encontrar los mismos compuestos a lo largo del río; sin embargo, en la parte baja se encontraron dos compuestos que no se detectaron en los puntos anteriores (2,4-di-terc-butilfenol y galaxolide). Se desconoce el motivo de esto, sin embargo, es posible que por diferencia en caudales y la composición del sedimento, se liberen contaminantes acumulados que no están en la parte alta. De igual manera, es importante estudiar este punto a más detalle.

Se pudo notar una diferencia significativa entre los compuestos detectados según la fecha de muestreo. Es de esperar que el contenido del agua varíe dependiendo de la frecuencia de las lluvias, los desechos vertidos por la población de la cuenca y el volumen de aguas residuales que ingresa a ríos y al lago. Asimismo, se considera de importancia realizar futuros muestreos con mayor frecuencia y por más tiempo para tener datos que reflejen mejor la variedad de compuestos que se pueden encontrar.

También se notó que las muestras tomadas en ríos con mayor caudal llevaron a la detección de menos compuestos. Lo mismo con las muestras tomadas en el lago, en la desembocadura de ríos. Debido a que el tipo de extracción utilizada en este estudio utiliza poco volumen de agua, los factores de enriquecimiento no suelen ser tan elevados como otros métodos que emplean mayor volumen. En sitios donde el flujo de agua es elevado, los compuestos orgánicos se diluyen y se dificulta su detección. Por esta razón se debe considerar puntos de muestreo con menor flujo, o puntos donde se concentre la contaminación, como lo son las PTAR.

Aunque en Guatemala no existen suficientes indicaciones respecto a las concentraciones máximas permisibles de ciertos contaminantes en fuentes de agua, es posible utilizar como referencia los lineamientos de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU (EPA por sus siglas en inglés). Según la EPA, algunos contaminantes orgánicos comienzan a ser de preocupación en concentraciones muy bajas. Ejemplos de estos son alaclor (pesticida) con concentración máxima permisible de 0.002 ppm; benceno (lixiviado) en 0.005 ppm; carbofurano (fumigante) en 0.04 ppm; diquat (pesticida) en 0.02 ppm; lindano (insecticida) en 0.0002 ppm, etc (EPA, 2024b). Esto significa que es necesario

concentrar significativamente las muestras para detectar estos compuestos, incluso cuando sus concentraciones superan los límites permisibles.

A pesar de que sí se logró determinar la presencia de algunos compuestos tales como PCP, detergentes y fármacos, también es importante considerar las limitaciones del procedimiento. Comenzando con el solvente utilizado; el cloroformo es uno de los solventes más apropiados para la extracción DLLME debido a que cumple con las características de ser más denso que el agua, alta volatilidad (buen comportamiento cromatográfico) y baja polaridad (Ma, Lu, y Chen, 2011). Sin embargo, se debe tener en cuenta que la extracción solamente será efectiva con compuestos con baja o moderada polaridad. Por lo que no se podrán extraer compuestos polares, esto significa que no se puede afirmar que este tipo de compuestos no se encuentren en las muestras estudiadas. Además, al utilizar la cromatografía de gases como técnica de análisis, el estudio debe ser limitado a compuestos no termolábiles que no se descomponen al calentarse. Una alternativa para solucionar este problema sería utilizar la técnica HPLC-MS.

Es importante considerar también la base de datos utilizada. Para analizar las muestras se utilizó el programa Enhanced Data Analysis, de Agilent, con la base de datos NIST 2.0. A pesar de ser un programa confiable y robusto, el tipo de análisis involucró analizar compuestos con baja resolución y/o baja señal. Varios de los picos que no pudieron ser resueltos con el programa mencionado, se pudieron analizar de mejor manera con el programa AMDIS (Sistema Automatizado de Identificación y Deconvolución de Espectros de Masas, por sus siglas en inglés). Este programa permite deconvolucionar espectros de masas para facilitar la identificación de los picos complicados. Los compuestos que no pudieron ser identificados de manera precisa (match mayor a 900) con ninguno de los dos programas, fueron descartados del análisis.

En términos generales, la variedad de compuestos orgánicos detectados mostró que la Cuenca del Lago de Atitlán es amenazada por contaminación proveniente de diferentes fuentes. Los principales grupos de preocupación son plastificantes, productos de cuidado personal, productos de limpieza y fragancias o aromas. Estos ingresan mayoritariamente por aguas residuales sin tratamiento, además de desechos sólidos que no se manejan adecuadamente. Todos los compuestos detectados están relacionados con actividades humanas, lo que resalta la importancia de promover prácticas más sostenibles en la región. Es necesario mejorar la gestión de desechos en la cuenca para frenar el deterioro del ecosistema. También es importante garantizar la protección del lago, no solo como un recurso ambiental, sino también como un sustento económico y cultural para las comunidades que dependen de él.

Conclusiones

- Se logró cumplir el objetivo de la investigación de determinar los compuestos orgánicos que representan un problema potencial de contaminación en el agua y así evaluar las posibles causas de su presencia. Se determinó que los mayores grupos de riesgo son productos plastificantes, PCP, detergentes y fragancias/aromas. Se determinó que dentro de las principales causas de su presencia está el ingreso de aguas residuales a cuerpos de agua y el lavado de ropa en ríos y el lago, en el caso de detergentes.
- Se logró detectar la presencia de cuatro plastificantes en la mayoría de las muestras (diheptanoato de neopentil glicol y ftalatos de dietilo, dibutilo y diisobutilo), sin importar su lugar de recolección. Esto refleja la alta incidencia de contaminantes plásticos en el agua de la Cuenca del Lago de Atitlán.
- Además de plastificantes, se detectaron varios productos de cuidado personal, productos de limpieza y fragancias; esto demuestra el impacto de la población humana en el agua de la cuenca y la aplicabilidad de la técnica DLLME para estudiar este tipo de compuestos.
- Debido a que existe evidencia de disrupción endocrina por parte de ftalatos y PCP, es posible inferir que los contaminantes detectados en las muestras presentan efectos negativos al ecosistema estudiado.
- La amplia detección de compuestos relacionados con actividades humanas resalta la necesidad de promover prácticas más sostenibles en la región. Es importante garantizar la protección del lago, no solo como un recurso ambiental, sino también como un sustento económico y cultural para las comunidades que dependen de él.
- Se presentaron limitaciones importantes al proceso de extracción, dentro de las cuales se puede mencionar que el solvente seleccionado (cloroformo) funcionará mejor para compuestos de baja o moderada polaridad y que la técnica de GC-MS es aplicable únicamente a compuestos no termolábiles. Además, los contaminantes con una concentración demasiado baja no serán detectados por el equipo.
- La diferencia en compuestos detectados según la fecha de muestreo evidencia la variación que puede haber en la presencia o concentración de los contaminantes en la cuenca según la frecuencia de lluvia, los desechos vertidos por la población de la cuenca y el volumen de aguas residuales que ingresa a ríos y al lago.

Recomendaciones

- La alta incidencia de ftalatos mostró el impacto de los humanos en el ambiente. Por esta razón es importante mejorar el manejo de desechos de la cuenca. Para reducir la introducción de desechos sólidos a los cuerpos de agua, se recomienda hablar con las autoridades de cada municipio para establecer un vertedero en donde se puedan retener y tratar adecuadamente los desechos.
- Para futuros análisis del agua de la cuenca, se recomienda cuantificar los compuestos plastificantes detectados y comparar su concentración según el sitio de toma de muestra.
- Se recomienda incluir en el muestreo sitios en donde el agua no presenta un flujo tan elevado, o puntos en donde se concentren los contaminantes de la cuenca, como son las PTAR. Esto con el objetivo de tomar muestras en sitios donde los contaminantes no se encuentren tan diluidos, ya que esto dificulta su detección.
- Se propone realizar futuros estudios en donde los muestreos se realicen con mayor frecuencia y por más tiempo para tener datos que reflejen mejor la diversidad de compuestos que se pueden encontrar y la variación que puede haber según la fecha de muestreo.
- Se recomienda comparar diferentes variaciones de la técnica DLLME antes de extraer las muestras; esto para poder utilizar la técnica que resulte en el menor límite de detección, pero también mayor rapidez y consistencia.
- Considerando que la técnica utilizada para el análisis de las muestras (GC-MS) es aplicable únicamente a compuestos no termolábiles, se sugiere que para futuros estudios (de ser posible) se utilice HPLC-MS. Esto permitiría comparar las técnicas y determinar si realmente hay compuestos que no se pueden detectar con alguno de los dos métodos.

Referencias

- AMSCLAE. (2015). *Memoria de Labores 2015*. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno, <https://www.amsclae.gob.gt/descargas/memoriadelabores/mem2015.pdf>.
- AMSCLAE. (2016). *Plan Operativo Anual* (Inf. Téc.).
- AMSCLAE. (2018). *Priorización de Microcuencas 2018*. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno, <https://www.amsclae.gob.gt/2018/12/18/priorizacion-de-microcuencas/>.
- Analí, L. X. N. (2018). *Contaminación por microplásticos en la superficie del Lago Atitlán, Sololá*. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3453>.
- Anival, R. C. (2017). *Metabolitos secundarios y cianotoxinas producidos por cianobacterias del lago de Atitlán*. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-882844>.
- Aquino, J. S. (2021). *Lago de Atitlán amenazado por vertedero El Picacho de Sololá*. <https://procesogt.gt/2021/02/22/borrador-automatico-solola/>.
- Barreno, F. M., Reyes, E. M., y AMSCLAE. (2019). *Informe de muestreo de las plantas de tratamiento de aguas residuales de la cuenca del Lago de Atitlán, 2019*. <https://www.amsclae.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/ptar2019.pdf>.
- Bashir, I., Lone, F. A., Bhat, R. A., Mir, S., Dar, Z. A., y Dar, S. A. (2020). *Concerns and threats of contamination on aquatic ecosystems, [Preocupaciones y amenazas de la contaminación en sistemas acuáticos]*. doi: 10.1007/978-3-030-35691-0\{_\}1
- Bocel, J. (2013). *Plan de acción para la reducción del uso de fertilizantes y detergentes fosfataos en la subcuenca del Río San Francisco, cuenca del Lago de Atitlán*. Universidad Rural de Guatemala.
- Bolaños, R. M. (2024). *Ingreso de turistas extranjeros al país en el 2023 recupera la cifra de la prepandemia*. <https://shorturl.at/e37PH>.
- Boxall, A. B. (2004). The environmental side effects of medication, [Los problemas secundarios de la medicación en el ambiente]. *EMBO Reports*, 5(12), 1110–1116. doi: 10.1038/sj.embor.7400307
- CEA-AMSCLAE. (2022). *Florecimiento de cianobacterias en el Lago Atitlán - Boletín No. 3*. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno, <https://www.amsclae.gob.gt/2022/01/26/iii-boletin-cea-amsclae/>.
- Chakraborty, P., Shappell, N. W., Mukhopadhyay, M., Onanong, S., Rex, K. R., y Snow, D. D. (2021). Surveillance of plasticizers, bisphenol A, steroids, and caffeine in surface water of river Ganga and Sundarban wetland along the bay of bengal: Occurrence, sources, estrogenicity screening, and ecotoxicological risk assessment, [vigilancia de plastificantes, bisfenol a, esteroides y cafeína en las aguas superficiales del río ganges y el humedal de sundarban a

- lo largo de la bahía de bengala: presencia, fuentes, detección de estrogenicidad y evaluación del riesgo ecotoxicológico]. *Water Research*, 190, 116668. doi: 10.1016/j.watres.2020.116668
- Cheremisinoff, N. P. (1997). *Treating contaminated groundwater and leachate, [Tratando agua subterránea y lixiviados]*. doi: 10.1016/b978-081551411-4.50009-0
- Dmitrienko, , Apyari, V. V., Tolmacheva, V. V., y Gorbunova, M. V. (2020). Dispersive Liquid–Liquid Microextraction of Organic Compounds: An Overview of reviews, [Microextracción Líquido-Líquido Dispersiva de compuestos orgánicos: una revisión de revisiones.]. *Journal of Analytical Chemistry*, 75(10), 1237–1251. doi: 10.1134/s1061934820100056
- Dueñas-Moreno, J., Mora, A., Cervantes-Avilés, P., y Mahlknecht, J. (2022). Groundwater contamination pathways of phthalates and bisphenol A: origin, characteristics, transport, and fate – A review. [Vías de contaminación de las aguas subterráneas por ftalatos y bisfenol A: origen, características, transporte y destino – Una revisión]. *Environment International*, 170, 107550. doi: 10.1016/j.envint.2022.107550
- EPA. (2024a). *Contaminants of Emerging Concern including Pharmaceuticals and Personal Care Products | US EPA, [Contaminantes de preocupación emergente incluyendo farmacéuticos y productos de cuidado personal | US EPA]*. <https://shorturl.at/9ZNWQ>.
- EPA. (2024b). *National Primary Drinking Water Regulations | US EPA, [Principales regulaciones nacionales para agua potable | US EPA.]*. <https://shorturl.at/3v2to>.
- FDA. (2022). *Phthalates in Cosmetics, [Ftalatos en cosméticos]*. <https://www.fda.gov/cosmetics/cosmetic-ingredients/phthalates-cosmeticstop>.
- Feng, W., Deng, Y., Yang, F., Miao, Q., y Ngien, S. K. (2023). Systematic Review of Contaminants of Emerging Concern (CECS): distribution, risks, and implications for water quality and health, [Revisión sistemática de contaminantes de preocupación emergente (CECS): distribución, riesgos e implicaciones para la calidad del agua y la salud]. *Water*, 15(22), 3922. doi: 10.3390/w15223922
- Ferrás, L., Caucci, S., Cifuentes, J. I., Avellán, T., Dornack, C., y Hettiarachchi, H. (2018). *Wastewater management in the Basin of Lake Atitlán: A background study, [Manejo de aguas residuales en la cuenca del Lago de Atitlán: Un estudio de antecedentes]* (Inf. Téc.). doi: 10.53325/hnhv6581
- Fieser, E. (2009). *Breaking news, analysis, politics, blogs, news photos, video, tech reviews - TIME.com, [Noticias de última hora, análisis, política, blogs, fotos de noticias, videos, reseñas de tecnología - TIME.com]*. <https://content.time.com/time/world/article/0,8599,1942501,00.html>.
- GNF. (s.f.). *Lake Atitlán (Guatemala) - Global Nature Fund, [Lago de Atitlán (Guatemala) - Fondo Mundial para la Naturaleza]*. <https://www.globalnature.org/en/atitlan>.
- Gómez, M. J., Gómez-Ramos, M., Agüera, A., Mezcúa, M., Herrera, S., y Fernández-Alba, A. R. (2009). A new gas chromatography/mass spectrometry method for the simultaneous analysis of target and non-target organic contaminants in waters, [Un nuevo método de cromatografía de gases/espectrometría de masas para el análisis simultáneo de contaminantes orgánicos objetivo y no objetivo en aguas]. *Journal of Chromatography A*, 1216(18), 4071–4082. doi: 10.1016/j.chroma.2009.02.085
- Houtman, C. J., Kroesbergen, J., Baggelaar, P. K., y Van Lieverloo, J. H. M. (2019). Statistical analysis of a large set of semi-quantitative GC–MS screening data to evaluate and prioritize organic contaminants in surface and drinking water of the Netherlands, [Análisis estadístico de un amplio conjunto de datos de detección mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC-MS) semicuantitativos para evaluar y priorizar los contaminantes orgánicos en aguas superficiales y potables de los Países Bajos]. *Science of The Total Environment*, 697, 133806. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133806
- INE. (2020). *Proyecciones municipales. Actualización 2020*. Instituto Nacional de Estadística. <https://www.ine.gob.gt/proyecciones/>.
- INGUAT. (2016). *Guía de Volcanes de Guatemala*. Instituto Guatemalteco de Turismo.
- Julajuj, (2017). *Lago de Atitlán recibe 3 mil toneladas de basura en época lluviosa*. <https://shorturl.at/h0gWQ>.

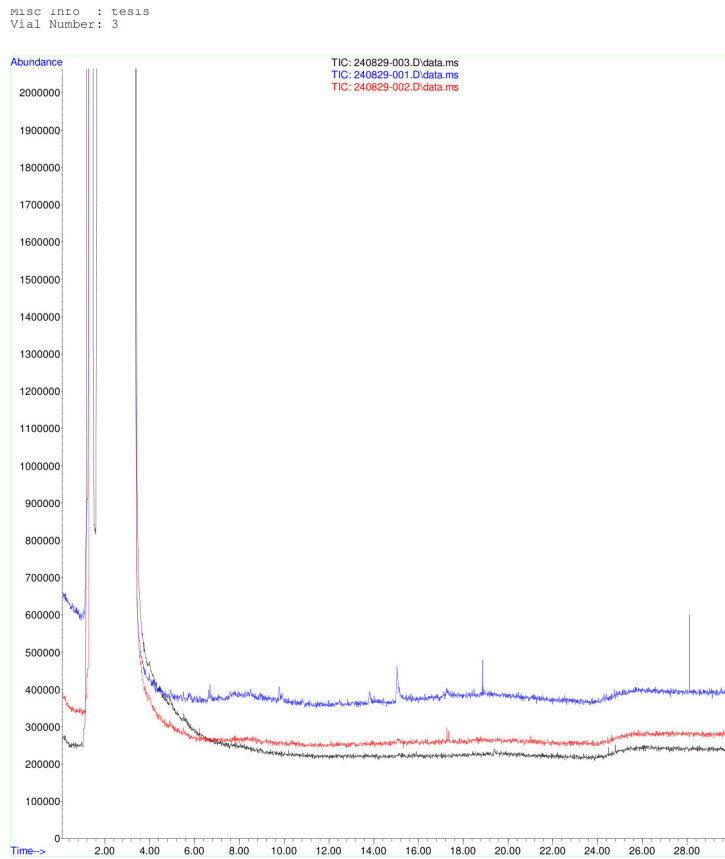
- Khalid, M., y Abdollahi, M. (2021). Environmental distribution of personal care products and their effects on human health, [Distribución ambiental de productos de cuidado personal y sus efectos sobre la salud humana]. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 20(1), 216–253. doi: 10.22037/ijpr.2021.114891.15088
- Liang, P., Xu, J., y Li, Q. (2008). Application of dispersive liquid–liquid microextraction and high-performance liquid chromatography for the determination of three phthalate esters in water samples, [Application of dispersive liquid–liquid microextraction and high-performance liquid chromatography for the determination of three phthalate esters in water samples] . *Analytica Chimica Acta*, 609(1), 53–58. doi: 10.1016/j.aca.2007.12.025
- Ma, J., Lu, W., y Chen, L. (2011). Recent Advances in Dispersive liquid - liquid microextraction for organic Compounds Analysis in Environmental Water: a review, [Avances recientes en la microextracción dispersiva líquido-líquido para el análisis de compuestos orgánicos en aguas ambientales: una revisión]. *Current Analytical Chemistry*, 8(1), 78–90. doi: 10.2174/157341112798472170
- Morales, F. R., Ujpan, D., y Valiente, S. (2018). Batimetría y análisis morfométrico del lago de Atitlán (Guatemala). *Revista científica*, 27(2), 48–58. doi: 10.54495/rev.cientifica.v27i2.70
- NASA. (2009). *Harmful Bloom in Lake Atitlán, Guatemala*, [Floración dañina en el lago de Atitlán, Guatemala]. <https://shorturl.at/7o7Ze>.
- Neher, T. P., Soupir, M. L., y Kanwar, R. S. (2021). Lake Atitlan: A review of the food, energy, and water sustainability of a mountain lake in Guatemala, [Lago de Atitlán: Una revisión de la sostenibilidad alimentaria, energética e hídrica de un lago de montaña en Guatemala]. *Sustainability*, 13(2), 515. doi: 10.3390/su13020515
- Noriega, B., Europea, U., y '70, A. (2020). *Estado del Lago de Atitlán y su cuenca 2020* (Inf. Téc.).
- Oliva, B., Pérez, J., del Cid, M., Gaitan, I., Valladares, B., Martínez, F., ... AMSCLAE (2010). *Estudio de contaminantes ecotóxicos en agua y organismos acuáticos del Lago de Atitlán*. (Inf. Téc.).
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., y Engel, R. G. (2016). *A small-scale approach to organic laboratory techniques*, [Un enfoque a pequeña escala para las técnicas orgánicas de laboratorio].
- Peñalver, R., Ortíz, A., Arroyo, N., Campillo, N., López, I., y Viñas, P. (2022). Non-targeted analysis by DLLME-GC-MS for the monitoring of pollutants in the Mar Menor lagoon, [Análisis no dirigido mediante DLLME-GC-MS para la monitorización de contaminantes en la laguna del Mar Menor]. *Chemosphere*, 286, 131588. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131588
- Przybylińska, P. A., y Wyszowski, M. (2016). Environmental contamination with phthalates and its impact on living organisms, [Contaminación ambiental con ftalatos y sus impactos en organismos vivos]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 23(2), 347–356. doi: 10.1515/eces-2016-0024
- Pérez, J., Hernández, E., Balmore, V., y AMSCLAE. (2014). *Evaluación de contaminantes emergentes y radioactivos en el Lago de Atitlán* (Inf. Téc.).
- Rani, L., Thapa, K., Kanojia, N., Sharma, N., Singh, S., Grewal, A. S., ... Kaushal, J. (2021). An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment, [Una revisión exhaustiva sobre las consecuencias de los pesticidas químicos en la salud humana y el medio ambiente]. *Journal of cleaner production*, 283, 124657. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124657
- Rejmánková, E., Komárek, J., Dix, M., Komárková, J., y Girón, N. (2011). Cyanobacterial blooms in lake atitlan, guatemala, [florencia de cianobacteria en el lago de atitlán, guatemala.]. *Limnologica*, 41(4), 296-302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2010.12.003>
- Reyes, F., Flor, B., Natanaél, X., Ujpan, D., y Martínez, Y. (2019). *Informe "monitoreo limnológico 2019"*. AMSCLAE, <https://www.amsclae.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/limnologico2019.pdf>.
- Rezaee, M., Assadi, Y., Hosseini, M.-R. M., Aghae, E., Ahmadi, F., y Berijani, S. (2006). Determination of organic compounds in water using dispersive liquid–liquid microextraction, [Determinación de compuestos orgánicos en agua mediante microextracción líquido-líquido dispersiva]. *Journal of Chromatography A*, 1116(1-2), 1–9. doi: 10.1016/j.chroma.2006.03.007
- Rezaee, M., Yamini, Y., y Faraji, M. (2010). Evolution of dispersive liquid–liquid microextraction

- method, [Evolución del método de microextracción líquido-líquido dispersivo]. *Journal of Chromatography A*, 1217(16), 2342–2357. doi: 10.1016/j.chroma.2009.11.088
- Romero, M. (2013). *Caracterización de las aguas residuales generadas en la cuenca del lago de Atitlán y su impacto*. Universidad Europea Miguel de Cervantes.
- Schwarzbauer, J., y Ricking, M. (2009). Non-target screening analysis of river water as compound-related base for monitoring measures, [Análisis de detección no objetivo de aguas fluviales como base para medidas de seguimiento relacionadas con compuestos]. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(4), 934–947. doi: 10.1007/s11356-009-0269-3
- Schäfer, R. B., Van Den Brink, P., y Liess, M. (2011). *Impacts of pesticides on freshwater ecosystems, [Impactos de los pesticidas en ecosistemas de agua dulce]*. doi: 10.2174/978160805121211101010111
- Settle, F. A., y Hites, R. (1997). *Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry, [Manual de técnicas instrumentales para la química analítica]*. Prentice Hall.
- Skoog, D. A., West, D. J. S., Holler, F. O., y Crouch, S. S. (2015). *Fundamentos de Química Analítica* (9.ª ed.). CENGAGE Learning.
- Speight, J. G. (2017). *Sources and types of organic pollutants, [Fuentes y tipos de contaminantes orgánicos]*. doi: 10.1016/b978-0-12-804492-6.00004-6
- Sáenz, E. R. (2015). *Proliferan vertederos clandestinos en la cuenca del Lago de Atitlán*. <https://shorturl.at/G79WY>.
- Sánchez, A., y Propin, E. (2017). TOURISM AND TERRITORY ON THE BANKS OF LAKE ATITLÁN, GUATEMALA, [Turismo y territorio en la cuenca del lago Atitlán, Guatemala]. *Revista geográfica de América Central*, 1(58E), 41. doi: 10.15359/rgac.58-2.2
- UVG. (s.f.). *Centro de Estudios Atitlán (CEA) - UVG*. Universidad del Valle de Guatemala, <https://www.uvg.edu.gt/investigacion/cea/>.
- Wang, Y., y Qian, H. (2021). Phthalates and their impacts on human health, [Ftalatos y sus impactos en la salud humana]. *Healthcare*, 9(5), 603. doi: 10.3390/healthcare9050603
- Yao, J., Gao, Q., Li, X., Hu, M., Ming-Ming, M., y Pan, B. (2013). Investigating River Pollution Flowing into Dianchi Lake Using a Combination of GC–MS Analysis and Toxicological Tests, [Investigación de la contaminación del río que desemboca en el lago Dianchi mediante una combinación de análisis GC-MS y pruebas toxicológicas]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92(1), 67–70. doi: 10.1007/s00128-013-1132-2
- Özcan, S. (2011). Analyses of polychlorinated biphenyls in waters and wastewaters using vortex-assisted liquid–liquid microextraction and gas chromatography-mass spectrometry, [Análisis de bifenilos policlorados en aguas y aguas residuales mediante microextracción líquido-líquido asistida por vórtice y cromatografía de gases-espectrometría de masas]. *Journal of Separation Science*, 34(5), 574–584. doi: 10.1002/jssc.201000623

Cromatogramas de muestras de agua tomadas el 7 de agosto de 2024

En este anexo se presentan los cromatogramas de las muestras de agua tomadas el 7 de agosto de 2024 en los puntos de la Figura 7. Para la preparación y el análisis de las muestras se siguió el procedimiento DLLME, explicado en la página 22 de la sección de Metodología. Debido a que cada una de las muestras se analizó en triplicado, se presentan los tres cromatogramas obtenidos para cada muestra, superpuestos entre sí.

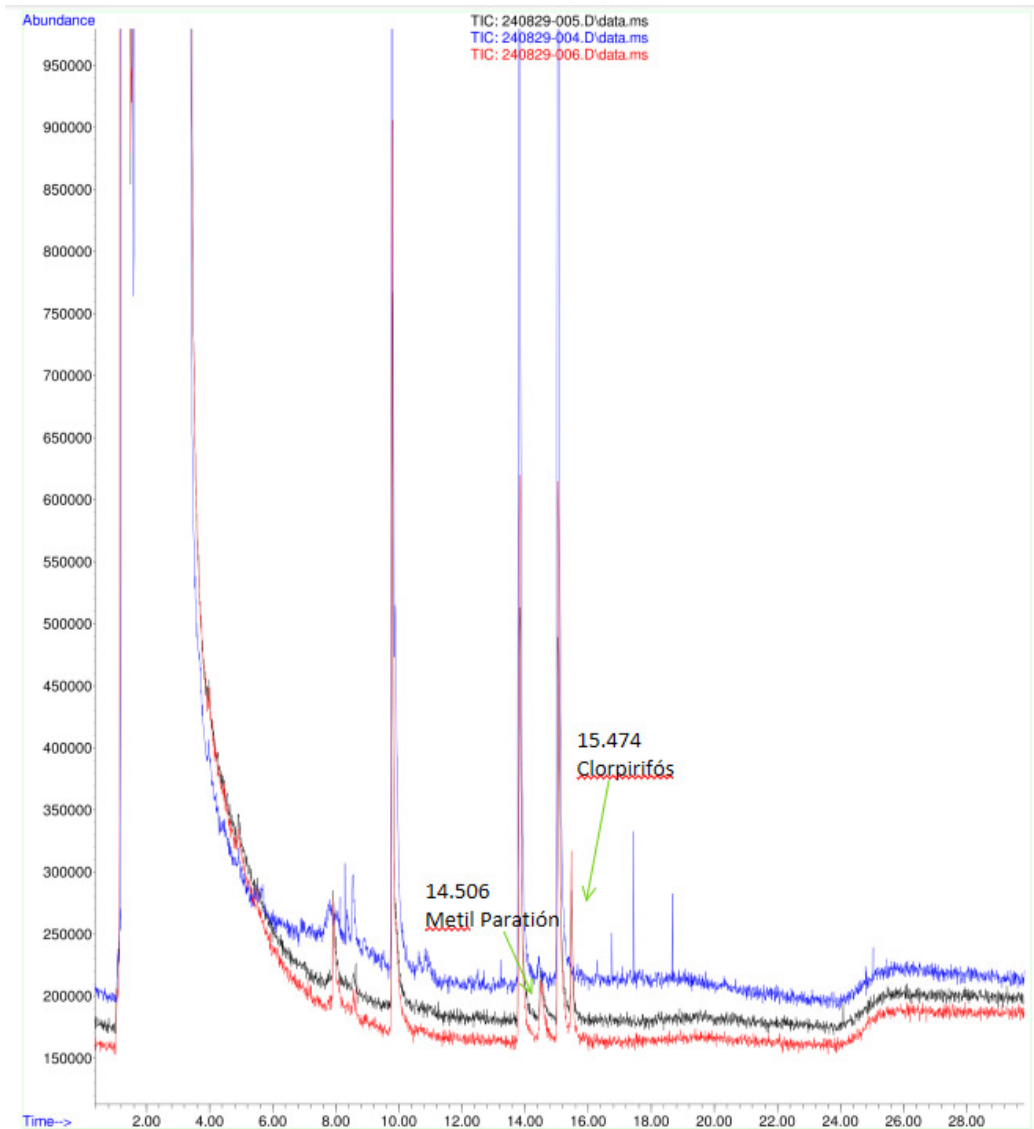
Figura 9
Cromatograma blancos



Nota. En esta figura se presenta el blanco (realizado en triplicado) que consistió en una extracción DLLME a agua desmineralizada. El cromatograma azul presenta una diferente línea base debido a que se corrió cuando el equipo tenía aún mucha humedad. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 10

Muestra 1 - desembocadura de Río San Francisco

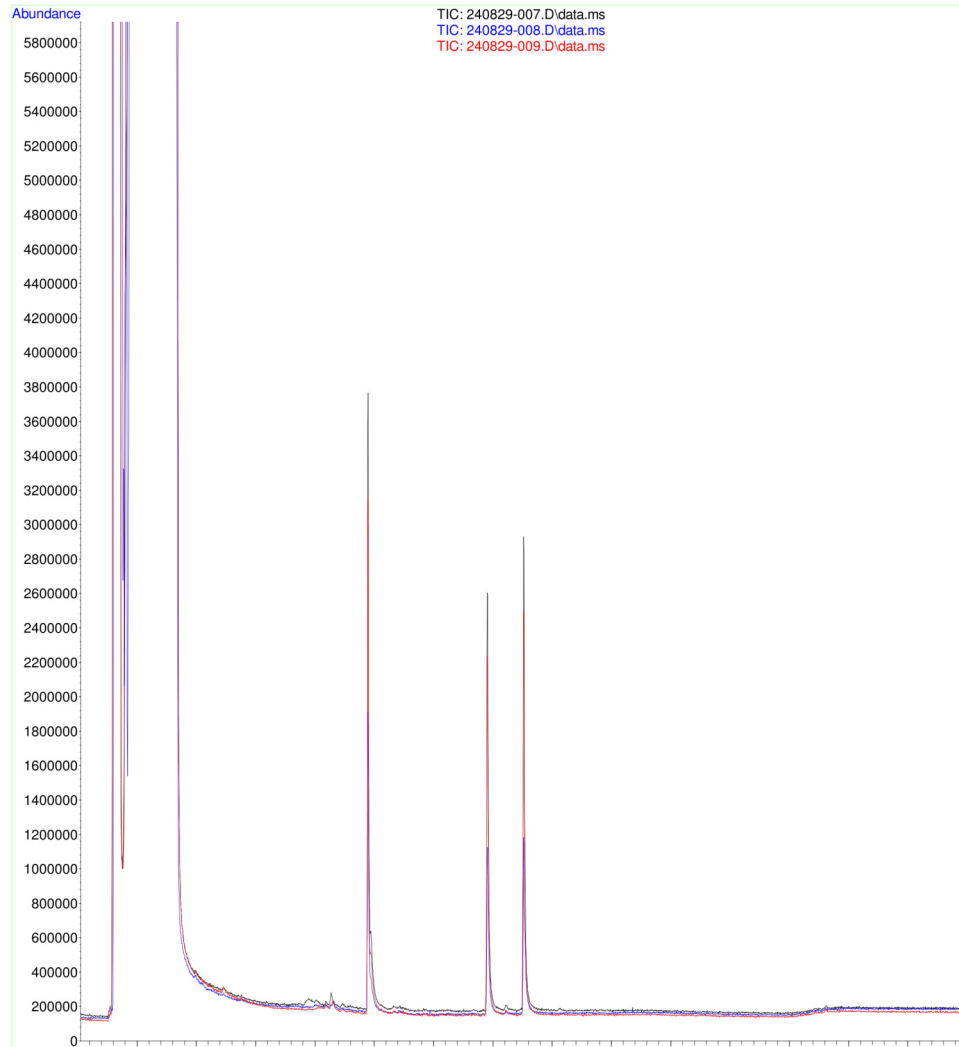


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 1, recolectada en la desembocadura del Río San Francisco. En esta muestra se dopó la extracción 1 y 2 (negro y rojo respectivamente) con los pesticidas metil paratión y clorpirifós a concentraciones de 0.01 ppm para verificar la eficiencia de la extracción. Dichos pesticidas se encuentran señalados en el cromatograma. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 11

Muestra 2 - desembocadura de Río Quiscab

Misc Info : tesis
Vial Number: 7

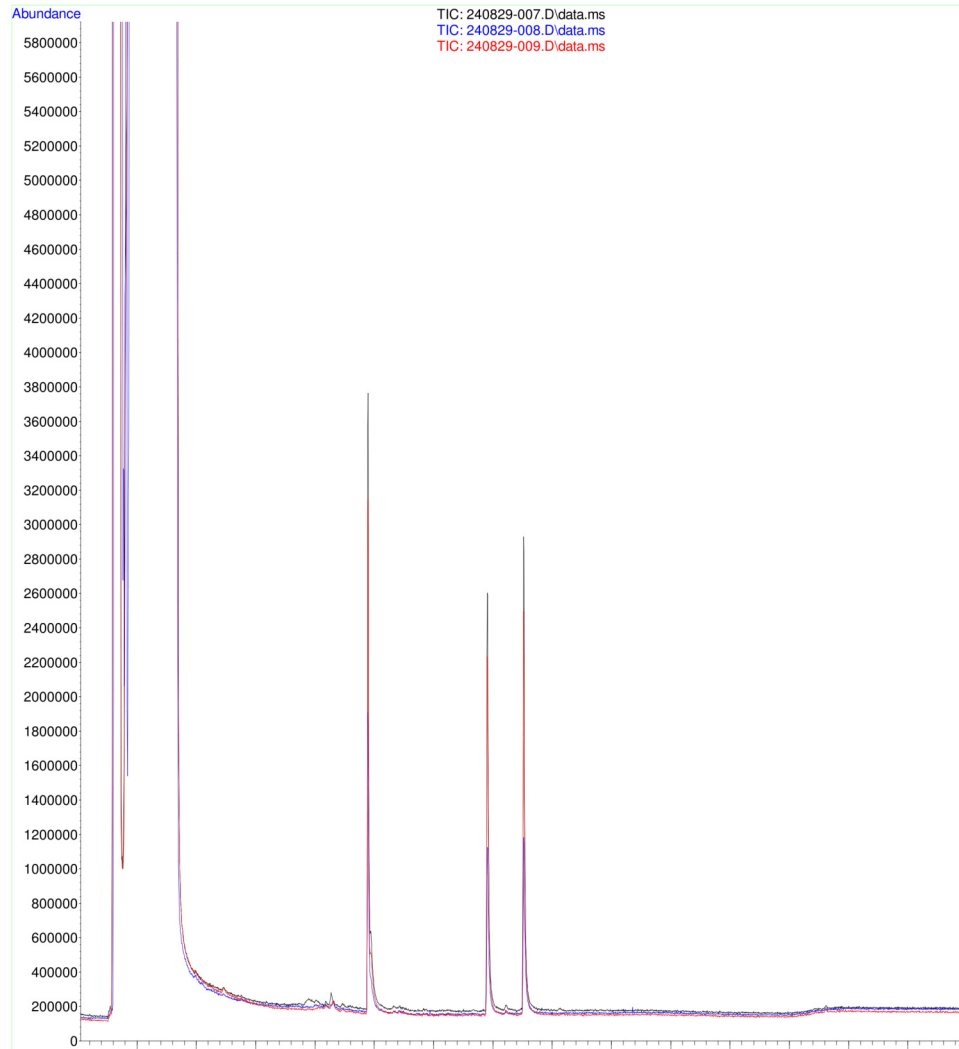


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 2, recolectada en la desembocadura del Río Quiscab. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 12

Muestra 3 - Río San Francisco

Misc Info : tesis
Vial Number: 7

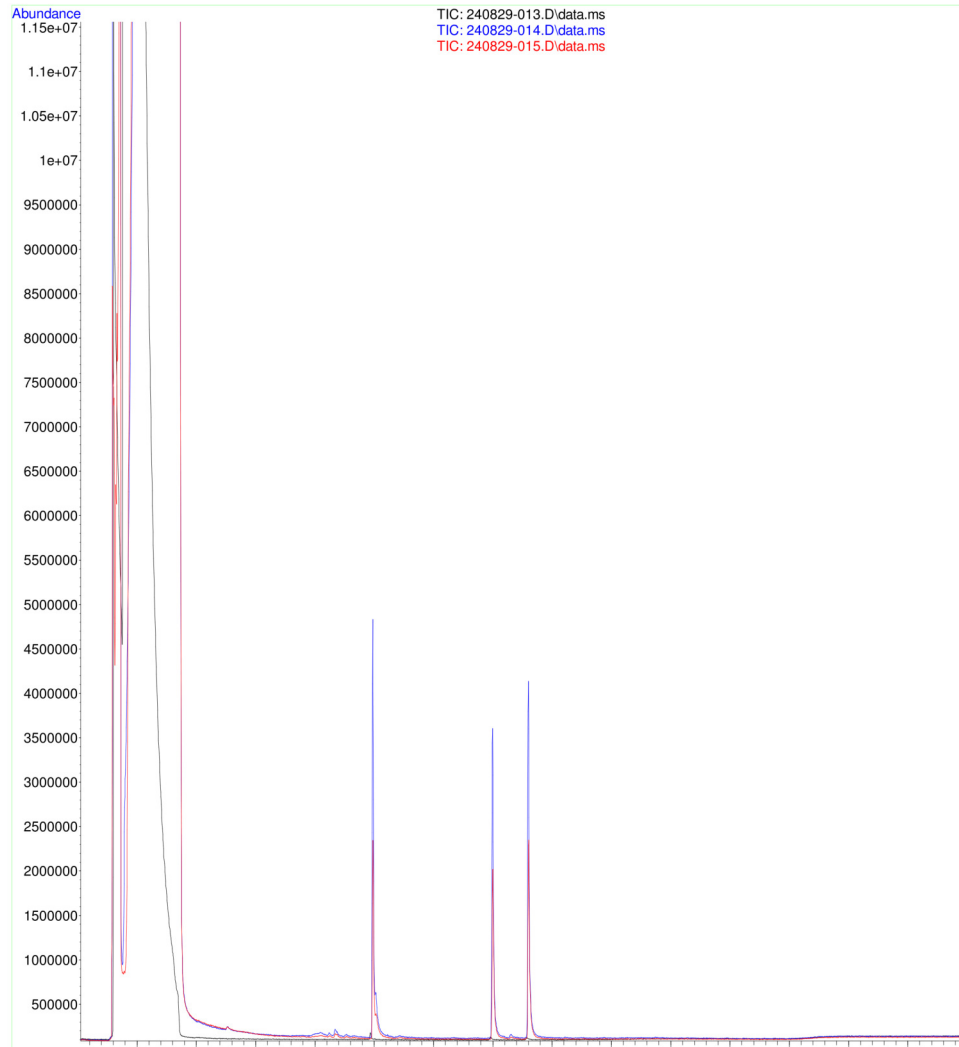


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 3, recolectada en el Río San Francisco. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 13

Muestra 4 - cuenca alta del Río Tzalá

Misc Info : tesis
Vial Number: 13

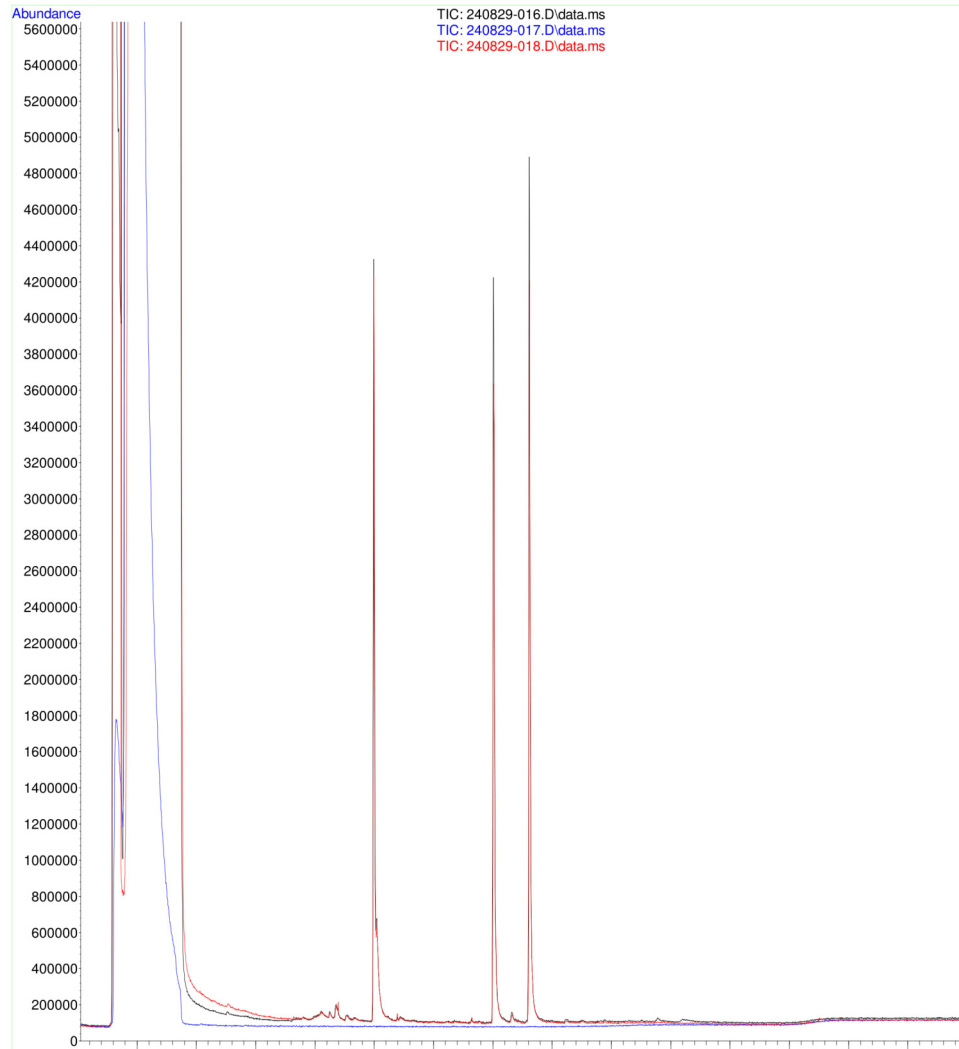


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 4, recolectada en la cuenca alta del Río Tzalá'. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 14

Muestra 5 - cuenca media del Río Tzala

Misc Info : tesis
Vial Number: 16

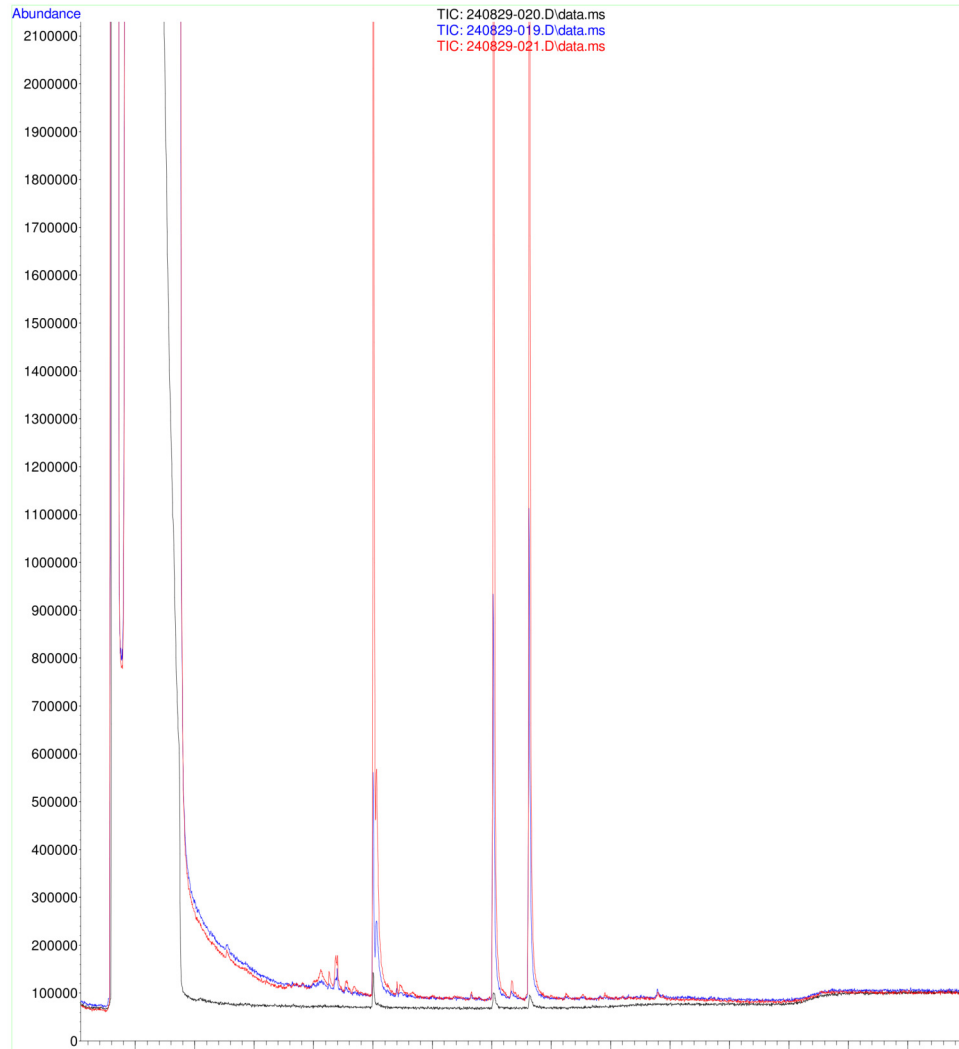


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 5, recolectada en la cuenca media del Río Tzala'. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 15

Muestra 6 - cuenca baja del Río Tzalá

Misc Info : tesis
Vial Number: 20

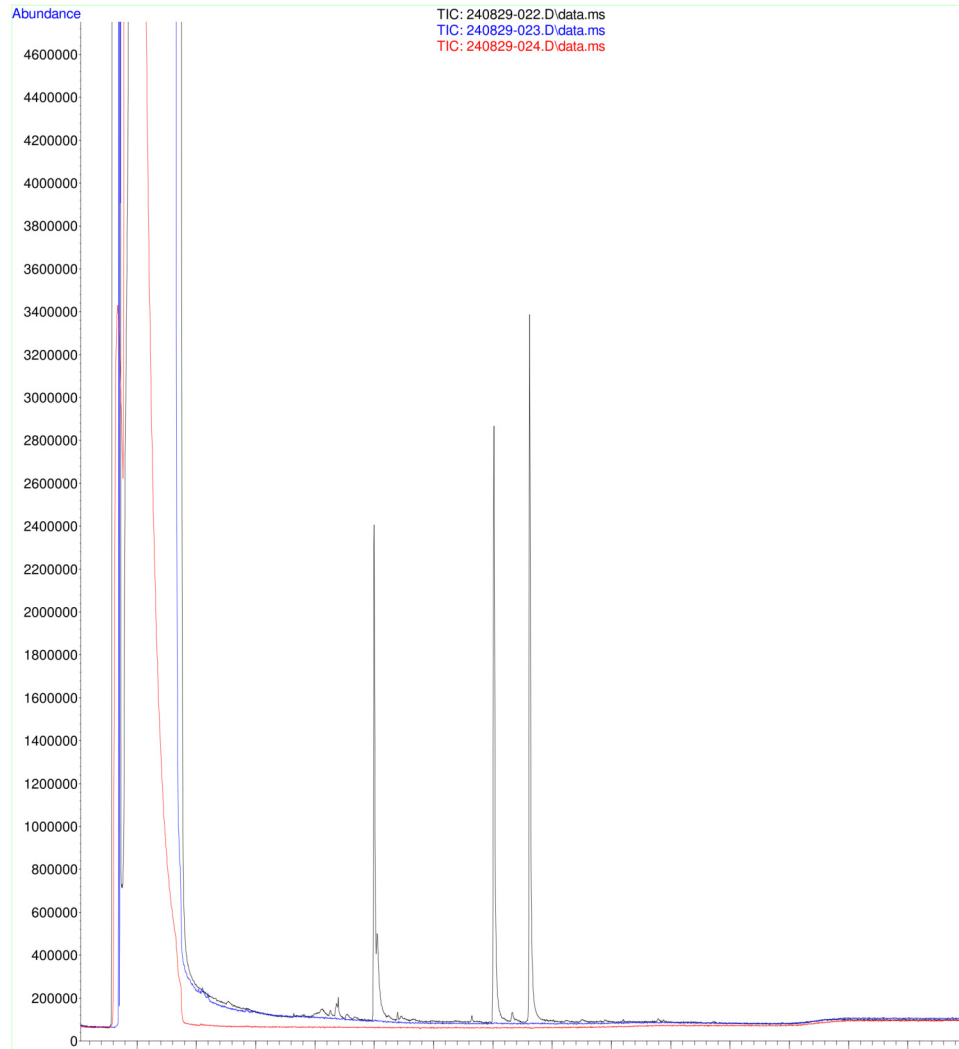


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 6, recolectada en la cuenca baja del Río Tzalá'. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 16

Muestra 7 - Río San Buenaventura

Misc Info : tesis
Vial Number: 22



Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 6, recolectada en el Río San Buenaventura. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

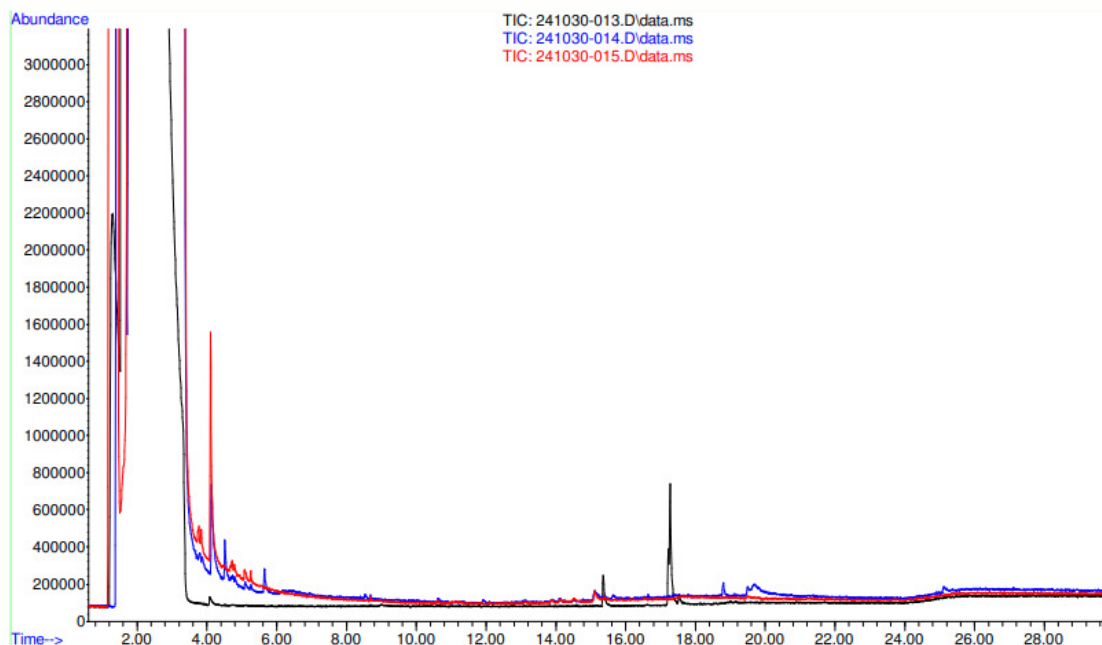
Cromatogramas de muestras de agua tomadas el 28 de octubre 2024

En este anexo se presentan los cromatogramas de las muestras de agua tomadas el 7 de agosto de 2024 en los puntos de la Figura 7. Para la preparación y el análisis de las muestras se siguió el procedimiento DLLME, explicado en la página 22 de la sección de Metodología. Debido a que cada una de las muestras se analizó en triplicado, se presentan los tres cromatogramas obtenidos para cada muestra, superpuestos entre sí

Figura 17

Cromatograma blancos

Sample Name: BLA
Misc Info : tesis
Vial Number: 12

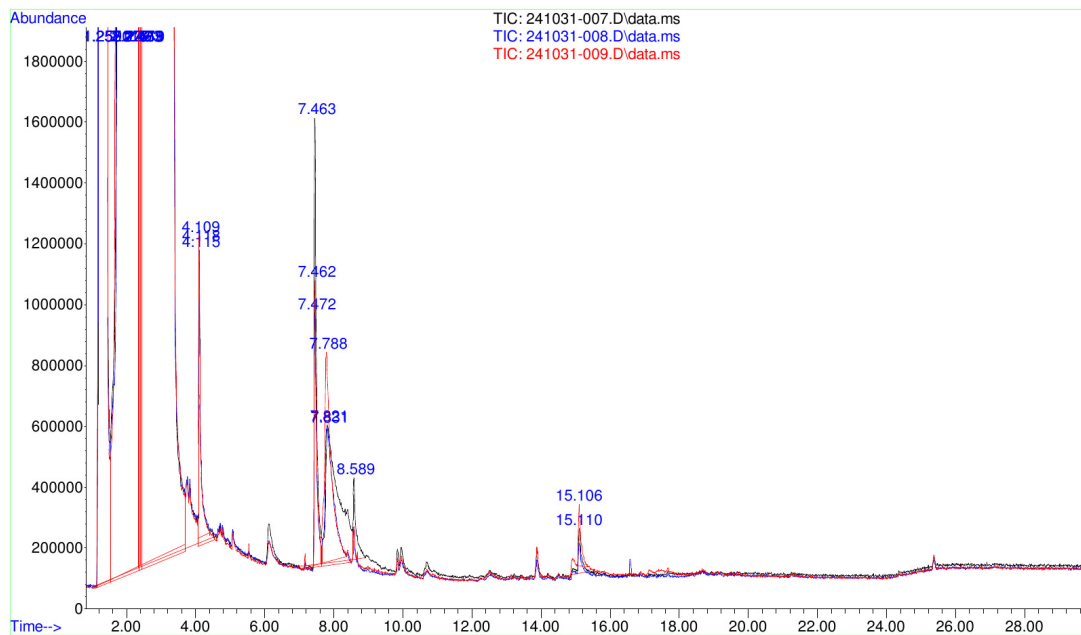


Nota. Se presentan los blancos superpuestos para la experimentación realizada con las muestras del 28 de octubre. El blanco consistió en una extracción DLLME realizada con agua desmineralizada. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 18

Muestra 1 - desembocadura Río San Francisco

File :C:\msdchem\1\DATA\Tesis\241031-007.D
Operator : AdeM
Acquired : 31 Oct 2024 14:14 using AcqMethod RESIDUOS DETECTABLES EN AGUA.M
Instrument : GC-MSD
Sample Name: 1A
Misc Info : tesis
Vial Number: 7

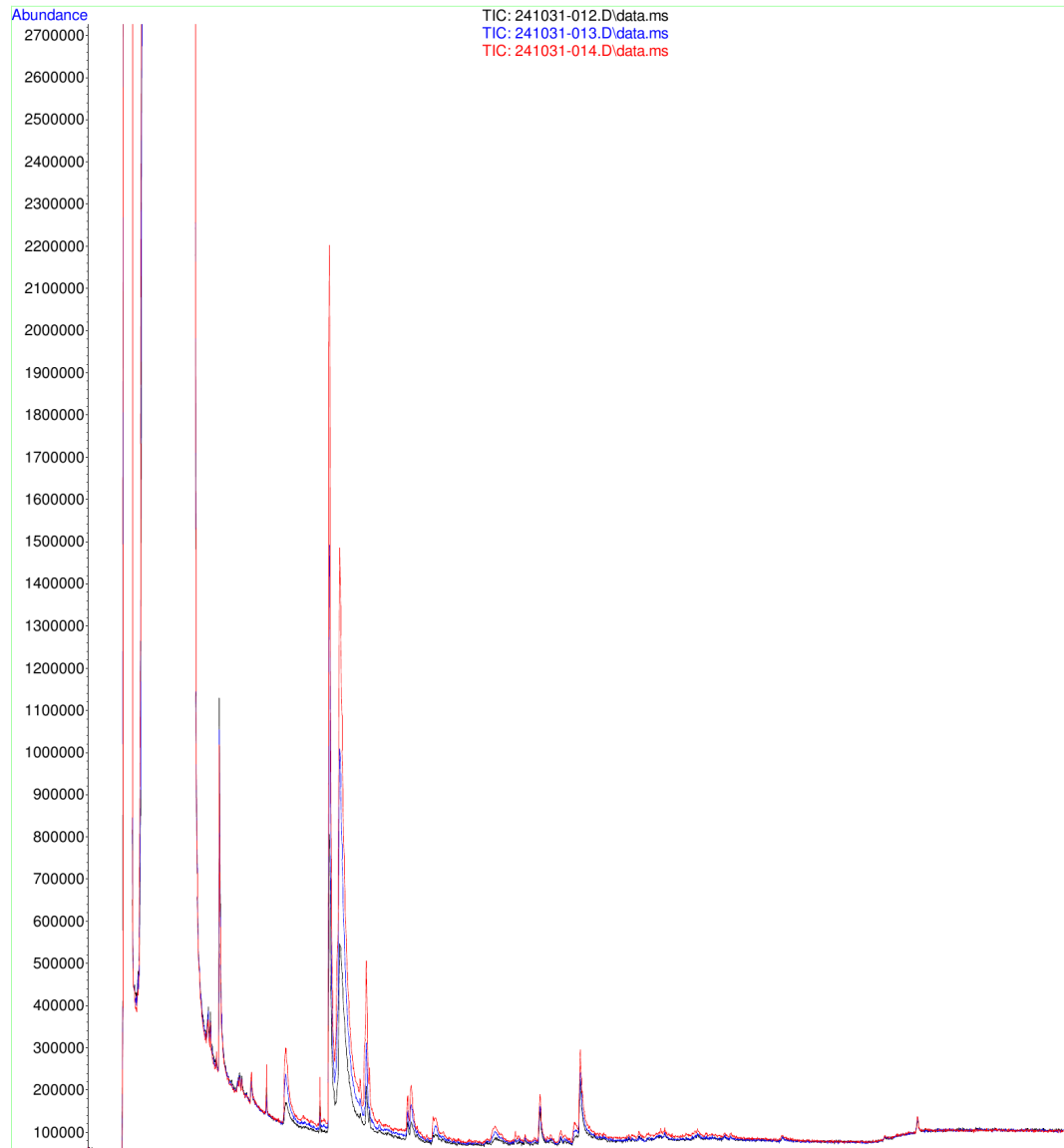


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 1, recolectada en la desembocadura del Río San Francisco. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 19

Muestra 2 - desembocadura de Río Quiscab

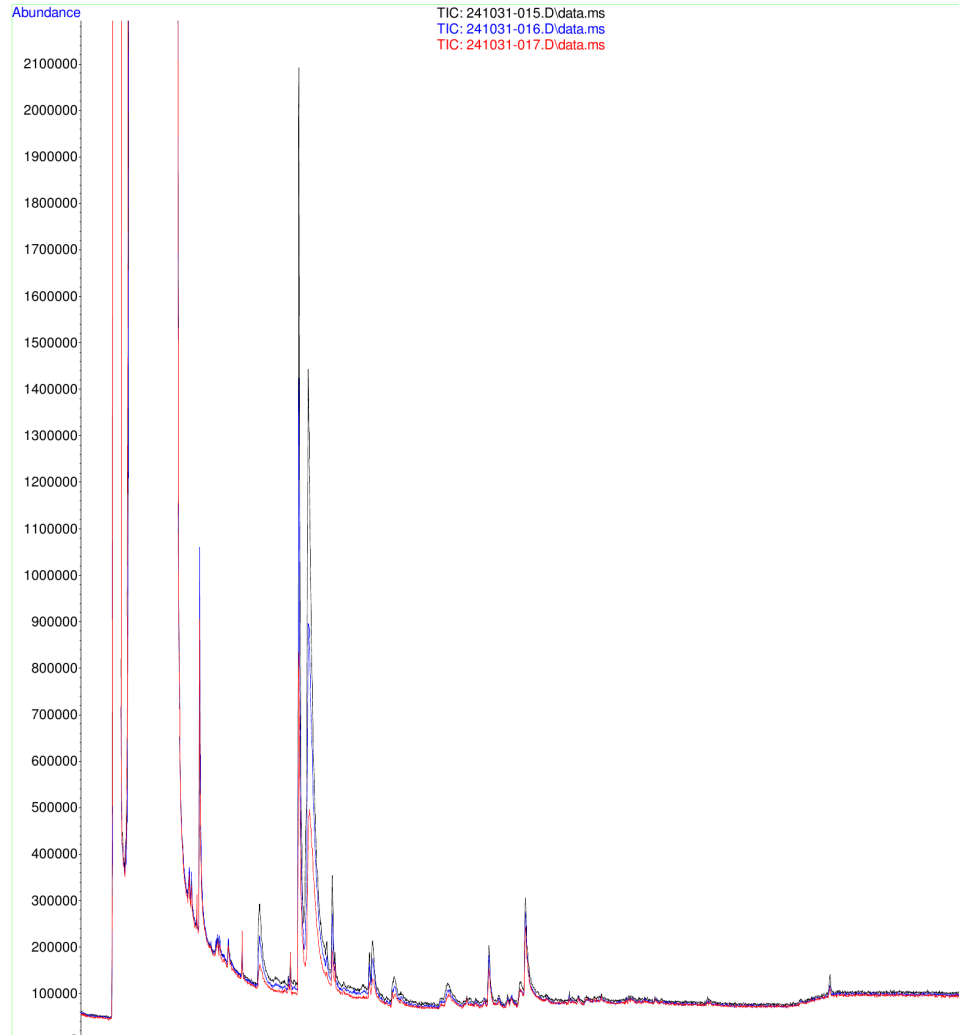
File :C:\msdchem\1\DATA\Tesis\241031-012.D
Operator : AdeM
Acquired : 31 Oct 2024 17:17 using AcqMethod RESIDUOS DETECTABLES EN AGUA.M
Instrument : GC-MSD
Sample Name: 3A
Misc Info : tesis
Vial Number: 12



Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 2, recolectada en la desembocadura del Río Quiscab. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 20
Muestra 3 - Río San Francisco

Vial Number: 15

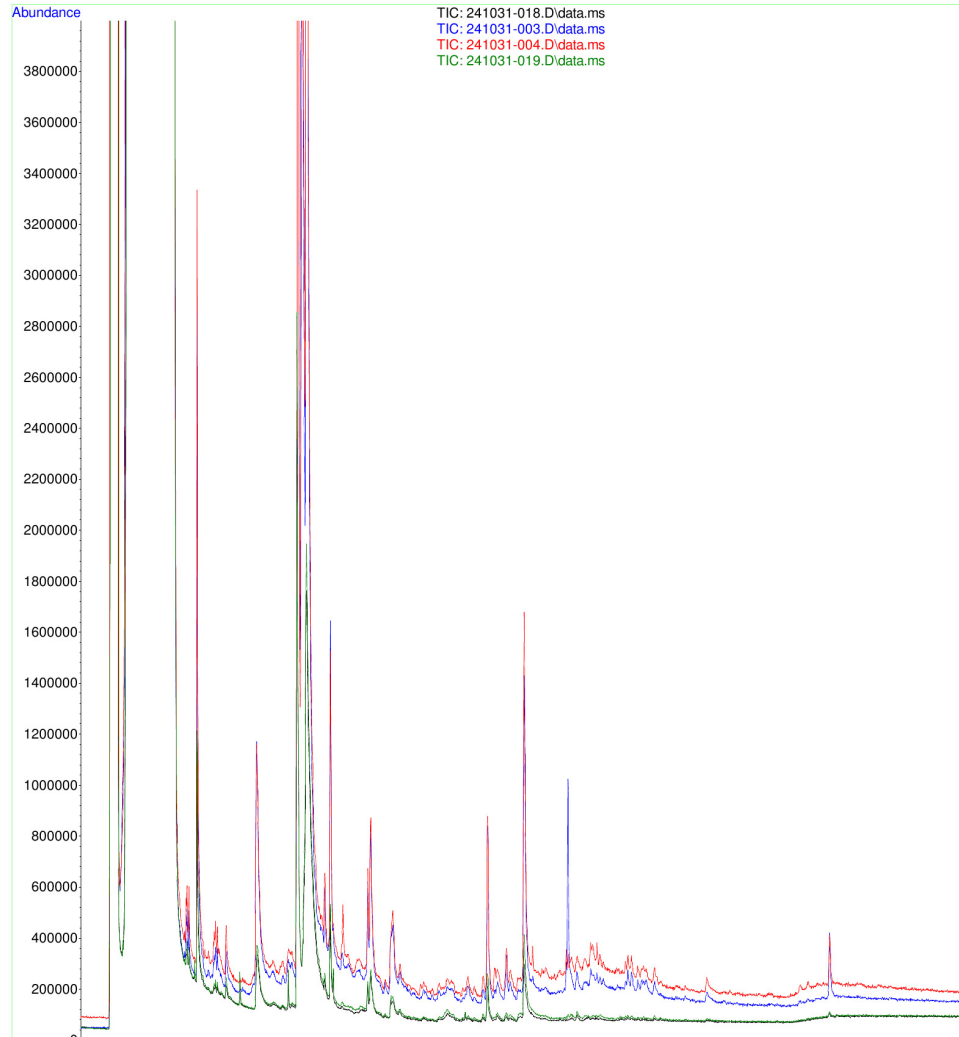


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 3, recolectada en el Río San Francisco. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 21

Muestra 4 - cuenca alta del Río Tzalá

Vial Number: 18

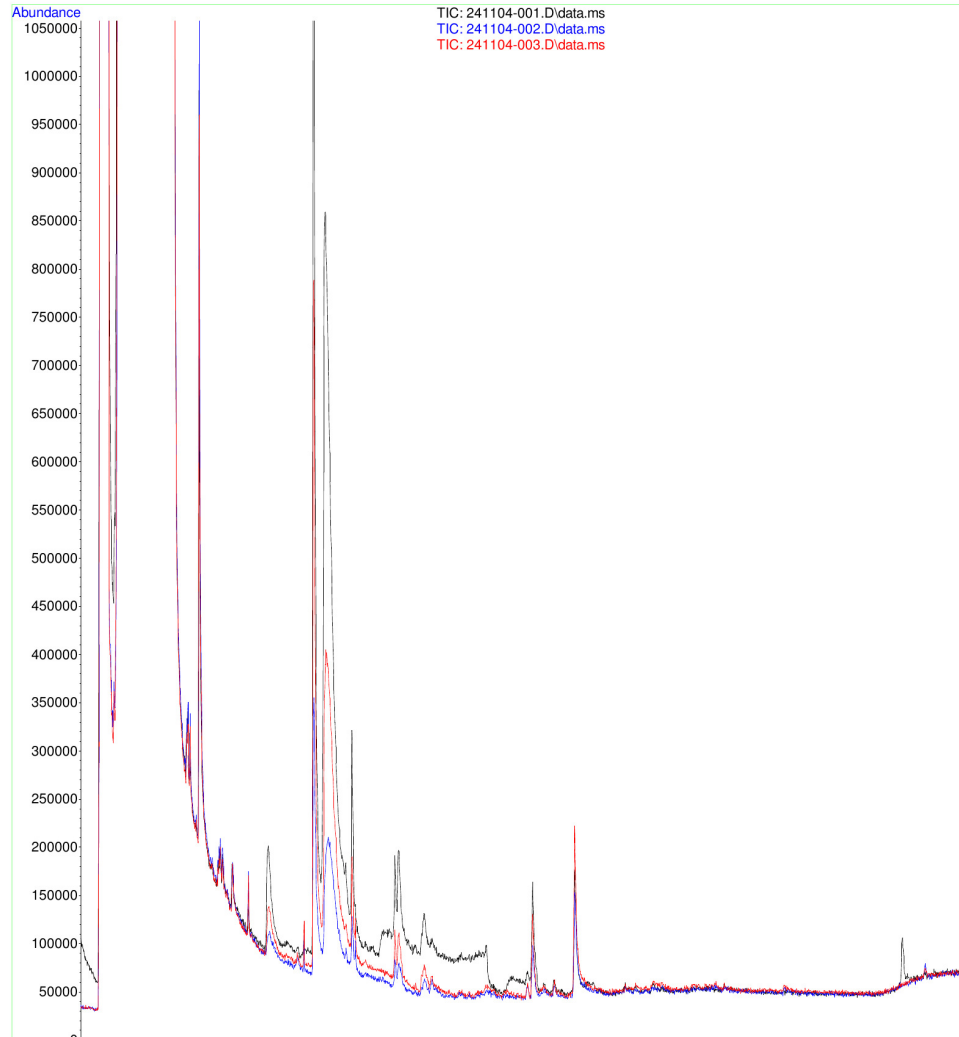


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 4, recolectada en la cuenca alta del Río Tzalá'. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 22

Muestra 5 - cuenca media del Río Tzalá

Vial Number: 1

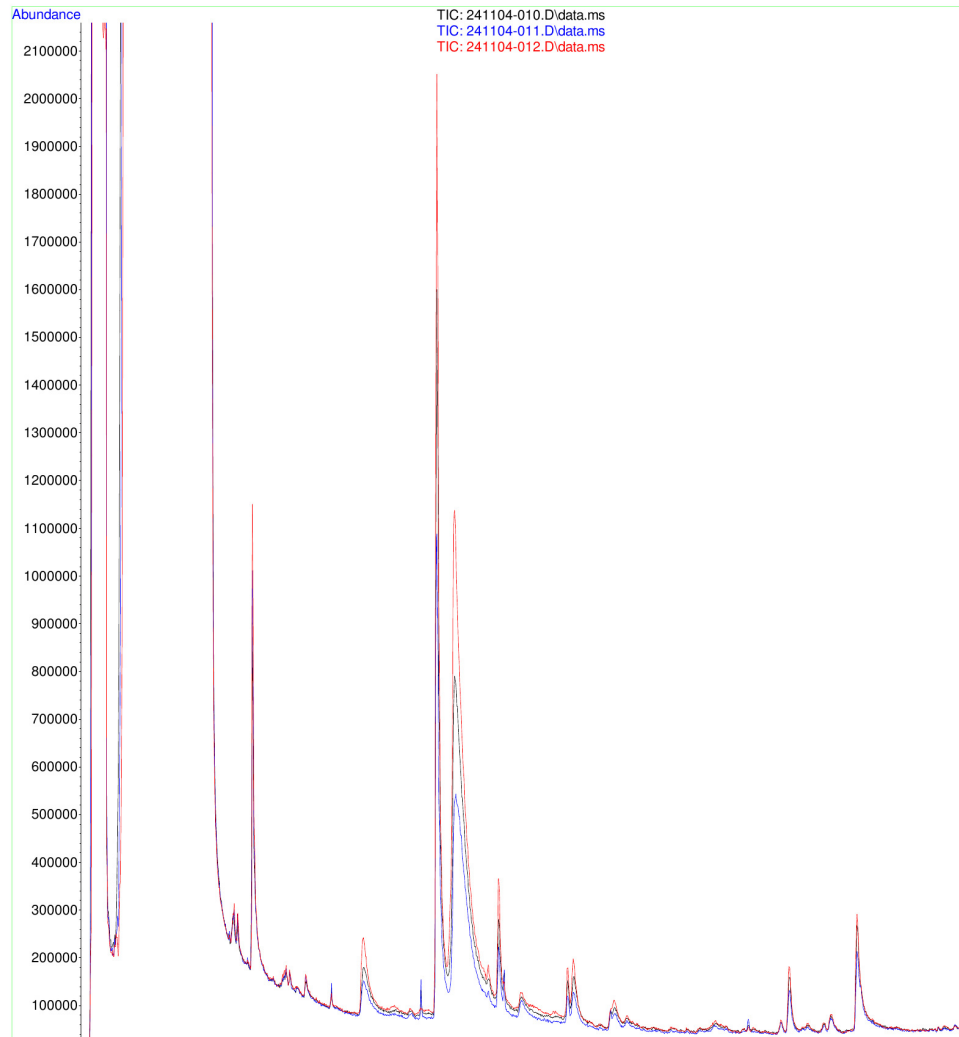


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 5, recolectada en la cuenca media del Río Tzalá'. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 23

Muestra 6 - cuenca baja del Río Tzalá

Vial Number: 10

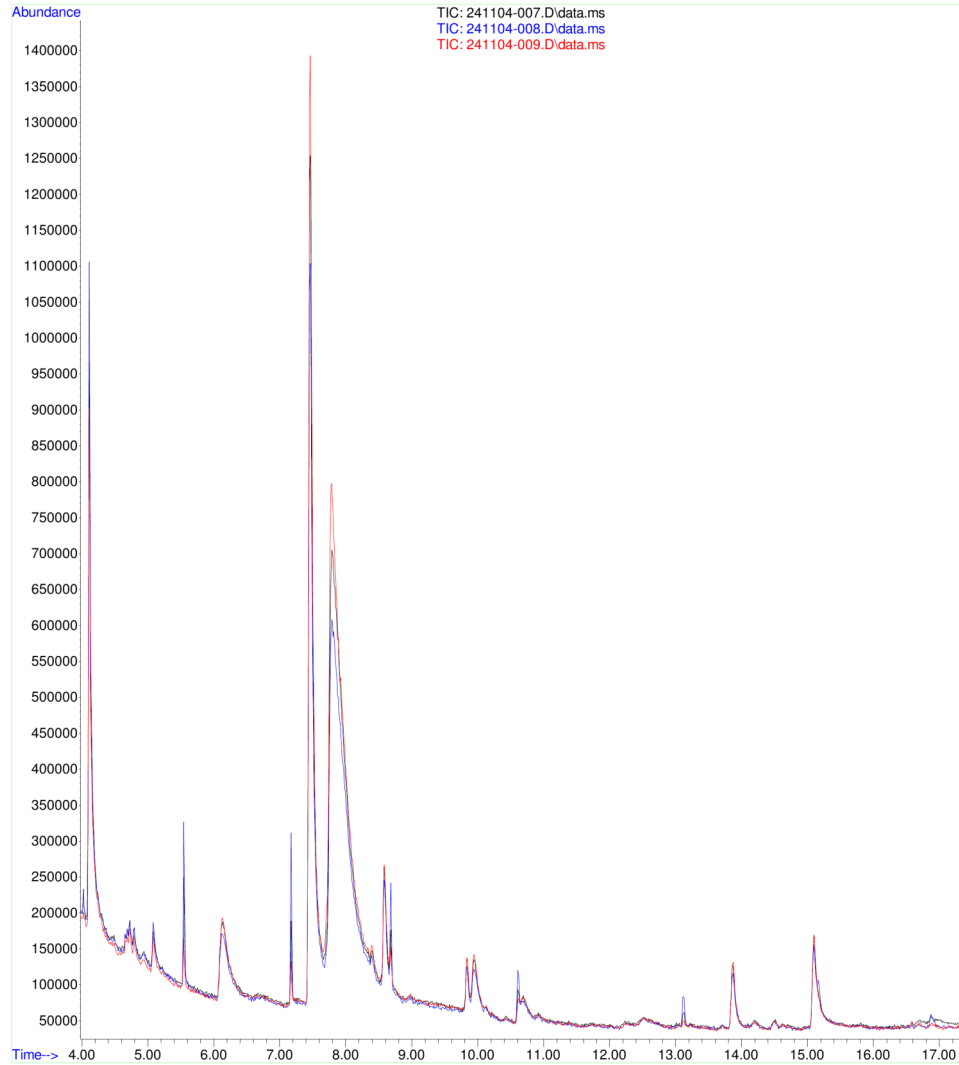


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 6, recolectada en la cuenca baja del Río Tzalá'. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 24

Muestra 7 - Río San Buenaventura

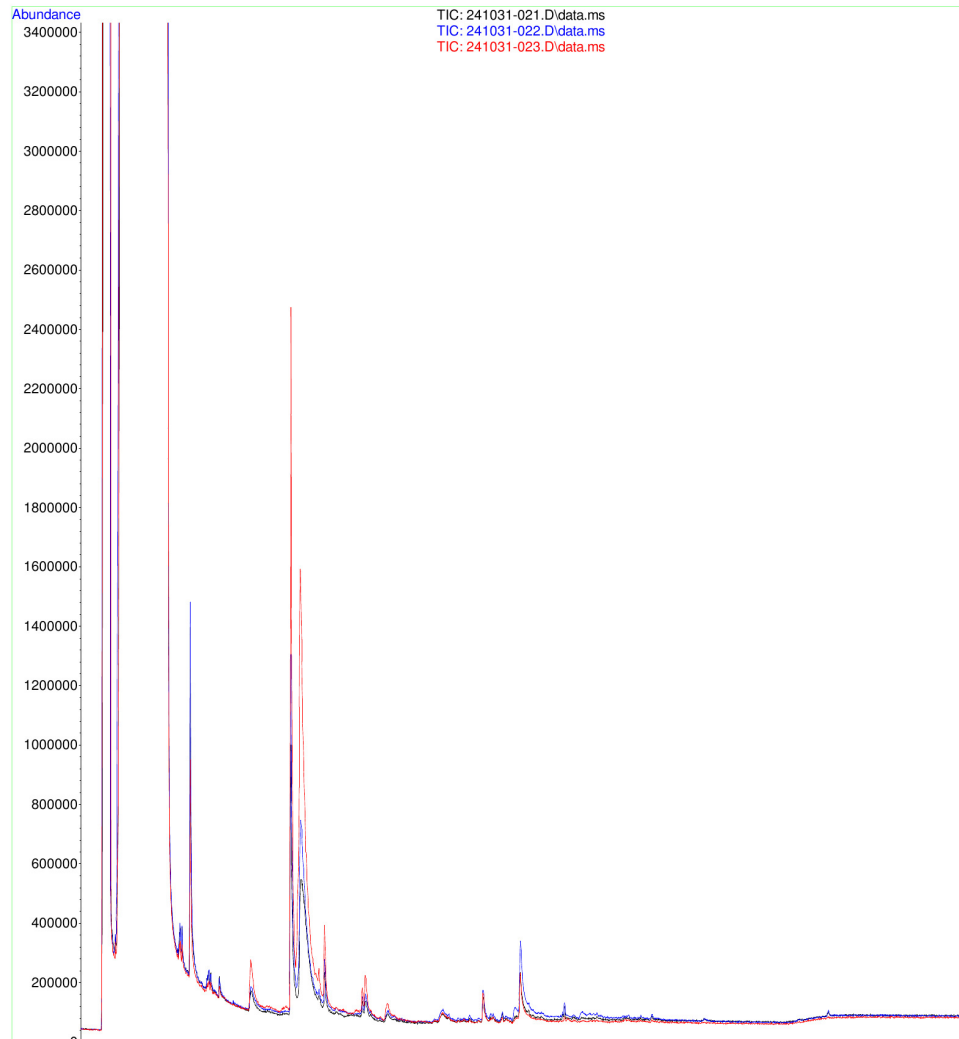
Instrument : GC-MSD
Sample Name: 9A
Misc Info : tesis
Vial Number: 7



Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 6, recolectada en el Río San Buenaventura. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 25
Muestra 8 - Río Catarata

Vial Number: 21

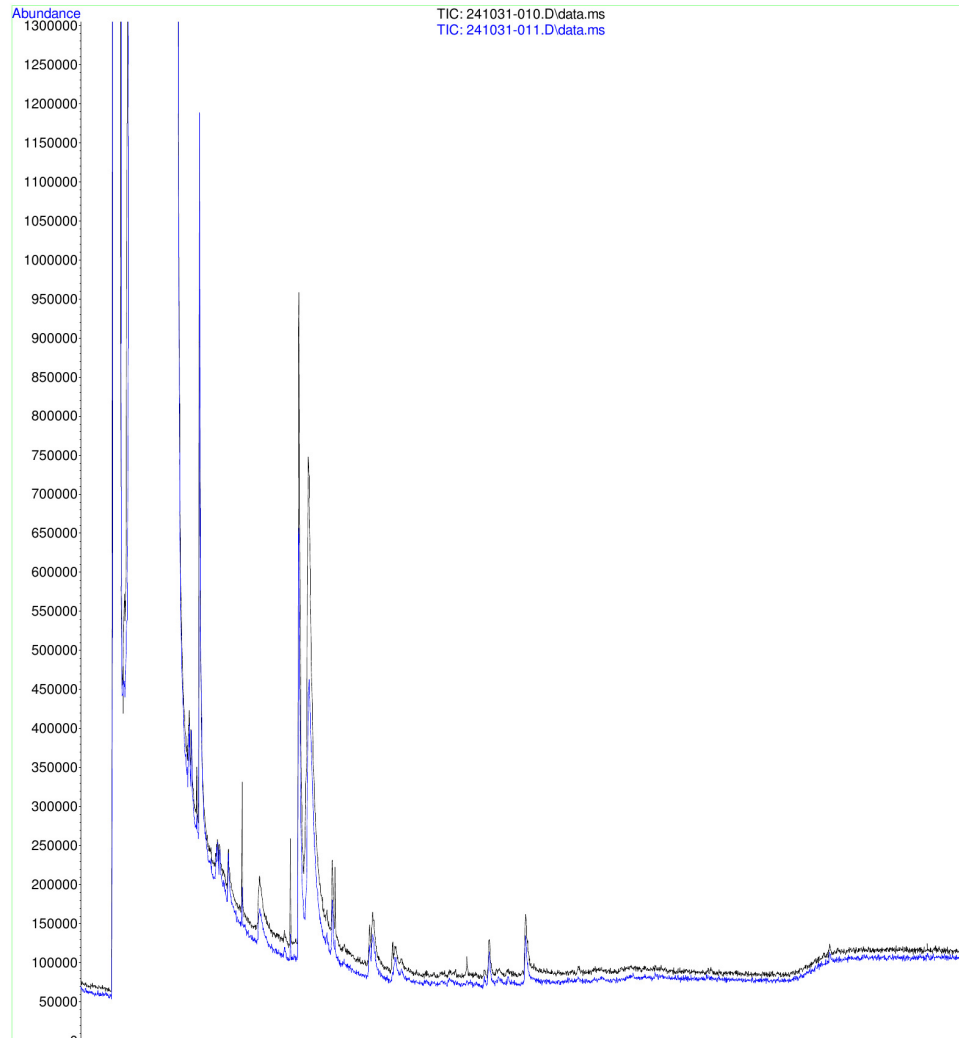


Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 6, recolectada en el Río San Buenaventura. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 26

Muestra 9 - PTAR1

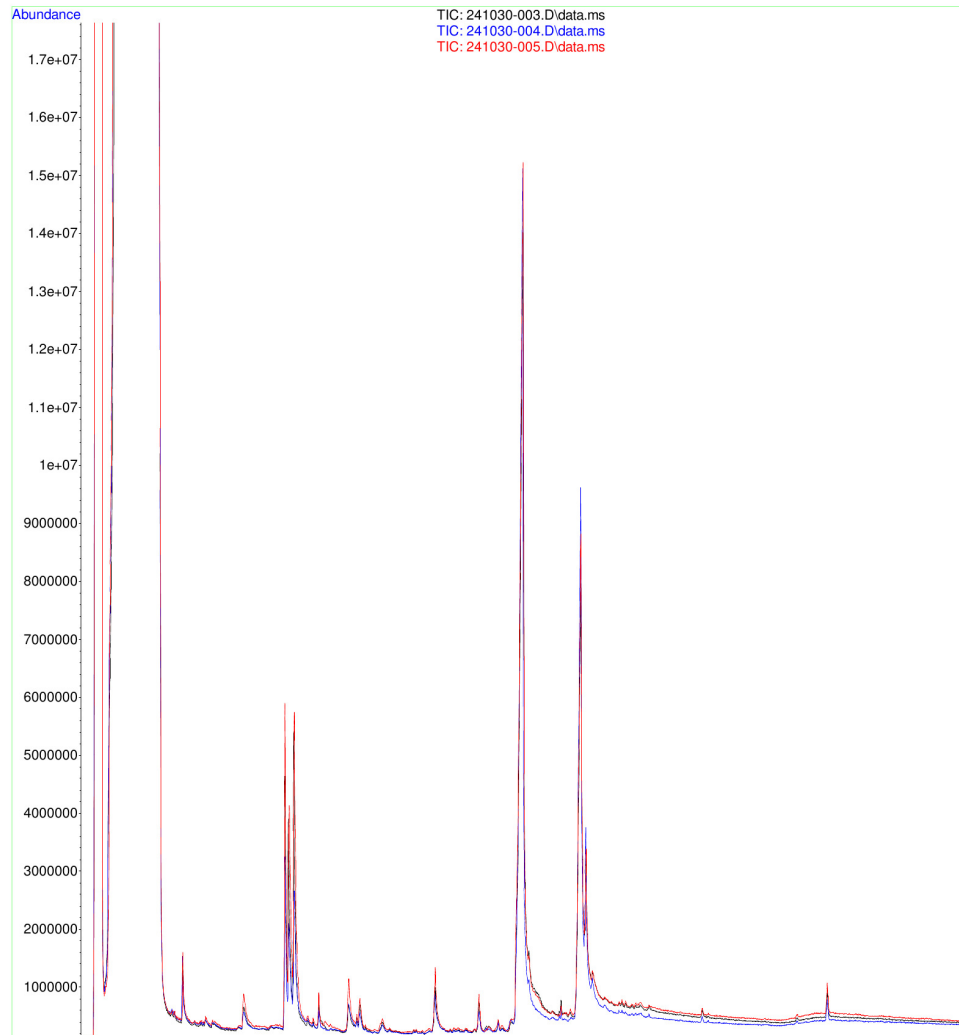
Vial Number: 10



Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 6, recolectada en el Río San Buenaventura. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.

Figura 27
Muestra 10 - PTAR2

Vial Number: 2




Nota. En esta figura se presentan los cromatogramas superpuestos de la extracción en triplicado de la muestra 6, recolectada en el Río San Buenaventura. Las muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 acoplado a un detector de masas modelo 5975. Para el análisis de datos se utilizó el programa NIST 2.0.



Fotografías de los sitios de muestreo



En el cuadro 11 se presentan fotografías tomadas de los sitios de muestreo, acompañadas de una descripción breve. Las muestras fueron tomadas el 7 de agosto y el 28 de octubre de 2024. En el cuadro 6 en la página 22 se presentan las coordenadas de cada sitio.



Cuadro 11



Fotografías de los sitios de muestreo

Sitio de muestreo	Fotografía
<p>1. Río Tzalá' parte alta: el Río Tzalá pasa por la finca Labores, propiedad de la Universidad del Valle de Guatemala. La finca está ubicada en San Andrés Semetabaj. Se tomó tres muestras de agua a diferentes alturas del río (alta, baja y media), todas dentro de la finca.</p>	

Sitio de muestreo	Fotografía
2. Río Tzalá' parte media:	
3. Río Tzalá' parte baja:	

Sitio de muestreo	Fotografía
<p>4. Río San Francisco (desembocadura): el Río San Francisco desemboca en Panajachel. Se tomó dos muestras de este río, la primera fue tomada en la desembocadura, desde una lancha. La otra muestra fue tomada unos 50 metros antes de la desembocadura.</p>	 A photograph showing a person in a small boat on the Río San Francisco. The person is wearing a red cap and is positioned in the middle of the river. The background features a range of mountains under a clear sky. The water is calm, reflecting the surrounding environment.
<p>5. Río Quiscab (desembocadura): el Río Quiscab desemboca en Sololá (cabecera), las muestras de este punto fueron tomadas desde una lancha.</p>	 A photograph taken from the perspective of someone on a boat on the Río Quiscab. The foreground shows the blue hull of the boat. The river flows towards a rocky bank on the left, with dense green forest covering the hillsides in the background.

Sitio de muestreo	Fotografía
<p>6. Río San Francisco: las muestras del Río San Francisco fueron tomadas a unos 50 metros de la desembocadura. Se puede acceder a este río caminando desde el puerto de Panajachel.</p>	
<p>7. Río San Buenaventura: el Río San Buenaventura pasa al costado de la carretera que baja al lago desde Sololá, el punto desde donde se tomaron las muestras fue a unos 30 metros desde la carretera.</p>	

Sitio de muestreo	Fotografía
<p>8. Río Catarata: el Río Catarata se incluyó en el muestreo ya que ofrece una parada turística a muchas personas que visitan el lago, dando lugar a que se deposite basura en él. Las muestras de este punto fueron tomadas en el agua que pasa por debajo del puente.</p>	 A photograph showing a waterfall cascading down a rocky, brownish terrain. The water is white and frothy as it falls. The surrounding area is lush with green vegetation and trees. The sky is overcast.
<p>9. Efluente PTAR Tzanjuyú: el efluente de planta de tratamiento desemboca directamente en el Lago de Atitlán, en Panajachel. La muestra de este punto se tomó desde una lancha, a unos pocos metros de la tubería donde fluye el agua de la planta.</p>	 A photograph showing a person in a black shirt and blue gloves leaning over the side of a boat to collect a water sample from a pipe. The water is murky and greenish. The background shows a structure with a metal frame and some vegetation.

Sitio de muestreo	Fotografía
<p>10. Afluente PTAR San Andrés Semetabaj: esta planta se encuentra en la cuenca del río Tzalá. Se tomó la muestra del agua que entra a la planta, antes de ser tratada.</p>	 A photograph showing the PTAR San Andrés Semetabaj water treatment plant. The image features a yellow building with a blue roof, a concrete structure with a metal grate, and a dirt path leading towards the facility. The background is filled with lush green trees under a blue sky with some clouds.