



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS - ESCUELA DE CIENCIAS
AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA

“Evaluación de los niveles de concentración de
hidrocarburos aromáticos policíclicos mediante
captadores pasivos de aire en el ex vertedero Lepanto,
ubicado en la comuna de San Bernardo”

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de
los requisitos para optar al Título de

Químico Ambiental

Jennifer Andrea Saa Salamanca

Director del Seminario de Título:

Dr. Carlos Andrés Manzano Dávila

Mayo 2023
Santiago - Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la **Sr(ta)**.

Jennifer Andrea Saa Salamanca

“Evaluación de los niveles de concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos mediante captadores pasivos de aire en el ex vertedero Lepanto, ubicado en la comuna de San Bernardo”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

Director Seminario de Título: Dr. Carlos Andrés Manzano Dávila

Comisión Revisora y Evaluadora

• **Presidente Comisión:** Dra. Laura Tamayo

Evaluador: Dra. Zoe Fleming

Santiago de Chile, Mayo 2023

Biografía

Jennifer Saa nació un 16 de Octubre de 1996, cursó hasta los 18 años en el colegio Santa María de Santiago, ubicado en Santiago centro.

Cuando pasó a primero medio, le empezaron a pasar ramos relacionados con la formación de la Tierra, y como se compone en su interior, la generación de los límites tectónicos, como los convergentes, divergentes y transformantes, los cuales separan, unen y mueven las placas que componen la Tierra, y además de como estos generan desde los terremotos a los tsunamis, erupciones volcánicas, creación de islas, entre otros, llamándole por primera vez la atención a las ciencias.

Preparó la PSU (actual PAES), en el preuniversitario de la Pontificia Universidad Católica, para entrar a Geología en la Universidad de Chile, sin embargo, el puntaje alcanzado, le dio la oportunidad a ir a estudiar a Antofagasta, la carrera de sus sueños, o ingresar al sistema de Bachillerato de la Universidad de Chile.

Logró entrar a Bachillerato, con mención en ciencias, sin embargo, sufrió una serie de obstáculos, que le impidió la transferencia a Ingeniería en el campus Beauchef, por lo que se replanteó qué es lo realmente deseaba estudiar. Cursando Química General 2, el profesor a cargo de ese ramo le mencionó de la carrera Química Ambiental, la cual al final del cuarto año, le daba la posibilidad de aprender sobre la composición del suelo, por lo que vio la posibilidad de estudiar lo que quería, pero enfocado al área más de la ciencia ambiental, lo cual le llamaba más la atención, ya que el tema ambiental es algo de lo que siempre estuvo preocupada. Finalmente, después de dos años y medio cursando Bachillerato, logró la transferencia a la carrera de Química ambiental, en la cual presentó dificultad en la adaptación académica, pero que no impidió seguir estudiando una carrera en la que siente que puede ser parte de algo más importante que el éxito profesional.

Agradecimientos

Quisiera agradecer el apoyo incondicional de mi familia, que han estado atentos en todo el proceso de escritura y ejecución de este trabajo, no solo en los momentos de alegría que entrega el dedicarse a este proceso, sino también han estado presente en los momentos de dificultad, los cuales generan momentos de inseguridad y ansiedad.

Agradecer también el apoyo constante de mi director de tesis, que, a pesar de cada obstáculo presentado para la ejecución de los procedimientos, nunca perdió la fe en que culminara este proceso con resultados que ninguno de los dos se esperaba inicialmente, y que resultan alentadores para posteriores estudios e investigación en la zona escogida.

Finalmente, me gustaría agradecer a mi pareja y amigos, de quienes nunca faltaron las palabras de aliento en los momentos de flaqueza, de dudas que genera este proceso, lleno de obstáculos, ya sean personales como profesionales.

Índice De Contenido

Biografía	ii
Agradecimientos	iii
Índice De Contenido	iv
Índice de tabla	vi
Índice de figuras.....	viii
Resumen	x
Abstract	xii
I. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Antecedentes específicos	2
1.2.1. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	2
1.2.2. Captadores pasivos de aire	3
1.2.3. Pasivos Ambientales	5
1.2.3.1. Contextualización internacional	6
1.2.3.2. Contextualización nacional	10
1.3. Objetivos	16
II. Materiales y métodos.....	17
1. Limpieza de sustratos previa a la toma de muestras	17
2. Descripción sitios de muestreo e instalación del captador pasivo.....	18
3. Extracción y procesamiento de muestras.....	22
4. Análisis de extracto	24

5.	Análisis de control y aseguramiento de calidad (QA/QC)	26
5.1.	Recuperaciones	26
5.2.	Límite de detección y cuantificación.....	27
5.3.	Efecto matriz del sustrato.....	27
5.4.	Estimación de concentración ambiental.	27
III.	Resultados y discusión.....	29
1.	Análisis de control y aseguramiento de calidad (QA/QC)	29
1.1.	Curvas de calibración	29
1.2.	Evaluación instrumental	31
1.3.	Recuperaciones	32
1.4.	Límites de detección y cuantificación	32
2.	Efecto matriz del sustrato.....	32
3.	Concentraciones de PAHs detectadas en los PUFs.....	33
4.	Estimación concentración ambiental	35
5.	Comparación estudios internacionales.....	37
IV.	Conclusiones	44
V.	Bibliografía.....	46

Índice de tabla

Tabla 1: Concepciones institucionales de pasivos ambientales.	8
Tabla 2: Concepciones académicas de pasivos ambientales.....	8
Tabla 3: Concepciones normativas de pasivos ambientales	9
Tabla 4: Definición de pasivos ambientales basados en dos modelos económicos (Montero & Navarro, 2011).	9
Tabla 5: Tipos de pasivos ambientales según Entidad de Fiscalización Superior y Entidad Superior participante en la Auditoría Coordinada de Pasivos Ambientales (OLACEFS, 2016).....	12
Tabla 6: Resumen fichas técnicas de cinco sitios de disposición final de residuos ubicados en la Región Metropolitana (Elaboración propia a partir de Ministerio del Medio Ambiente, 2017.).....	13
Tabla 7: Solventes ocupados y volúmenes para eluir en las dos fracciones de elución.	23
Tabla 8: Programa del horno del GC-FID.....	24
Tabla 9: Valores de promedios, desviación estándar y desviación estándar relativa tanto de las áreas como de los tiempos de retención obtenidos de inyecciones semanales de control.....	31
Tabla 10: Promedio de las áreas del triplicado, el área del estándar y el promedio del factor de recuperación.	32
Tabla 11: Límites de detección y cuantificación del instrumento (IDL) para los compuestos objetivos, fenantreno (Phe) y fluoranteno (Flu), respectivamente, los valores se encuentran expresados en ng/m ³	32
Tabla 12: Tiempos de retención y el efecto matriz correspondiente para cada punto de muestreo; y el tiempo de retención para la solución estándar.	33

Tabla 13: Valores de las concentraciones obtenidas después del reajuste del área obtenida y los valores en el medio de muestreo (disco PUF).....	35
Tabla 14: Variables utilizadas para el cálculo de las concentraciones ambientales (ecuaciones 11 y 12) (Shoeib & Harner, 2002).	36
Tabla 15: Valores de $\log_{K_{O/A}}$, el coeficiente de partición del aire del medio muestreo pasivo (K_{PSM}) el volumen efectivo de aire (V_{AIRE}) (Harner, 2020).....	36
Tabla 16: Valores de las concentraciones ambientales obtenidas durante el muestreo en los cuatro puntos de muestreo.	36
Tabla 17: Contenido referente a la descripción de la fase de cierre de un proyecto o actividad (Elaboración propia a partir del Decreto 40/2013 que Aprueba Reglamento del Sistema De Evaluación de Impacto Ambiental)	42

Índice de figuras

Figura 1: Curva de absorción teórica para un captador de aire pasivo (Bartkow et al., 2005).	5
Figura 2 Sitios con potencial presencia de contaminantes por tipo de actividad productiva a nivel regional, 2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2019).....	13
Figura 3: Estructura molecular de los compuestos objetivos.....	15
Figura 4: Punto de muestreo ubicado en la comuna de Melipilla.....	19
Figura 5: Puntos de muestreo ubicados en la comuna de San Bernardo.	19
Figura 6: fotografía del muestreador pasivo de aire PAS-DD (Imagen propia)	20
Figura 7: Montaje del muestreador pasivo de aire PAS-DD (Documento 5 de “Operaciones estándar del laboratorio”). a) vista lateral, b) vista superior, c) vista inferior, d) captador y gancho en “L”.	21
Figura 8: Fotografía muestreador pasivo instalado en la comuna de Melipilla (Imagen Propia).....	22
Figura 9: Imagen del TurboVap utilizado (Imagen propia).....	23
Figura 10: Curva de calibración para el fenantreno, con la ecuación de la recta y el R^2 correspondiente.	29
Figura 11: Curva de calibración para el fluoranteno, con la ecuación de la recta y el R^2 correspondiente.	29
Figura 12: Cromatogramas de las curvas del fenantreno a concentraciones de 3, 6.5, 8 y 10 ng/ μ L.....	30
Figura 13: Cromatogramas de las curvas del fluoranteno a concentraciones de 3, 6.5, 8 y 10 ng/ μ L.....	30
Figura 14: Cromatogramas de las curvas del benzo (a) pireno a concentraciones de 3, 6.5, 8 y 10 ng/ μ L.....	31

Figura 15: Cromatogramas obtenidos de los cuatro puntos de nuestros, tres ubicados en San Bernardo, y uno en Melipilla, donde (a)Melipilla (Me) (b) Los Viñedos (LV) (c) Los Canelos (LC) y (d) Las Lavandas (LL).....	35
Figura 16: Concentraciones obtenidas para fenantreno y fluoranteno en los sitios de muestreo.....	37
Figura 17: Valores de las concentraciones de fenantreno en ng/m ³ de los estudios internacionales junto con los del presente estudio.	39
Figura 18: Valores de las concentraciones de fluoranteno en ng/m ³ de los estudios internacionales junto con los del presente estudio.	39

Resumen

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos, son compuestos orgánicos semivolátiles, conformados por dos o más anillos aromáticos fusionados que se generan a partir de la incineración de materia orgánica, originándose, por ende, de varias fuentes pirogénicas. En la comuna de San Bernardo, se encuentra ubicado el ex vertedero Lepanto, el cual cesó sus operaciones el año 2002, luego de operar durante 24 años. Actualmente, en este recinto opera un centro de recuperación de biogás, dirigido por la empresa Industrial y Minera Los Esteros de Marga Marga S.A, basado en esto, el objetivo de este estudio es evaluar los niveles de concentración en el aire de tres hidrocarburos aromáticos policíclicos, el fenantreno, fluoranteno y benzo(a)pireno que podrían ser emitidos en esta zona, en tres puntos cercanos al ex vertedero Lepanto y un punto en la comuna de Melipilla, ubicado a 75 km de distancia, el cual fue utilizado como sitio de referencia para el blanco de campo. Para ello se desplegaron captadores pasivos de discos de espuma de poliuretano (PUF) por un periodo de tiempo de dos a tres meses, para luego realizar la extracción de los compuestos de interés mediante extracción soxhlet. El extracto resultante fue fraccionado usando extracción de fase sólida en columnas de silica y concentrando a 200 uL. Los extractos finales fueron analizados en un sistema de cromatografía de gases. Los resultados obtenidos fueron incluidos en las ecuaciones de Shoeib & Harner, 2002 para obtener las concentraciones ambientales. Se obtuvieron porcentajes de recuperación del 89 y 60%. Mientras que las concentraciones ambientales estimadas estuvieron en el rango de 2 y 92 ng/m³, donde las concentraciones más altas fueron encontradas en Melipilla. Finalmente, podemos afirmar que no se cuenta con evidencia para afirmar que el ex vertedero Lepanto es el actual responsable de las emisiones de los compuestos objetivos, ya que, además,

en la comuna de San Bernardo existe un sinfín de industrias que pudieron contribuir a los resultados obtenidos.

Abstract

Polycyclic aromatic hydrocarbons are semi-volatile organic compounds, consisting of two or more fused aromatic rings that are generated from the former Lepanto landfill is located, which ceased operations in 2002, after operating for 24 years is located in the commune of San Bernardo. Currently, a biogas recovery center (Industrial y Minera Los Esteros de Marga Marga S.A) operates on this site, the objective of this study to evaluate the atmospheric concentrations of three polycyclic aromatic hydrocarbons phenanthrene, fluoranthene and benzo(a)pyrene that could be emitted in this area, at three points near the former Lepanto landfill and a point in the commune of Melipilla, 75 km away, which was used as a reference site for the field target. For this, passive samplers with polyurethane foam discs (PUF) were deployed for two to three months, and then the extraction of the compounds of interest was carried out by soxhlet extraction. The resulting extract was fractionated using solid phase extraction in silica columns and concentrating at 200 μ L. The final extracts were analyzed in a gas chromatography system. The results obtained were included in the equations of Shoeib & Harner, 2002 to obtain environmental concentrations. Recovery percentages of 89% and 60% were obtained. While the estimated environmental concentrations were in the range of 2 and 92 ng/m^3 , the highest concentrations were found in Melipilla. Finally, we can conclude that there is no evidence to affirm that the former Lepanto landfill is currently responsible for the emissions of the target compounds, since, in addition, in the commune of San Bernardo there are a wide range of industries that could contribute to the results obtained.

I. Introducción

1.1. Antecedentes generales

La noción de vertederos está dirigida por dos concepciones similares, pero no iguales. Por un lado, se tiene un vertedero incontrolado de residuos y, por otro lado, existe el vertedero sanitario controlado, conocido más bien como relleno sanitario. Este último es definido por el Ministerio de Salud en el Decreto Supremo 189/2005 como una: “instalación de eliminación de residuos sólidos en la cual se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población y daños para el medio ambiente, en la cual las basuras son compactadas en capas al mínimo volumen practicable y son cubiertas diariamente, cumpliendo con las disposiciones del presente reglamento”. En cambio, un vertedero incontrolado de residuos corresponde al vertido de residuos sobre un terreno, sin que exista al menos un recubrimiento del suelo, o compactación de los residuos depositados allí, por lo que no cuenta con las instalaciones adecuadas para evitar daño en el medio ambiente como también para la salud pública, el cual solo debe contar con la autorización sanitaria correspondiente (Munizaga Plaza J., 2009).

La emisión de gases y olores de estos sitios de disposición final son producto de la actividad biológica interactuante con la masa de los residuos sólidos urbanos (RSU), mediante procesos de descomposición anaeróbica y aeróbica, dependiendo de la cantidad de oxígeno disponible (Manheim et al., 2021). La producción de gases producto de esta descomposición se ve alimentada además por el constante aumento de residuos en los rellenos sanitarios, y se puede prolongar hasta veinte años después de que este tipo de disposición haya sido cerrado. Además, la

generación de estos gases, conocido como biogás depende de otros factores, como el tamaño de sólidos, la composición de los desechos (materia orgánica), la humedad (humedad ideal entre un 60%-80%), la temperatura ambiental (30°C-40 °C), pH (7-7,2) y la presencia de algunos metales pesados (Munizaga Plaza J. 2009). El biogás generado se compone principalmente de metano (50-60%), dióxido de carbono (40%) y compuestos orgánicos volátiles (>1%) (Wang et al., 2019). Estos últimos compuestos orgánicos constituidos fundamentalmente por carbono poseen una alta volatilidad y una gran variedad de estructuras y sustituyentes como los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, aldehídos, cetonas, éteres, ácidos y alcoholes (Sánchez Montero, 2009).

1.2. Antecedentes específicos

1.2.1. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Otro tipo de compuestos orgánicos, contaminantes ambientales ubicuos, relevantes de estudiar son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). Los PAHs son compuestos orgánicos semivolátiles conformados por dos o más anillos aromáticos fusionados (Dong & Lee, 2009), provienen tanto de fuentes naturales como antropogénicas, que pueden ser de tipo pirogénicas, es decir, a través de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa; o de tipo petrogénicas, procedentes del petróleo crudo y los productos derivados del petróleo (Wang et al., 2016).

Los PAHs provenientes de fuentes petrogénicas, están generalmente compuestos de tres a cuatro anillos aromáticos, siendo así, compuestos de bajo peso molecular relativo, mientras que los PAHs de fuentes pirogénicas están compuestos de cuatro a seis anillos aromáticos, es decir, son compuestos de mayor peso molecular.

El número y distribución de los anillos que forman los PAHs pueden determinar sus propiedades físicas, tales como volatilidad, solubilidad en agua, capacidad de sorción en matrices orgánicas y velocidad de degradación (Lima et al. 2005). Una vez que se liberan a la atmosfera, el destino ambiental generalmente se distribuye entre la fase gaseosa y la fase absorbida a partículas, dependiendo de las condiciones ambientales. Los compuestos conformados con dos o cuatro anillos aromáticos, tienden a repartirse equitativamente entre las fases gaseosa y particulada, mientras que los PAH conformados por cuatro o seis anillos aromáticos se encontrarán preferentemente en la fase particulada, principalmente en la fracción fina (MP_{2.5}) (Akyüz y Çabuk 2010); por ende, esta partición, dependerá, además, de la cantidad y el tipo de partículas finas presentes en la atmosfera (Lima et al. 2005).

Los PAH liberados, se pueden eliminar mediante deposición seca o húmeda, la primera se genera por la precipitación directa de PAH adsorbidos en partículas de mayor tamaño, por otro lado, la deposición húmeda, resulta de las partículas en fase gaseosa, las cuales se disuelven en las nubes y gotas de lluvias (Lima et al. 2005).

1.2.2. Captadores pasivos de aire

Para capturar los PAHs presentes en la atmosfera (sea en fase gaseosa o adheridos a partículas) se pueden desplegar captadores pasivos de aire (PAS), los cuales consisten en un material sorbente (en este caso disco de espuma de poliuretano (PUF)), que está sujeto en una estructura que lo protege de los factores meteorológicos directos. Los captadores pasivos son *“acumuladores químicos que se pueden utilizar para evaluar concentraciones ambientales en medios homogéneos o heterogéneos en los que se despliegan”* (Shoeib & Harner, 2002). Este tipo de técnica se ha utilizado para capturar una variedad de especies químicas, incluidos

orgánicos volátiles y semivolátiles como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), los bifenilos policlorados (PCB), pesticidas organoclorados (OCP), difeniléteres polibromados (PBDE), etc. (Bartkow et al., 2005; Tuduri et al., 2012).

He et al., 2010 han demostrado la eficiencia de recolección y recuperación de estos compuestos orgánicos usando captadores pasivos. Otros estudios han demostrado la eficacia que tienen estos muestreadores para capturar compuestos orgánicos semivolátiles, por ejemplo, Harner et al., 2013; Pozo et al., 2004, 2006; Shoeib y Harner, 2002, Climent et al, 2019, han estudiado los niveles de concentración para bifenilos policlorados (PCB), plaguicidas de uso actual (CUP), pesticidas organoclorados (OCP), entre otros. Por otro lado, Alani et al. 2021, Motelay-Massiei et al., 2005, Schuster et al.,2015; Harner et al., 2013 han demostrado la eficiencia de este tipo de muestreador para los compuestos aromáticos policíclicos (PAH).

Durante el muestreo pasivo de aire, se capturan compuestos en fase gaseosa y de partículas, la primera se basa en la difusión molecular, mientras que las segundas son capturadas por deposición seca (Tromp et al., 2019). El proceso de acumulación de compuestos en el material receptor (PUF, en este caso) es un equilibrio entre procesos de absorción y eliminación, donde el intercambio químico entre la atmosfera y el material se puede dar en tres etapas (figura 1), la primera corresponde a una absorción lineal, luego le sigue una etapa curvilínea, etapa en la cual la eliminación de los compuestos es más relevante que la absorción, y finalmente la aproximación al equilibrio, la cual dependerá de las características del analito y el material receptor (He et al., 2010). Por lo tanto, en esta última etapa, la tasa de absorción del compuesto objetivo será la misma que la tasa de pérdida (Pozo et al., 2004).

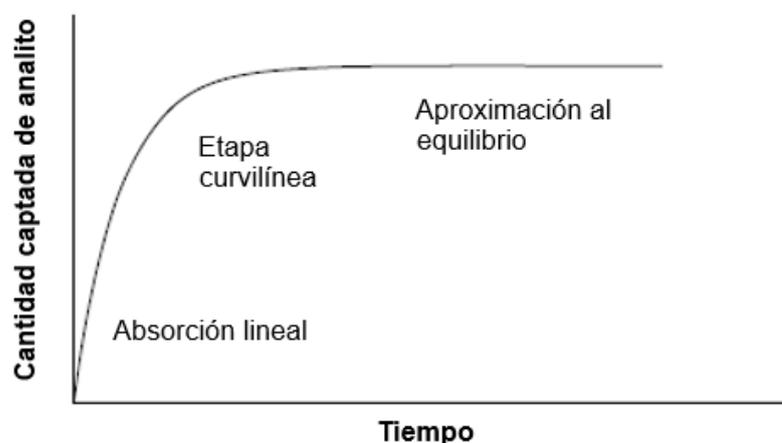


Figura 1: Curva de absorción teórica para un captador de aire pasivo (Bartkow et al., 2005).

La tasa de muestreo depende del coeficiente de transferencia de masa, este parámetro se encuentra directamente ligado a la difusividad molecular, el cual aumenta cuando el tamaño molecular del compuesto objetivo disminuye y a su vez aumenta con la temperatura (He et al., 2010). Por otro lado, la cantidad máxima de producto químico que acumula el disco de espuma de poliuretano (PUF), depende del coeficiente de partición $K_{\text{PUF-aire}}$, para cada compuesto químico, el cual, mientras más bajo sea su valor se acerca más rápido al equilibrio.

1.2.3. Pasivos Ambientales

El ex vertedero Lepanto, operó durante 24 años, finalizando sus operaciones el año 2002. Sin embargo, en el año 2005, la empresa Industrial y Minera Los Esteros de Marga Marga S.A, ingresó al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental el proyecto “Recuperación de biogás vertedero zona sur de Santiago”, cuyo objetivo fue la “captación y destrucción del biogás emanado por el Vertedero Zona Sur de Santiago actualmente en fase no operativa, mediante quema del biogás que actualmente es emitido a la atmósfera” (SEIA, Ficha del Proyecto: Recuperación de biogás vertedero zona sur de Santiago). Después de 20 años sin recibir residuos

sólidos urbanos, cabe preguntar, entonces, si actualmente se siguen produciendo PAHs en el ex vertedero Lepanto, puesto que estos compuestos son sustancias semivolátiles, con características lipofílicas, que pueden generar problemas de salud en la población. Por lo tanto, se espera poder determinar que un vertedero cerrado o abandonado pueda ser considerado como un pasivo ambiental.

El pasivo ambiental posee un factor temporal, esto significa que el daño ambiental se gestó en el pasado, sin embargo, sus efectos siguen latentes en el presente, y lo seguirán en el futuro (Doroni, 2018).

1.2.3.1. Contextualización internacional

Para comenzar a describir qué son los pasivos ambientales, se debe primero contextualizar la gobernanza ambiental en América Latina, el autor De Castro (2015) señala que desde el comienzo del siglo XXI, América Latina ha experimentado un desarrollo profundo que ha cambiado la dinámica de la Gobernanza Ambiental, debido a la economía extractivista, forma en la que se incluyó al sistema mundial, fundamental para el desarrollo económico, social y político, pero que, sin embargo, se encuentra a la vez estrechamente ligado a temas de pobreza, desigualdad y protección del medio ambiente.

Este escenario, ya se señalaba en la Guía Internacional de Aspectos Económicos de Política Ambiental formulada en 1972 por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), señalando que, *“el aprovechamiento de los recursos naturales, al no tener un costo por su utilización o explotación, ha conducido a un creciente deterioro de la calidad del medio ambiente, ya que permanecía ajeno al costo interno de las actividades productivas, por lo que era necesario incorporar estas externalidades”*. Por otro lado, en la Declaración de Río de 1992 se señala en principio precautorio, el cual plantea que *“en caso de riesgo de daños graves e*

irreversibles al medio ambiente o la salud humana, la ausencia de certeza científica absoluta no podrá servir de pretexto para postergar la adopción de medidas efectivas de prevención del deterioro ambiental” (OLACEFS, 2016). Por ende, durante mucho tiempo, América Latina ha estado en presencia de posibles pasivos ambientales generados, a partir de actividades antropogénicas, sin embargo, este concepto no posee una definición única, Carbal et al. (2019) recoge diversas concepciones sobre los pasivos ambientales, las cuales las clasifica en institucionales, académica y normativas.

La primera concepción, confiere el pasivo ambiental como “daños al medio ambiente ocasionados por operaciones industriales o mineras pasadas que constituyen una obligación en el futuro para su remediación, en donde el responsable es difícil de identificar (...)”. En cuanto, a las concepciones académicas, los pasivos ambientales son daños ocasionados al ecosistema, cuyos responsables son las organizaciones empresariales, siendo las encargadas de garantizar la remediación o compensación de dicho daño ambiental. Finalmente, en cuanto a las concepciones normativas, también existe un acercamiento a que es un pasivo ambiental, sin embargo, en América Latina, el concepto se confiere frecuentemente al sector minero, centrándose específicamente a reglamentos respecto al cierre de faenas. En las tablas 1, 2, 3 y 4 se muestran los diferentes estudios en donde se presentan concepciones de pasivos ambientales, definidos incluso en base a dos modelos económicos.

Tabla 1: Concepciones institucionales de pasivos ambientales.

Concepciones institucionales
Cepal (citado por Arango & Olaya, 2012): hace referencia a los impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas con o sin dueño u operador identificables y en donde no se hayan realizado un cierre de minas reglamentario. No se refiere solo a la contaminación, sino se extiende a las practicas negativas en el ambiente al no ser considerado este aspecto, se da paso a una contaminación sin retribución al Estado y certificado por la autoridad correspondiente
OLACEFS (2016): Considerados así aquellos sitios que registran una afectación del agua o del suelo, por la contaminación ocasionada por algún tipo de residuo. El término Pasivos ambientales tiene múltiples definiciones, algunas coincidentes y otras no, no obstante, el concepto tiene un origen contable basado en los costos por las afectaciones ambientales a la sociedad en erogaciones por servicios de salud, remediación, compensación e indemnización.
Comisión europea (2000): el término se aplica a los casos en que el daño es el resultado de accidentes industriales o de la contaminación gradual causada por sustancias peligrosas o desechos que ingresan al medio ambiente proveniente de fuentes identificables. Así, la responsabilidad ambiental tiene como objetivo hacer que el causante del daño ambiental (o el contaminador) pague por remediar el daño que ha causado. Por tanto, la regulación ambiental establece normas y procedimientos para preservar el medio ambiente
UNITED NATIONS (2001): el reconocimiento de pasivos ambientales tiene como objetivo hacer que el agente que causa el daño ambiental (el que contamina) pague por reparar el daño que han causado

Tabla 2: Concepciones académicas de pasivos ambientales.

Concepciones académicas
Russi & Martinez-Alier (2003): la suma de los daños no compensados producidos por una empresa al ambiente a lo largo de su historia, en su actividad normal o en caso de accidente. Son deudas hacia la comunidad donde opera
Martinez-Alier (2012): hace referencia a la deuda ecológica no pagada por la empresa durante todo el tiempo de operación, sumada al gasto necesario para impedir daños una vez terminada las operaciones en el ecosistema
Acosta (2016): conjunto de costos económicos de los impactos sociales y ambientales producto de la extracción de recursos naturales en ecosistemas por parte de empresas del sector industrial
Moreno y Ussa (2008): un costo ambiental causado por la manifestación simple, sinérgica y/o acumulativa de uno o varios impactos ambientales derivado de una actividad específica ligada a un proyecto o una extracción, el cual desencadena externalidades en terceros, diferentes a los receptionadores del beneficio derivado de dicha actividad.
Quintero et al. (2015): los pasivos ambientales pueden entenderse como la cuantificación de los daños causados al ambiente, como consecuencia del uso de recursos naturales por parte de una empresa para el desarrollo de su actividad productiva.

Tabla 3: Concepciones normativas de pasivos ambientales

Concepciones normativas
Ley N°28271 (2004, art.2). Perú: son aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonada o inactiva y que constituye un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad
Ley N°1333. Bolivia: conjunto de impactos negativos perjudiciales para la salud y/o el medio ambiente, ocasionados por determinadas obras y actividades existentes en un determinado periodo de tiempo y los problemas ambientales en general no solucionados por determinadas obras o actividades
Proyecto de Ley N°042 (2014, art.2). Colombia: son considerados pasivos ambientales la obligación de asumir el costo de un deterioro ambiental del suelo, aire, agua y la biodiversidad, que no fue oportuna y/o adecuadamente mitigado, compensando, manejado, corregido o reparado, la cual deberá asumida por el propietario, poseedor o tenedor del sitio donde se encuentre, independiente de cualquier acción civil, sancionatoria o administrativa que el Estado pueda iniciar
Legislación alemana en su Ley de Protección de suelos: 1) las plantas de desechos que no se encuentren en actividades, como también, los terrenos donde se manipula, almacena o descarga desechos. 2) terreno de plantas fuera de actividad y demás terrenos en los cuales se trabajó con productos dañinos para el medio ambiente con excepción de plantas, cuya desactivación se debió a una concesión por necesidad de la ley atómica, debido al cambio dañino que experimentó el suelo o demás peligros individuales o generales
En Chile, según el Anteproyecto de Ley de la Remediación de Pasivos Ambientales Mineros (2005): se entiende por "Pasivo Ambiental Minero aquella faena minera abandonada o paralizada, incluyendo sus residuos, que constituye un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente".

Tabla 4: Definición de pasivos ambientales basados en dos modelos económicos (Montero & Navarro, 2011).

Economía neoclásica	Economía ecológica
Cuya definición proviene de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos: Una obligación legal de incurrir en un gasto en el futuro por actividades realizadas en el presente y en el pasado sobre la manufactura, uso, lanzamiento o amenaza de lanzar, sustancias particulares o actividades que afectan el medio ambiente de manera adversa.	Pasivo ambiental definido como los impactos negativos causados al medio ambiente en forma general, es decir, a la flora y fauna, el aire, el agua, los seres humanos, entre otros.

Existen además una serie de conceptos relevantes relacionados a la problemática de la conceptualización de los pasivos ambientales. Se tiene por ejemplo la "valoración económica" de los pasivos ambientales, en donde, Osorio & Correa (2004), establecen que "*significa poder contar con un indicador de la importancia del medio*

ambiente en el bienestar social, y este indicador debe permitir compararlo con otros componentes del mismo, cuyo propósito es revelar el verdadero costo del uso y escasez de los recursos naturales". Raffo & Mayta (2015), plantean que la valoración económica pretende obtener una medición monetaria, ya sea de ganancia o pérdida, que se experimenta debido a una mejora o daño ambiental, ya sea por el uso de un activo ambiental, realización de una mejora ambiental y generación de un daño ambiental. Por lo tanto, esta valoración pretende ser un patrón de medida, en el cual Rodríguez citado por Zapata (2021), identifica cuatro niveles de costos medioambientales, siendo los costos normales o de explotación, ocultos, intangibles y de responsabilidad, este último, se asocia con los pasivos ambientales, siendo los costos que *"comprenden todas las multas y sanciones aplicadas al no cumplir con la normativa ambiental existente"*.

1.2.3.2. Contextualización nacional

El concepto de daño ambiental es definido en la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, en el Art. 2°, inciso e) como *"toda pérdida, disminución, detrimento o menoscabo significativo inferido al medio ambiente o a uno o más de sus componentes"*. Sin embargo, a quien produce el daño se le confiere una responsabilidad jurídica, que se establece en la misma ley, en sus artículos 51, 52 y 53.

Artículo 51: *"Todo el que culposa o dolosamente cause daño ambiental responderá del mismo en conformidad a la presente ley. No obstante, las normas sobre responsabilidad por daño al medio ambiente contenidas en leyes especiales prevalecerán sobre las de la presente ley. Sin perjuicio de lo anterior, en lo no previsto por esta ley o por leyes especiales, se aplicarán las disposiciones del Título XXXV del Libro IV del Código Civil"*.

Artículo 52: *"Se presume legalmente la responsabilidad del autor del daño ambiental, si existe infracción a las normas de calidad ambiental, a las normas de emisiones, a los planes de prevención o de descontaminación, a las"*

regulaciones especiales para los casos de emergencia ambiental o a las normas sobre protección, preservación o conservación ambientales, establecidas en la presente ley o en otras disposiciones legales o reglamentarias. Con todo, sólo habrá lugar a la indemnización, en este evento, si se acreditare relación de causa a efecto entre la infracción y el daño producido”.

Artículo 53: *“Producido daño ambiental, se concede acción para obtener la reparación del medio ambiente dañado, lo que no obsta al ejercicio de la acción indemnizatoria ordinaria por el directamente afectado. No procederá la acción para obtener la reparación del medio ambiente dañado cuando quien cometió el daño ejecutó satisfactoriamente un plan de reparación aprobado por la Superintendencia del Medio Ambiente”.*

Russi & Martínez-Allier (2003), plantean que *“el grado de responsabilidad jurídica del pasivo ambiental al que las empresas están sujetas depende del sistema legislativo nacional donde se produce el daño”*. Por lo tanto, si bien la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, establece la responsabilidad por daño ambiental, actualmente en el país, no existe un sistema normativo respecto a los pasivos ambientales. De hecho, su definición se encuentra ligada a las actividades mineras, y se encuentra en el proyecto de Ley de Remediación de pasivos ambientales Mineros, la cual enuncia que *“Pasivo Ambiental Minero es aquella faena minera abandonada o paralizada, incluyendo sus residuos, que constituye un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente”* (Infante, 2011). Además, en el Artículo 63, la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, indica que *“la acción ambiental y las acciones civiles emanadas del daño ambiental prescribirán en el plazo de cinco años, contado desde la manifestación evidente del daño”*, por ende, efectivamente existe una carencia en el sistema normativo respecto a los pasivos ambientales, especialmente, debido al factor temporal que poseen.

En la Auditoría Coordinada de Pasivos Ambientales, presentada por la Organización Latinoamericana y del Caribe de Entidades Fiscalizadoras Superiores (OLACEFS)

en 2016, se exponen diferentes tipos de pasivos ambientales según cada Entidad de Fiscalización Superior (EFS) y Entidad Fiscalizadora (EF) participante, donde el tema principal de investigación es la gestión de los residuos sólidos y peligrosos, generados por las actividades económicas, así como con sus efectos en la preservación del ambiente (OLACEFS, 2016). En la tabla 5 se muestran las 9 EFS, junto con dos EF, que participaron en la ACPA.

Tabla 5: Tipos de pasivos ambientales según Entidad de Fiscalización Superior y Entidad Superior participante en la Auditoría Coordinada de Pasivos Ambientales (OLACEFS, 2016).

Entidad de Fiscalización Superior	Tipo de pasivo ambiental
Tribunal Superior de Cuentas de la República de Honduras	Por residuos sólidos y peligrosos
Auditoría Superior de la Federación de México	
Tribunal de Cuentas de la Unión de Brasil	Por residuos sólidos y peligrosos
Contraloría General de la República de Paraguay	
Tribunal de Cuentas de la Provincia de Santa Fe de Argentina	
Contraloría General de la República de Chile	Por residuos mineros
Contraloría General de la República de Colombia	
Contraloría General de la República de Ecuador	
Contraloría General de la República de Perú	
Cámara de Cuentas de la República Dominicana	
Honorable Tribunal de Cuentas de Buenos Aires de Argentina	

En base a esto, podemos afirmar entonces que tanto los residuos sólidos domiciliarios como peligrosos, se consideran pasivos ambientales en países extranjeros.

La presencia de estos sitios de procedimientos de residuos genera un alto impacto en la localidad, según el Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente del 2019, elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) los sitios con potencial presencia de contaminantes se debe a la actividad productiva que posea el país, y como se observa en la figura 2, el riesgo de contaminación por disposición de residuos es latente en todo el país.

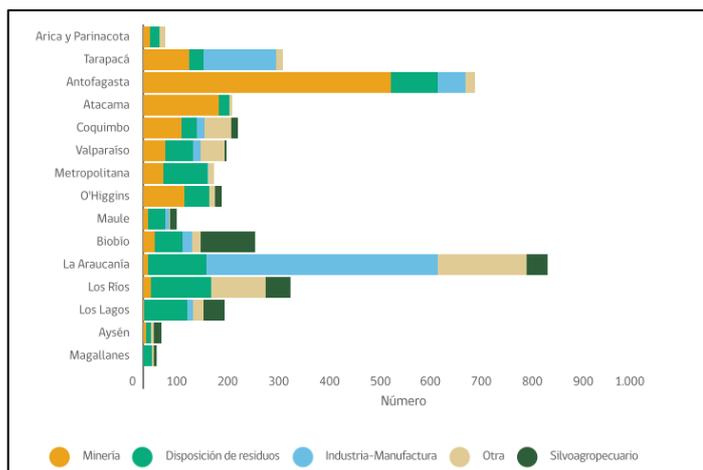


Figura 2 Sitios con potencial presencia de contaminantes por tipo de actividad productiva a nivel regional, 2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2019).

Actualmente, en la Región Metropolitana, según datos del Programa Nacional de Residuos Sólidos de la Subsecretaría De Desarrollo Regional Y Administrativo (SUBDERE), existen cinco sitios de disposición final de residuos (tabla 6).

Tabla 6: Resumen fichas técnicas de 5 sitios de disposición final de residuos en la Región Metropolitana (Ministerio del Medio Ambiente, 2017.).

	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	Relleno Sanitario Santa Marta	Relleno Sanitario Santiago Poniente	Vertedero Controlado de Popeta	Relleno Sanitario Cerro La Leona
Nombre Proyecto	Construcción de Sistema de Tratamiento Intermedio y Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos para la Región Metropolitana.	Relleno Sanitario Santa Marta.	Relleno Sanitario Santiago Poniente.	Vertedero Controlado de Popeta.	Planta de Tratamiento Integral de Residuos Sólidos Cerros la Leona.
Resolución de Calificación Ambiental (RCA)	RCA N° 990/1996, aprobado.	RCA N° 433/01, aprobado.	RCA N° 479/01, aprobado.	-	RCA N° 516/02, aprobado.
Ubicación	Fundo Las Bateas, kilómetro 63.5 de la Ruta 5 Norte, Til Til.	Predio Rústico Santa Elena de Lonquén s/n°, Talagante.	Fundo La Ovejería s/n°, Rinconada Lo Vial, Maipú.	Altos de Popeta s/n Melipilla.	Comuna de Til Til, aproximadamente a 3.5 kilómetros al Oriente de la Carretera Panamericana Norte a la altura del kilómetro 52.
Tipo de Informe	Estudio de Impacto Ambiental	Estudio de Impacto Ambiental	Estudio de Impacto Ambiental	Resolución sanitaria	Estudio de Impacto Ambiental

Como se observa en la tabla 6, el Vertedero Controlado de Popeta, se autorizó mediante una Resolución sanitaria N°34.332/10, en el año 2021 y, recientemente se ingresó al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) el proyecto “Plan de Cierre, Sellado y Reconversión a Relleno Sanitario del Vertedero Popeta, comuna de Melipilla”, el cual actualmente se encuentra en calificación. Por otro lado, el Relleno Sanitario Loma Los Colorados, presenta una RCA aprobada el año 1996, este documento “*establece las condiciones, exigencias o medidas que el titular asociado a un proyecto o actividad deberá cumplir durante su ejecución*” (<https://www.asesoriaambiental.cl/single-post/2018/03/14/resoluci%C3%B3n-de-calificaci%C3%B3n-ambiental-rca>), por lo que considerando la creación del Servicio Evaluación de Impacto Ambiental en el año 1997, es entendible que este proyecto no cuenta con una DIA o EIA, si bien en el “Informe Rellenos Sanitarios”, mencionan que posee un Estudio de Impacto Ambiental, este no se encontró en la página web del Servicio de Evaluación Ambiental.

En este trabajo se pretende buscar evidencia de que los vertederos inactivos (cerrados) son una fuente activa de emisiones de PAHs producidos por la degradación de los residuos sólidos urbanos, transformándose así, en un pasivo ambiental. Para esto, este estudio tendrá como objetivo capturar y analizar las emisiones de tres PAHs: fenantreno, fluoranteno y el benzo(a)pireno en los alrededores del ex vertedero Lepanto, ubicado en la comuna de San Bernardo a pocos metros de las comunidades, cuyas estructuras químicas se aprecian en la siguiente figura 3.

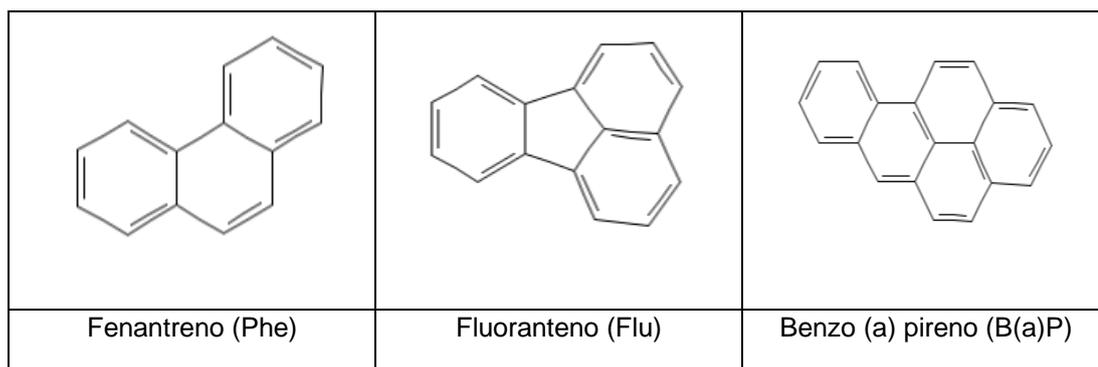


Figura 3: Estructura molecular de los compuestos objetivos

Los resultados obtenidos se compararán con resultados de estudios internacionales, ya que no existe documentación en el país sobre la relación de pasivos ambientales y vertederos cerrados.

1.3. Objetivos

Objetivo general

- Evaluar los niveles de concentración en el aire de 3 hidrocarburos policíclicos aromáticos mediante captadores pasivos PAS-DD y discos PUF en poblaciones cercanas al ex vertedero Lepanto ubicado en la comuna de San Bernardo, Región Metropolitana.

Objetivos específicos

- Detectar tres especies de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs): fenantreno (Phe), fluoranteno (Fla) y benzo(a)pireno (B(a)P), en las concentraciones de aire obtenidas.
- Comparar los niveles de concentración en el aire de los compuestos orgánicos semivolátiles objetivos en las comunas de San Bernardo con las obtenidas en la comuna de Melipilla (sitio de referencia) y con estudios de vertederos extranjeros.

II. Materiales y métodos

1. Limpieza de sustratos previa a la toma de muestras.

Se lavaron seis discos de espuma de poliuretano (PUF) de Tisch Environmental, dos veces, siguiendo los pasos desarrollados en Saavedra 2023, primero se realizó saturando el disco con agua destilada, para luego dejar escurrir y exprimir cuidadosamente, el segundo lavado se realizó con metanol, repitiendo el procedimiento anterior.

Se dejaron secar las esponjas en campana por 10 min aproximadamente, hasta verse secas, para luego insertarlas cuidadosamente en el tubo soxhlet con pinzas.

Antes de insertar las esponjas lavadas, se ambientó el equipo Soxhlet (balón redondo, tubo Soxhlet, condensador), aplicando tres lavados con tres solventes diferentes; hexano, acetona y acetato de etilo, en ese orden respectivamente.

Cada esponja se debe doblar en cuatro, cuidadosamente, e insertar en los tubos soxhlet respectivos, cuya correcta ubicación es en el centro del tubo, para así evitar tapar el sifón con la esponja, y que esta quede correctamente tapada con el solvente, utilizando así, seis condensadores, seis tubos Soxhlet, seis balones redondos, seis mantas calefactoras y 12 mangueras para la refrigeración del sistema.

Luego se agregaron 180 mL de hexano al 98% en los balones redondos para realizar el primer lavado durante 24 h. Una vez verificada la correcta instalación del equipo, se procedió a encender las mantas calefactoras, y se procedió a esperar los tres primeros ciclos, para verificar el correcto funcionamiento del sistema. Este procedimiento se repitió, utilizando en esta segunda ocasión acetona al 99,8% como solvente de limpieza, durante otras 24 h (ambos solventes de Merck). Siguiendo el método de extracción utilizado por Climent et al., 2019 previamente.

Completadas las 48 h de limpieza, se extrajeron los discos PUF del tubo soxhlet y se depositaron en un desecador bajo campana durante 1 hora, posteriormente se

procedió a desmontar el equipo soxhlet, descartando el solvente utilizado, para finalmente lavar y guardar el equipo ocupado, según documento 1 de “Operaciones Estándar del Laboratorio”. Finalmente, las esponjas se guardaron en bolsas individuales de teflón para almacenarlas a una temperatura de -20°C hasta el momento de la instalación de los captadores.

2. Descripción sitios de muestreo e instalación del captador pasivo.

Se seleccionaron cuatro sitios de monitoreo, tres sitios se ubican en las cercanías del ex Vertedero Lepanto (entre 2,5 y 4 km aproximadamente) , comuna de San Bernardo ($33,62^{\circ}\text{ S}$, $70,68^{\circ}\text{ O}$) y el cuarto sitio, se ubica en la Comuna de Melipilla a 75 km aproximadamente del ex vertedero ($33,712^{\circ}\text{ S}$, $71,21^{\circ}\text{ O}$), utilizando este último punto como la línea base de las concentraciones ambientales de los PAH objetivos (véase figura 4 y 5).

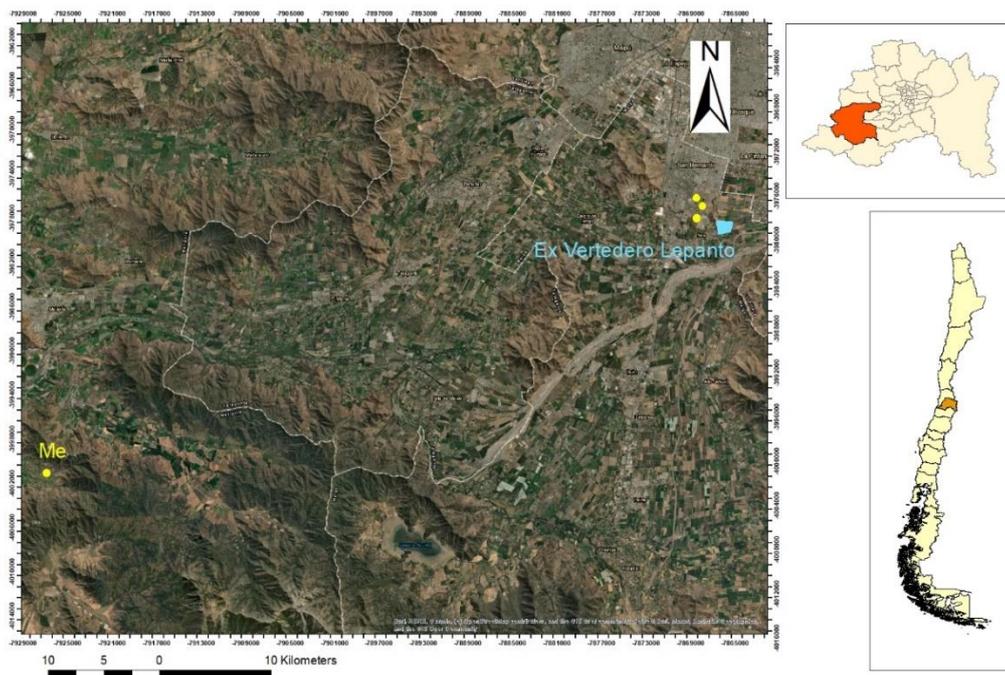


Figura 4: Punto de muestreo ubicado en la comuna de Melipilla.

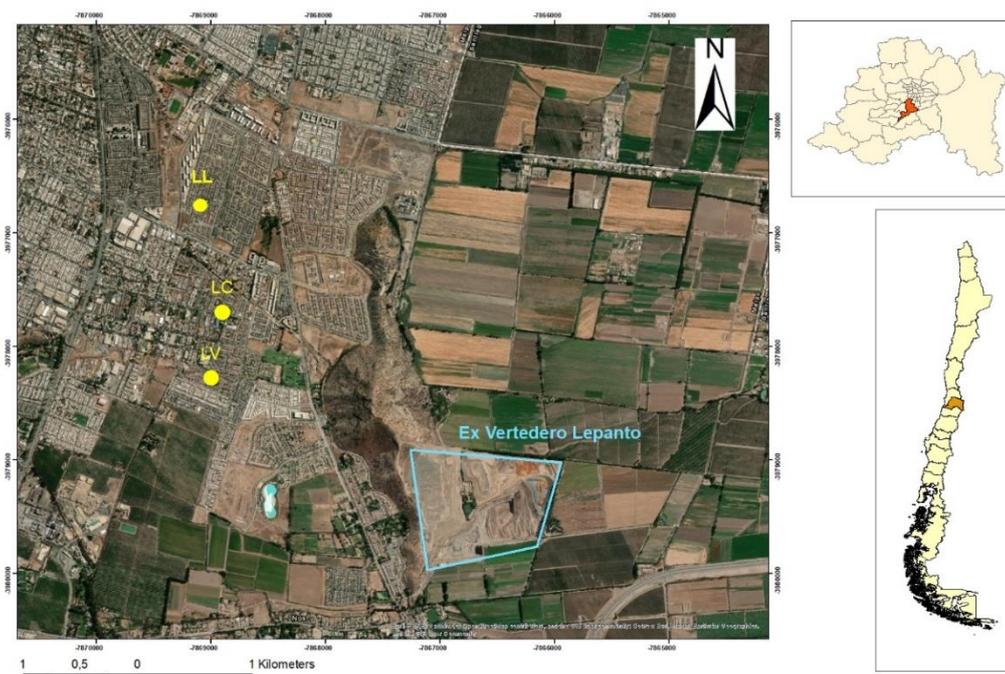


Figura 5: Puntos de muestreo ubicados en la comuna de San Bernardo.

El tipo de captador utilizado para este estudio es el de muestreo pasivo de aire de deposición seca (PAS-DD), cuya placa de cubierta posee un diámetro de 30,5 cm y el disco de espuma de poliuretano (PUF) se encuentra alojado en una placa metálica

plana circular colocada a 2 cm por encima de la placa de cubierta, donde la placa metálica es de 14 cm de diámetro, con un espesor de 1,35 cm (figura 6). La placa de cubierta proporciona protección al disco PUF contra la deposición húmeda y la luz solar directa que aumentan la degradación de los analitos en estudio, mientras que en el disco PUF se capturan los compuestos sujetos a deposición en fase gaseosa y de partículas (Eng et al., 2013).



Figura 6: fotografía del muestreador pasivo de aire PAS-DD (Imagen propia)

Se instaló a una altura mayor a 2 metros sobre el nivel del suelo. Para armar la estructura del captador antes de ubicarlo en su lugar final, se debe conectar el gancho en forma de “L” a la parte superior del disco captador utilizando los dos tornillos disponibles (dos tornillos negros en figura 7d). Luego se debe enganchar el captador pasivo a la estructura de soporte utilizando las abrazaderas plásticas, alambres, o ganchos para evitar que vibre o se mueva con las corrientes de viento, en la figura 7 se observa las vistas lateral, superior, inferior, captador y gancho en “L”, respectivamente.

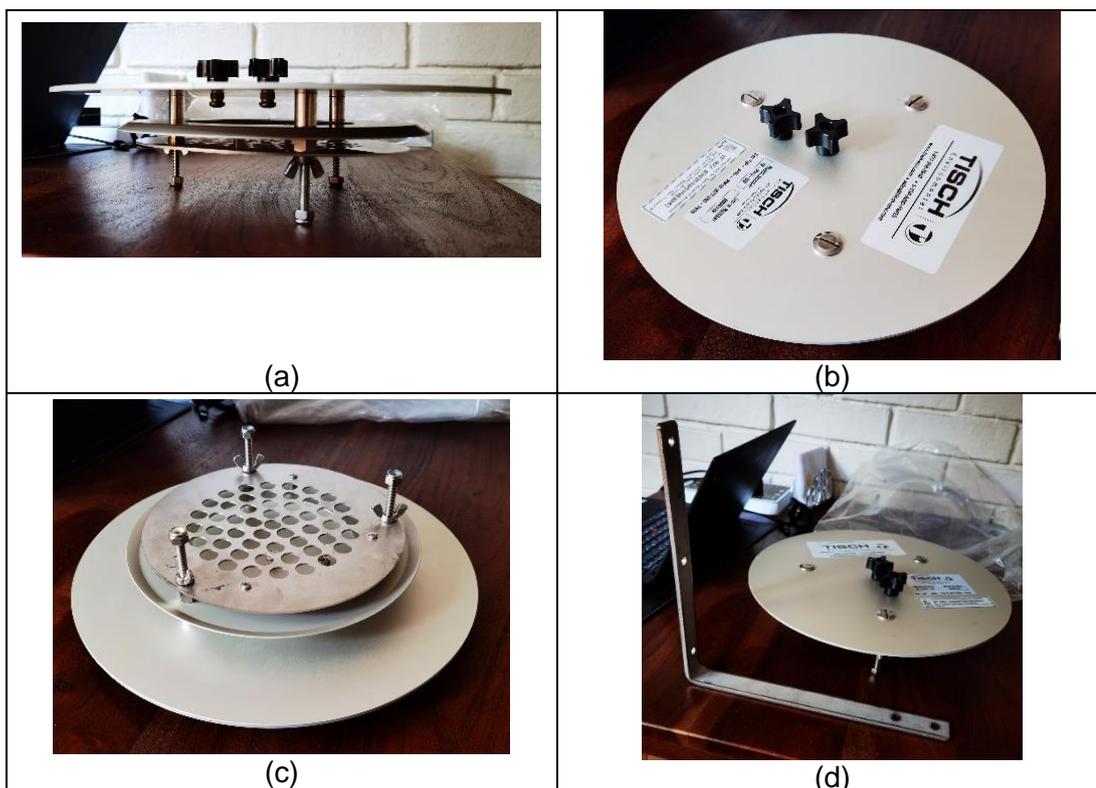


Figura 7: Montaje del muestreador pasivo de aire PAS-DD (Documento 5 de “Operaciones estándar del laboratorio”). a) vista lateral, b) vista superior, c) vista inferior, d) captador y gancho en “L”.

Los discos PUF se acomodan dentro del muestreador (figura 7c), cuyo compartimiento se debe abrir aflojando los tornillos ubicados en la parte inferior (tres tornillos o tuercas en figura 7c). Luego se debe ajustar los tres tornillos en la parte inferior del captador, hasta que toquen los separadores metálicos en forma de tuerca. Las esponjas se dejaron por un tiempo de exposición de tres meses, para luego retirarlos, e insertar dos discos limpios, los cuales se dejaron expuestos por el tiempo de 1 minuto, siendo el objetivo de estos últimos, obtener blancos de campo en la zona aledaña al ex Vertedero Lepanto.



Figura 8: Fotografía muestreador pasivo instalado en la comuna de Melipilla (Imagen Propia)

El muestreo comenzó el 8 de septiembre en los cuatro puntos (Melipilla (Me), Los Viñedos (LV), Los Canelos (LC) y Las Lavandas (LL)) y finalizó el 12 de septiembre, siendo este día, el día de muestreo de los dos blancos de campo en San Bernardo (puntos LL y LV, véase figura 5).

3. Extracción y procesamiento de muestras.

La extracción de hidrocarburos aromáticos policíclicos desde los sustratos utilizados se realizó mediante extracción Soxhlet, realizando el mismo procedimiento que la limpieza de los discos PUF, con la diferencia que el tiempo de reflujo tendrá una duración de 16 h utilizando 180 mL de éter de petróleo al 90%. Luego, se recupera el solvente utilizado y se descarta el disco PUF.

El solvente recuperado, para cada muestra se llevó a concentrar utilizando un TurboVap de Biotage Inc. (figura 9) hasta alcanzar 3 mL para luego filtrar la muestra con filtros de jeringa PVDF-L (diámetro de 13 mm y un tamaño de poro de 0,45 μm), ya que en la muestra obtenida se observó un precipitado, correspondiente a las fibras proveniente de los discos PUF.

El equipo TurboVap se ajustó a una temperatura de baño de 50°C y a un flujo de gas de 2,0 L/min de nitrógeno extra puro.



Figura 9: Imagen del TurboVap utilizado (Imagen propia)

Posteriormente, se llevó a fraccionar la muestra mediante extracción de fase sólida (SPE) en columnas de sílica (10 g, 60 mL) de la marca Supelco en un sistema al vacío, para separar la muestra obtenida en dos fracciones. Esta técnica se basa en que los solutos del solvente que se introduce en esta columna rellena de una fase sólida (sílica) son eluidos con solventes de distinta polaridad, donde por diferencia de equilibrios de los solutos con la fase estacionaria (fase sólida), se favorece la separación de los compuestos a estudiar (Colmsjö, 1998).

Como se mencionó, las eluciones de los compuestos son a distinta polaridad y la columna es de un volumen de 60 mL, por lo que, el orden de elución fue según la polaridad de los eluyentes, obteniendo dos fracciones, las cuales fueron recogidas en frascos ámbar de 60 mL. En la tabla 7 se muestran los volúmenes y eluyentes ocupados.

Tabla 7: Solventes ocupados y volúmenes para eluir en las dos fracciones de elución.

Fracción	Solvente	Volúmen ocupado (mL)
Hex	Hexano (Hex)	60
Hex/AcEt	Hexano (Hex)	30
	Acetato de etilo (AcEt)	30

Para efectos de este estudio, la fracción de interés pertenece a la de Hex/AcEt, siendo esta fracción de 60 mL la que se vuelve a concentrar en el TurboVap hasta llegar a un volumen final de 200 μ L. Este volumen fue guardado en viales ámbar GC con insertos de 250 μ L, y se llevó a refrigerar a una temperatura de 3 °C.

4. Análisis de extracto

Los extractos resultantes del fraccionamiento previo fueron analizados en un cromatógrafo de gases Shimadzu acoplado a un detector de ionización de llama (GC-FID) de modelo GC-2014AFsc, con un inyector automático AOC-20i. La cromatografía se basa en que cuando la muestra pasa por la columna capilar, con fase estacionaria definida, esta empieza a interactuar con los analitos, creando así diferencias en la velocidad y tiempo de transporte, es decir, cada familia de analito saldrá a diferentes tiempos de retención de la columna. Estos analitos llegan al detector que produce una señal como resultado de la combustión de compuestos orgánicos provenientes de la columna en una pequeña llama de mezcla de hidrogeno, nitrógeno y aire, que produce un desprendimiento de iones que es registrado en una placa que los graba cada cierto tiempo, creándose así las señales cromatográficas (Skoog et al., 2008).

La columna utilizada fue InertCap 5 (GL Sciences) de 30 m de largo; 0,25 mm de diámetro y una fase estacionaria de 0,25 μ m de espesor. Otras condiciones como la temperatura del inyector, del detector, fueron 250°C y 300°C, respectivamente; y el programa de temperatura del horno se observa en la tabla 8. Para el análisis el flujo de la columna fue de 1,1 mL/min, y el volumen de inyección fue de 1 μ L de un total de 200 μ l contenido en un vial ámbar GC.

Tabla 8: Programa del horno del GC-FID.

Temperatura (°C)	Tiempo de mantencion (min)	Velocidad (°C/min)
60	1	-
280	10	5

5. Análisis de control y aseguramiento de calidad (QA/QC)

Para el control de calidad, se verificó el tiempo de retención (t_R) para cada PAH, mediante la inyección de estándares individuales provenientes de Cherm Services.

Para este estudio, se prepararon tres estándares: fenantreno, fluoranteno y benzo(a)pireno (compuestos objetivos de este estudio). Para ello, se prepararon soluciones base a partir de los estándares puros obtenidos de Chem Services, los cuales inicialmente poseen una concentración de 100 $\mu\text{g/mL}$ en tolueno.

Cada solución estándar fue preparada en un matraz de aforo de 10 mL, obteniendo así una concentración de cada solución estándar de 10 $\mu\text{g/mL}$ en acetato de etilo. La cual se procedió a guardar en viales ámbar de GC a una temperatura de 3°C para su posterior uso.

Utilizando esta solución base, se construyeron curvas de calibración individuales de intensidad en función de la concentración para cada PAH objetivo, utilizando 4 puntos, cuyas concentraciones se encuentran en el intervalo de 3 ng/mL a 10 ng/mL . Cada PAH se identificó en función del tiempo de retención y se cuantificó mediante una curva de calibración.

Un estándar preparado a concentración 5 ng/mL fue utilizado como estándar de control (con inyecciones semanales) y también para evaluar la repetibilidad instrumental con 7 inyecciones consecutivas.

5.1. Recuperaciones.

Para evaluar la pérdida de compuestos de interés durante el procedimiento de extracción y fraccionamiento de muestras se realizó un análisis en triplicado PUF sin exposición y dopados con 40 μL de la solución base de estándares certificados, lo que representa una concentración esperada de 2 $\text{ng}/\mu\text{L}$ en un volumen de 200 μL en un vial final de análisis.

Este porcentaje de recuperación se evaluó mediante el factor de recuperación (FR), el cual informa la razón de variación porcentual en las áreas de los estándares previo a la extracción (AR) y posterior a la extracción (PE) de los discos PUF fortificados. La ecuación utilizada es la siguiente.

$$(1) FR = \frac{Area_{(PE)}}{Area_{(AR)}} \cdot 100$$

5.2. Límite de detección y cuantificación.

Se definieron los límites de detección de instrumento (IDL), para ello se procedió a utilizar la desviación estándar de los estándares preparados de fenantreno, fluoranteno y benzo (a) pireno, realizando un triplicado de estos. Las ecuaciones utilizadas se observan en las ecuaciones 2 y 3.

$$(2) LD = 3 \cdot SD_{BCS}$$

$$(3) LC = 10 \cdot SD_{BCS}$$

5.3. Efecto matriz del sustrato

El efecto matriz corresponde a cambios en la respuesta instrumental del analito debido a interferencias de otros componentes, el cual provoca un error sistemático proporcional, es decir, dependiente de la concentración de analito en la muestra (Boqué, 2005). En este trabajo el efecto matriz se evaluará con los tiempos de retención, por lo tanto, el efecto matriz se evaluará realizando una diferencia de los tiempos de retención del sustrato combinada con las soluciones estándares menos la solución estándar sin sustrato.

5.4. Estimación de concentración ambiental.

Los discos PUF, corresponden a un medio acumulador (PSM: medio de muestreo pasivo) que tiene una alta capacidad de retención de los analitos objetivo, en otras

palabras, implica la absorción difusa de un vapor químico en un sorbente a lo largo del tiempo, y puede interpretarse en términos de concentraciones volumétricas de aire. La absorción de los compuestos en los discos se encuentra controlada por el lado del aire, por ende, es una función coeficiente de transferencia de masa (MTC) del lado del aire, k_A (Shoeib & Harner, 2002).

La teoría considera que la transferencia de masa a través de la interfaz PSM-aire es la suma de las resistencias en la capa límite del aire y en el PSM. Este medio, además, se considera un compartimento poroso uniforme. La acumulación de productos químicos en el muestreador es equivalente a la tasa de absorción menos la tasa de pérdida, y esta se representa en la ecuación 4 (Shoeib & Harner, 2002).

$$(4) V_{PSM} \left(\frac{dC_{PSM}}{dt} \right) = k_A \cdot A_{PSM} \cdot \left(C_A - \frac{C_{PSM}}{K_{PSM-A}} \right)$$

Donde V_{PSM} corresponde al volumen del medio de muestreo (cm^3), k_A es el coeficiente de transferencia de masa total del lado del aire ($cm s^{-1}$), A_{PSM} es el área de la porción expuesta del muestreador pasivo (cm^2), C_{PSM} es la concentración en el medio de muestreo ($ng m^{-3}$), C_A es la concentración de aire en el volumen de aire muestreado ($ng m^{-3}$).

Como se aprecia en la figura 1, se observa la captación de los analitos, donde, en la zona lineal, el término C_{PSM}/K_{PSM-A} es pequeño, quedando la expresión del volumen del medio de muestreo en función de k_A , A_{psm} y C_A , siendo esta condición la ideal cuando el muestreador se implementan en el campo. En la zona curvilínea, el término C_{PSM}/K_{PSM-A} se vuelve más importante, puesto que en esta etapa la eliminación de los analitos es más relevante que la absorción. Y finalmente, en la zona de aproximación al equilibrio, la pendiente de la curva es 0 y no hay captación neta y C_{PSM} se vuelve constante, esta zona representa el momento de equilibrio entre el muestreador y la concentración ambiental, cuya expresión se observa en la ecuación 5.

$$(5) \frac{C_{PSM}}{V_{Aire}} = C_A$$

De la ecuación 4, se puede obtener una descripción exacta del perfil de absorción, obteniendo una ecuación de velocidad de primer orden.

$$(6) C_{PSM} = K_{PSM-A} \cdot C_A \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{\delta_{Film}} \cdot \frac{k_A}{K_{PSM-A}}\right) t_{dias}} \right)$$

Donde δ_{Film} corresponde al espesor efectivo de captación.

$$(7) \delta_{Film} = \frac{V_{PSM}}{A_{PSM}}$$

Para el cálculo de la concentración ambiental, de la ecuación 5 y 6, se obtienen la concentración ambiental y el volumen de aire efectivo, respectivamente, cuya ecuación se observa a continuación.

$$(8) V_{Aire} = K_{PSM-A} \cdot V_{PSM} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{\delta_{Film}} \cdot \frac{k_A}{K_{PSM-A}}\right) t_{dias}} \right)$$

Finalmente, los valores de la concentración ambiental de los compuestos objetivos se realizaron utilizando como referencia una hoja de cálculo de Harner, 2020

III. Resultados y discusión

1. Análisis de control y aseguramiento de calidad (QA/QC)

1.1. Curvas de calibración

En las figuras 10 y 11 se observan las curvas de calibración del fenantreno y el fluoranteno, respectivamente. Se obtuvieron R^2 superior a 0,998 indicando un buen ajuste lineal del método.

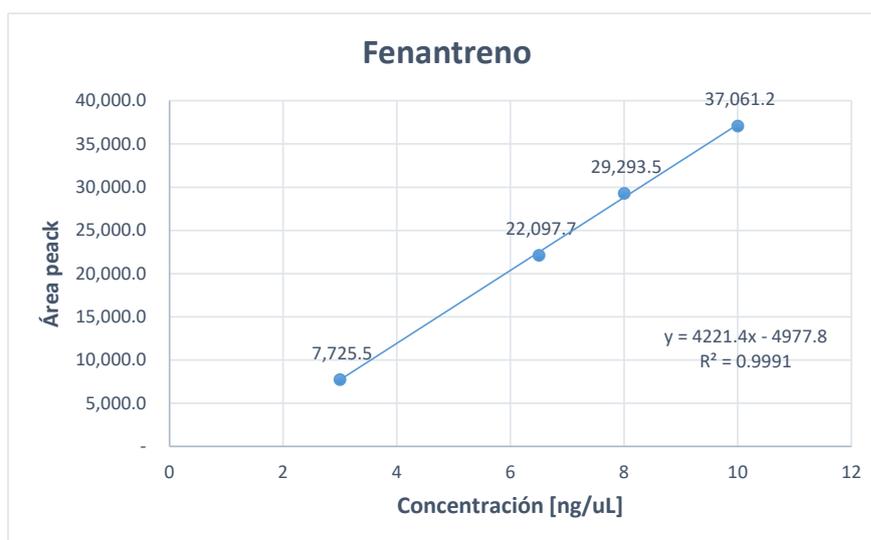


Figura 10: Curva de calibración para el fenantreno, con la ecuación de la recta y el R^2 correspondiente.

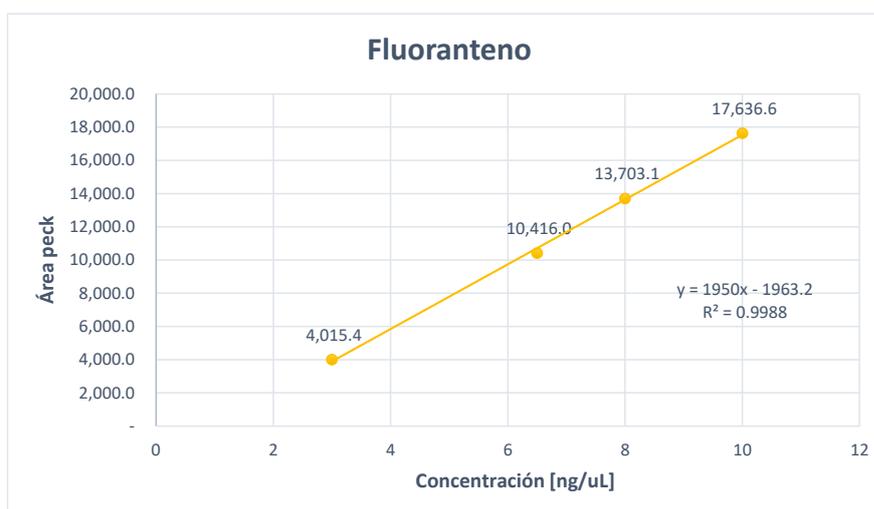


Figura 11: Curva de calibración para el fluoranteno, con la ecuación de la recta y el R^2 correspondiente.

En las figuras 12, 13 y 14 se observan los cromatogramas de los tres compuestos objetivos; el fenantreno, fluoranteno y benzo(a)pireno. En este último, sin embargo,

no se consiguió realizar una curva de calibración, ya que no pudo ser detectado por el GC-FID, y esto se observa más claramente en la figura 14, en donde no existe un incremento de la señal, como lo ocurrido con el fenantreno y fluoranteno, en la cual a medida que aumenta la concentración del estándar inyectado, aumente el área del peak.

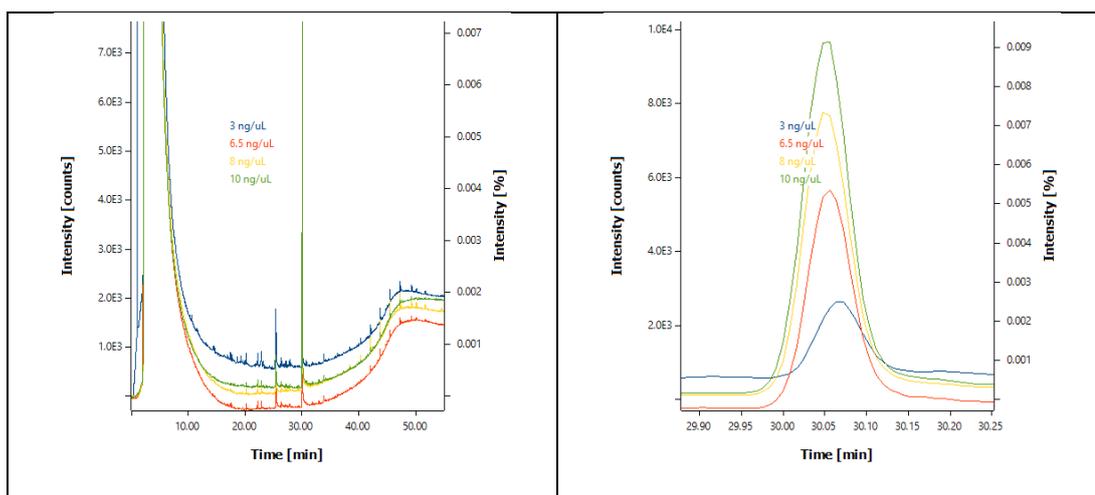


Figura 12: Cromatogramas de las curvas del fenantreno a concentraciones de 3, 6.5, 8 y 10 ng/μL.

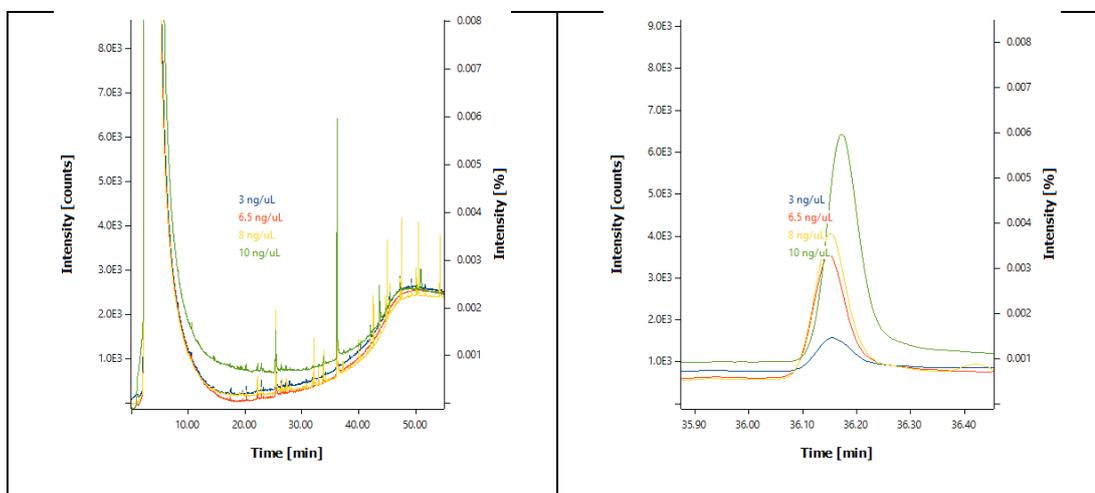


Figura 13: Cromatogramas de las curvas del fluoranteno a concentraciones de 3, 6.5, 8 y 10 ng/μL.

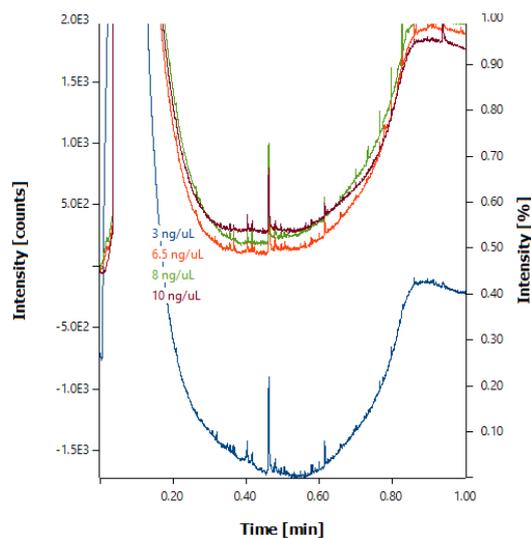


Figura 14: Cromatogramas de las curvas del benzo (a) pireno a concentraciones de 3, 6.5, 8 y 10 ng/μL.

1.2. Evaluación instrumental

Se controló el instrumento mediante inyecciones semanales de estándares de control de concentración 5 ng/μL para evaluar el comportamiento tanto en los tiempos de retención como en las áreas obtenidas del fenantreno (Phe) y (Flu), el benzo (a) pireno, al no tener respuesta positiva en el GC-FID no se consideró en la evaluación instrumental. Como resultado, se obtuvieron valores de dispersión, como promedios, desviación estándar, y desviación estándar relativa que permiten confiar en la respuesta entregada por el equipo. Los valores se observan en la tabla 9.

Tabla 9: Promedios, desviación estándar, y desviación estándar relativa de áreas como de los tiempos de retención obtenidos de inyecciones semanales de control.

Phe		Flu	
Tr [min]	Áreas	Tr [min]	Áreas
30.048	12,121.000	36.176	8,194.200
30.058	14,175.900	36.159	9,183.200
30.956	11,381.500	36.194	12,103.600
Promedios			
30.354	12,559.47	36.176	9827
Desviación Estándar			
0.4257	1182.1894	0.0143	1659.6608
Desviación Estándar Relativa			
0.0140	0.0941	0.0004	0.1689

1.3. Recuperaciones

Se evaluaron las recuperaciones a partir de un triplicado PUF sin exposición, en la cual se obtuvieron recuperaciones del 89% y 60% para el fenantreno y el fluoranteno, respectivamente. En la tabla 10, se observa el promedio de las áreas obtenidas en los triplicados PUF, el área obtenida del estándar puro de 2 ng/ μ L y el promedio del factor de recuperación.

Tabla 10: Promedio de las áreas del triplicado, el área del estándar y el promedio del factor de recuperación.

Analito	Promedio área	Área estándar	Promedio factor de recuperación [%]
Phe	4949.2	5,569.5	89
Flu	2328.3	3,889.3	60

1.4. Límites de detección y cuantificación

Para los límites de detección y cuantificación del instrumento (IDL), se realizaron 3 inyecciones consecutivas a partir del estándar de calibración más baja, de concentración 3 ng/ μ L, cuyos valores de desviaciones estándar para el fenantreno y fluoranteno de 0.006 y 0.005, respectivamente. Los valores se obtuvieron a partir de las ecuaciones 2 y 3, y estos se pueden observar en la tabla 11.

Tabla 11: Límites de detección y cuantificación del instrumento (IDL) para los compuestos objetivos, fenantreno (Phe) y fluoranteno (Flu), respectivamente, los valores se encuentran expresados en ng/m³.

IDL			
Phe		Flu	
LC	LD	LC	LD
0.055	0.017	0.049	0.015

2. Efecto matriz del sustrato

El efecto matriz, como se mencionó en la metodología, fue evaluado mediante la diferencia en los tiempos de retención de la muestra ambiental fortificada menos la

solución estándar, resultando mayor el efecto matriz en el fenantreno. Esto último se aprecia en el cromatograma de la muestra fortificada, ya que el área entregada para el fenantreno en la muestra ambiental coexiste con una otro compuesto desconocido, esto se aprecia en las muestras fortificadas, puesto que en este cromatograma se define mejor el peak del fenantreno.

Los valores de los tiempos de retención y el efecto matriz, junto con los tiempos de retención de la solución estándar sin sustrato (promedio del estándar de control de 5 ng/ μ L), se observan en la tabla 12. Cabe recalcar que las señales fueron corroboradas con adición de estándares auténticos, donde las fortificaciones se realizaron para un blanco de laboratorio y para la muestra ambiental del punto LV.

Tabla 12: Tiempos de retención y el efecto matriz correspondiente para cada punto de muestreo; y el tiempo de retención para la solución estándar.

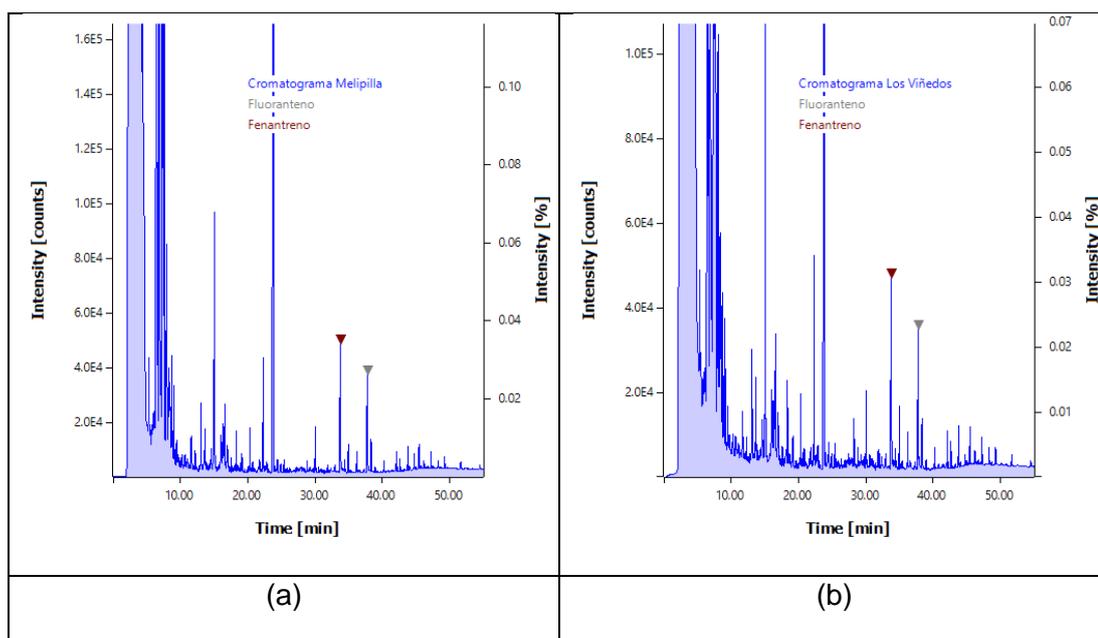
Puntos de muestreo	Tiempo de retención [min]	Tiempo de retención [min]	Efecto Matriz [min]	
	Phe	Flu	Phe	Flu
LV	33.746	37.754	3.392	1.578
LC	33.713	37.724	3.359	1.548
LL	33.692	37.707	3.338	1.531
Me	33.731	37.741	3.377	1.565

	Phe	Flu
Solución estándar sin sustrato	30.354	36.176

3. Concentraciones de PAHs detectadas en los PUFs.

Para la obtención de las concentraciones ambientales, se realizó primero un ajuste, restando las áreas obtenidas por el cromatograma por el promedio de las áreas en blanco, posteriormente, se transformó el valor a ng, multiplicando por el volumen del inserto (200 μ L), luego este valor se multiplico por 2, pues se ocupó la mitad del disco PUF para la extracción de los componentes objetivos, quedando la concentración en el medio de muestreo (disco PUF) en ng/disco.

Cómo se observa en la tabla 13, el valor de fenantreno en el punto de muestreo Las Lavandas (LL), se encuentra como no detectado, mientras que el valor obtenido para el fluoranteno fue bajo, esto se condice con las distancias de los puntos, ya que este es el más alejado a la fuente fija que tenemos por propósito, es decir, el ex vertedero Lepanto. Sin embargo, los valores no son concluyentes para afirmar que efectivamente el ex vertedero sea la fuente de contaminación, pero si son concluyentes, que cerca del punto de Los Viñedos (LV) existen fuentes de contaminación importantes, responsables de la emisión de los PAHs objetivo. A continuación, se observan los cromatogramas obtenidos de los cuatro puntos de muestreo



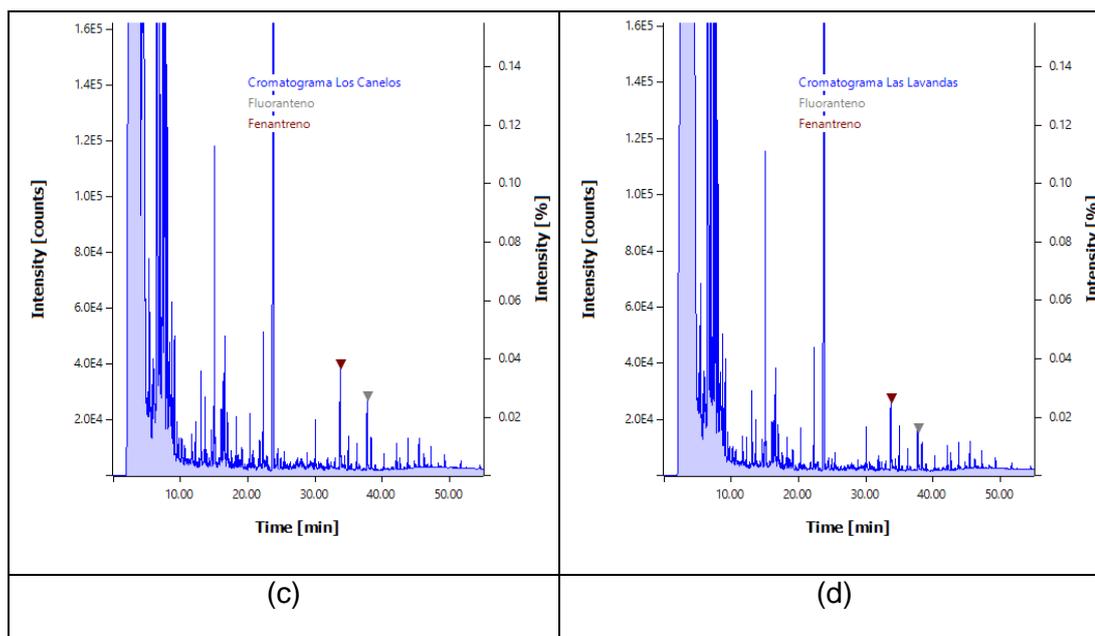


Figura 15: Cromatogramas obtenidos de los cuatro puntos de nuestros, tres ubicados en San Bernardo, y uno en Melipilla, donde (a) Melipilla (Me) (b) Los Viñedos (LV) (c) Los Canelos (LC) y (d) Las Lavandas (LL).

Tabla 13: Valores de las concentraciones obtenidas después del reajuste del área obtenida y los valores en el medio de muestreo (disco PUF).

Punto de muestreo	Analito	Concentración [ng/uL]	C_{PSM} (Concentración en el medio de muestreo) [ng/disco]
LV	Phe	18.778	7511.034
	Flu	53.787	21514.865
LC	Phe	6.442	2576.899
	Flu	28.998	11599.234
LL	Phe	ND	ND
	Flu	1.956	782.393
Me	Phe	38.468	15387.312
	Flu	65.280	26111.809

4. Estimación concentración ambiental

Para el cálculo del volumen efectivo de aire y la concentración ambiental se utilizaron las variables presentadas en las tablas 14 y 15. Los valores obtenidos de concentración ambiental se observan en la tabla 16.

Estos valores se encontraron en la literatura, excepto la temperatura, la cual se tomó un promedio de los días muestreados, mientras que el área del disco PUF, se calculó en base al disco del proveedor Tisch Environmental.

Tabla 14: Variables utilizadas para el cálculo de las concentraciones ambientales (ecuaciones 11 y 12) (Shoeib & Harner, 2002).

Variable	Símbolo	Unidad	Valor
Temperatura	T	°C	8.93
Volumen del medio de muestreo pasivo	V_{PSM}	m^3	2.10.E-04
Espesor efectivo	δ_{Film}	m^2	5.62.E-03
Coefficiente de transferencia de masa total del lado del aire	k_A	m/día	1.02.E+02
Días de muestreo pasivo	T	días	96
Área de la porción expuesta del muestreador pasivo	A_{PSM}	m	0.037
Tasa de muestreo pasivo de aire	R	$m^3/día$	3.8
Densidad		g/m^3	2.10E+04

Tabla 15: Valores de $\log_{K_{O,A}}$, el coeficiente de partición del aire del medio muestreo pasivo (K_{PSM}) el volumen efectivo de aire (V_{AIRE}) (Harner, 2020).

Analito	$\log_{K_{O,A}}$	K_{PSM-A}	$V_{air} (m^3)$
Phe	7.586	9.487.E+05	167.303
Flu	9.099	8.715.E+06	330.741

Tabla 16: Valores de las concentraciones ambientales obtenidas durante el muestreo en los cuatro puntos de muestreo.

Punto de muestreo	Analito	C_A (Concentración ambiental) [ng/m^3]
LV	Phe	44.895
	Flu	65.051
LC	Phe	15.403
	Flu	35.070
LL	Phe	ND
	Flu	2.366
Me	Phe	91.973
	Flu	78.949

Con el valor de nanogramos de PAHs en cada PUF, se procedió a calcular la concentración ambiental, dividiendo este por el volumen efectivo de aire (V_{AIRE}),

obteniendo finalmente la concentración en ng/m^3 . En la figura 16 se observan claramente la diferencia en las concentraciones de los puntos de muestreo .

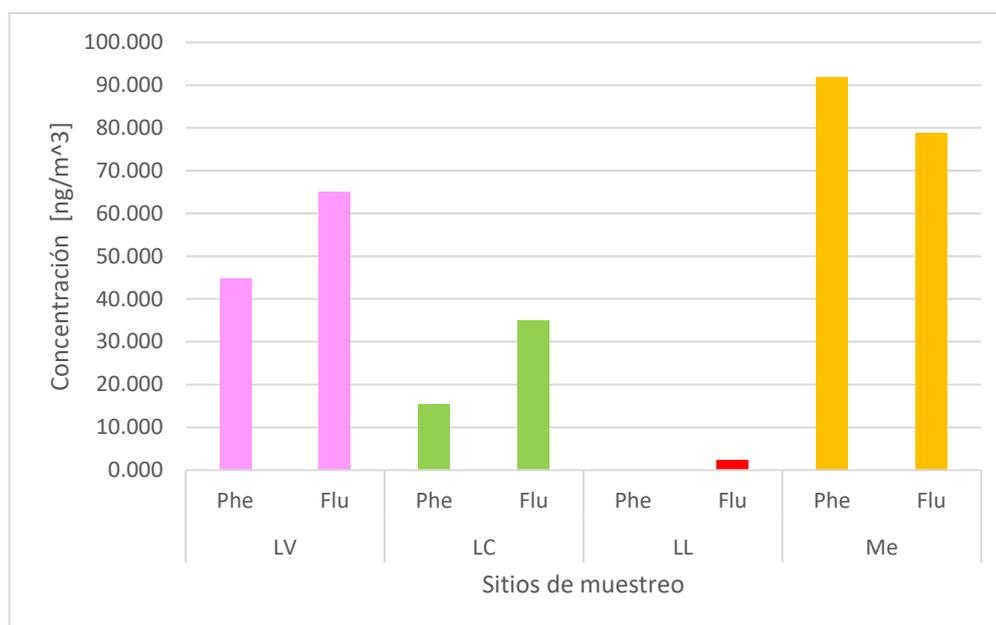


Figura 16: Concentraciones obtenidas para fenantreno y fluoranteno en los sitios de muestreo.

5. Comparación estudios internacionales

En la literatura no se encontró información acerca de emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos en vertederos inactivos, esta información se encontró para los compuestos orgánicos volátiles (COVs), específicamente para los denominados BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), los cuales, si bien son parte de la formación de los PAHS, no son estudios concluyentes ni comparables con los compuestos objetivos. Por lo tanto, la comparación con estudios internacionales se realizará a partir de estudios que reportan emisiones de PAHs cuyo origen corresponden a diferentes fuentes de contaminación.

Alani et al. 2021 reportó emisiones de PAHs en 6 puntos distintos en Lagos, Nigeria, donde un punto de muestreo es cerca de vertedero que sufrió un incendio días

anteriores a los días de muestreo, reportando concentraciones promedio de 11 ± 26 y 4.9 ± 0.69 ng/m³ para fenantreno y fluoranteno respectivamente.

Motelay-Massei et al. 2005, reportó concentraciones PAHs para tres periodos: Julio-Octubre 2000, Noviembre-Marzo 2001 y Abril-Junio 2001. Cabe mencionar, que, los volúmenes efectivos de aire (V_{AIRE}) fueron diferentes a los obtenidos en este trabajo, esta diferencia se debe principalmente por las temperaturas durante el tiempo de muestreo, además de las dimensiones del disco PUF, debido a que variables como el coeficiente de transferencia de masa total del lado del aire (k_A) y el espesor efectivo (δ_{Film}) se calculan utilizando el área del medio de muestreo, es decir, del disco PUF. Los valores reportados van del rango de 0.35-24.3 ng/m³.

En Akyüz y Çabuk, 2010; se reportaron promedios de 106 ± 53.6 y 37.4 ± 18.8 ng/m³ de fenantreno y fluoranteno, respectivamente para el periodo frío en Turquía.

Jaward et al., 2004 reportó emisiones de PAHs en Europa, los rangos de valores para fenantreno y fluoranteno son 0.24-26 y 0.012-13.2 ng/m³, respectivamente.

En Chile, Pozo et al., 2012, muestreo PAHs en Concepción, Región Bío Bío, cuyos sitios de muestreo son una zona rural, Penco(PE); una zona urbana, Concepción centro (CON); y cuatro sitios industriales: Coronel (COR), Masisa (MAS), Indura (IND) y Libertad (LB). Los rangos de valores de concentración fueron de 5-100 ng/m³.

Con los valores reportados de estos 5 autores, tenemos que, en Chile, tanto las entregadas por Pozo et al. 2012, como las de este trabajo superan países como Toronto, Nigeria y Europa, los valores más cercanos son los reportados por Akyüz y Çabuk, 2010. En la figura 17 y 18 se observa claramente las diferencias en las concentraciones de fenantreno y fluoranteno, respectivamente, de los distintos estudios y las obtenidas en este estudio.

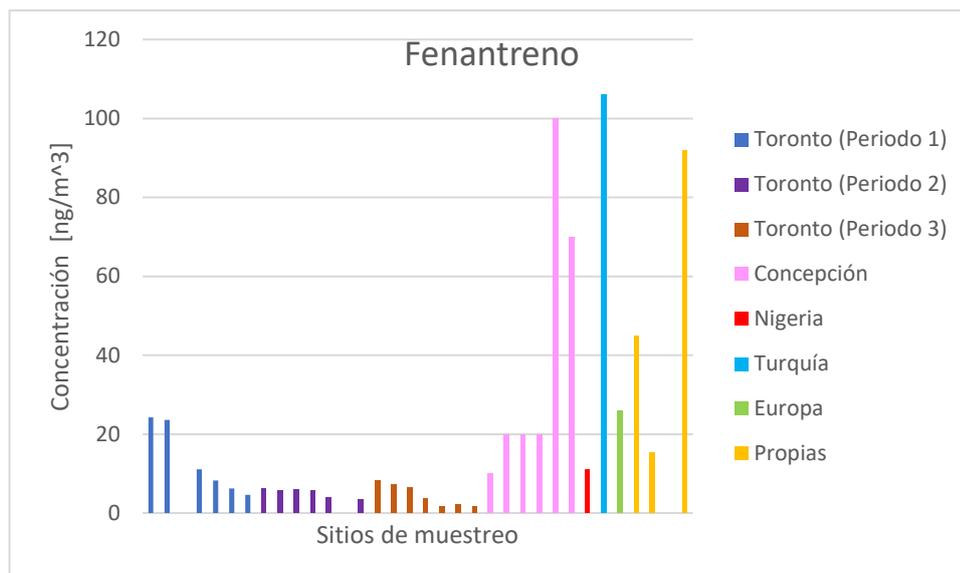


Figura 17: Valores de las concentraciones de fenantreno en ng/m^3 de los estudios internacionales junto con los del presente estudio.

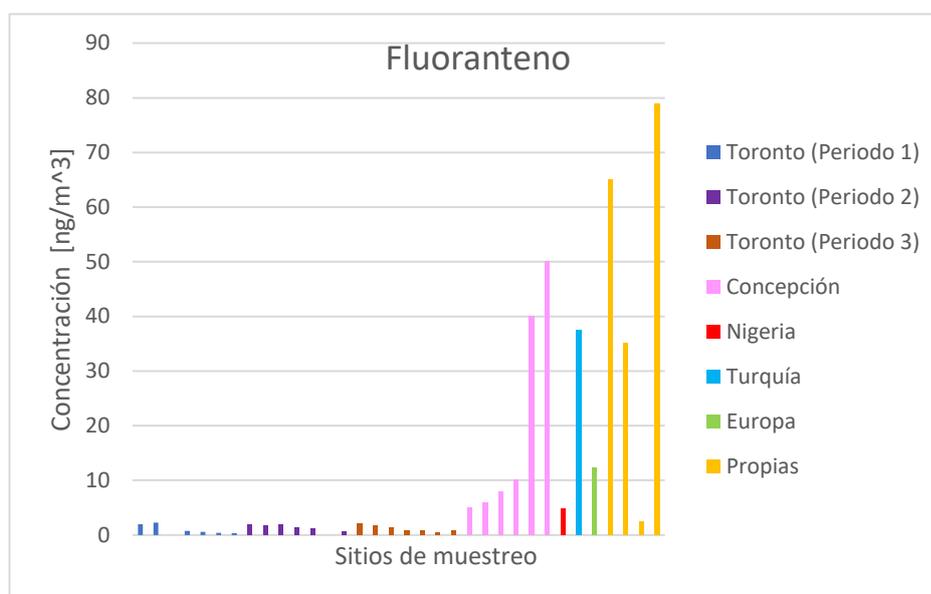


Figura 18: Valores de las concentraciones de fluoranteno en ng/m^3 de los estudios internacionales junto con los del presente estudio.

Cabe mencionar, que las tendencias en las concentraciones de fenantreno y fluoranteno para el estudio de Motelay-Massei et al. 2005 en Toronto, los niveles de concentración fueron mayores para zonas urbanas, disminuyendo en las zonas rurales. Por otro lado, esta tendencia se repitió en el estudio realizado en Concepción de Pozo et al., 2012. Sin embargo, en este estudio, la tendencia fue contraria, es decir, se encontraron niveles de concentración mayores para la zona urbana (San

Bernardo) que en las zona rural (Melipilla), en esta ultima las concentraciones de fenantreno casi duplican los valores entregados por el punto de Los Viñedos (LV), el cual es el punto más cercano al ex vertedero Lepanto, por lo que, se debe investigar más a fondo las fuentes de emisiones de estos compuestos en Melipilla, considerando que esta zona se considera rural, decidiendo que esta sería nuestro blanco de campo. En cuanto al punto LV, también se hace necesario que se investigue las fuentes de emisiones alrededor de esta zona.

Como se mencionó anteriormente, los pasivos ambientales en Chile no poseen un sistema normativo, este concepto se asocia más bien, a los pasivos ambientales mineros, los cuales, si poseen legislaciones en cuanto al cierre de faenas, estos son:

- Ley N° 20.551/2011. Ley que regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras;
- Decreto N°41/2012. Aprueba el Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras y;
- Ley N° 20.819/2015. Modifica la Ley N° 20.551/2011 que regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras

Por lo tanto, no es posible generar una comparación legislativa para los pasivos ambientales provocados por la deposición de residuos y los pasivos ambientales mineros, sin embargo, actualmente se cuenta con instrumentos de gestión, puesto que los rellenos sanitarios en la normativa vigente actual están sujetos al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), el cual contribuye al desarrollo sustentable mediante el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), este último es un “instrumento de gestión ambiental de carácter preventivo para determinar si el proyecto cumple con la legislación ambiental vigente y es el que se hace cargo de los potenciales impactos ambientales significativos” (www.sea.gob.cl), estos instrumentos pueden ser las Declaraciones y Estudios de Impacto Ambiental (DIA y EIA, respectivamente),

donde la diferencia de ambos instrumentos radica en que, “si el proyecto no perjudica alguno de los efectos, características o circunstancias contempladas en el Artículo 11 de la Ley sobre bases generales del medio ambiente 19.300”, deberá presentar un DIA, en caso contrario deberá presentar un EIA. Estos instrumentos son regidos mediante el Decreto N°40/2013, que Aprueba Reglamento del Sistema De Evaluación de Impacto Ambiental, de este reglamento se obtienen una serie de herramientas útiles para formar una comparación con la legislación relacionada al cierre de faenas mineras.

Para ello, se debe considerar que el pasivo ambiental generará un impacto ambiental, el cual es definido en el Decreto 40/2013, en su Artículo 2, letra e) como “alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada. Los impactos ambientales serán significativos cuando generen o presenten alguno de los efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley, conforme a lo establecido en el Título II de este Reglamento” (en este caso, “Ley” hace referencia a la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente). Sin embargo, surge otro concepto confuso, que se entiende por “significativo”, este se menciona en el Artículo 6 del Decreto 40/2013, el cual plantea que:

“Se entenderá que el proyecto o actividad genera un efecto adverso significativo sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire si, como consecuencia de la extracción de estos recursos (...) se afecta la permanencia del recurso, asociada a su disponibilidad, utilización y aprovechamiento racional futuro; se altera la capacidad de regeneración o renovación del recurso; o bien, se alteran las condiciones que hacen posible la presencia y desarrollo de las especies y ecosistemas. (...). La evaluación de los efectos sobre los recursos naturales renovables deberá considerar la capacidad de dilución, dispersión, autodepuración, asimilación y regeneración de dichos recursos en el área de influencia del proyecto o actividad, así como los efectos que genere la combinación y/o interacción conocida de los contaminantes del proyecto o actividad”.

Por otro lado, dentro del mismo decreto, se encuentran presentes en sus Artículos 18 y 19 (véase tabla 17), los contenidos mínimos de los Estudios y Declaraciones de

Impacto Ambiental, respectivamente, relacionados con la descripción de la fase de cierre de la actividad o proyecto.

Tabla 17: Contenido referente a la descripción de la fase de cierre de un proyecto o actividad (Elaboración propia a partir del Decreto 40/2013 que Aprueba Reglamento del Sistema De Evaluación de Impacto Ambiental)

Artículo 18, inciso c.7	Artículo 19, inciso a.7
<p>La descripción de la fase de cierre, si la hubiere, indicando las partes, obras y acciones asociadas a esta fase. En caso de corresponder, deberá describir las actividades, obras y acciones para: Desmantelar o asegurar la estabilidad de la infraestructura utilizada por el proyecto o actividad; Restaurar la geoforma o morfología, vegetación y cualquier otro componente ambiental que haya sido afectado durante la ejecución del proyecto o actividad; Prevenir futuras emisiones desde la ubicación del proyecto o actividad, para evitar la afectación del ecosistema incluido el aire, suelo y agua; y La mantención, conservación y supervisión que sean necesarias. Para efectos de lo señalado en los literales precedentes, las acciones y obras se deberán describir en consideración a la posibilidad de generar o presentar los efectos, características o circunstancias establecidos en el artículo 11 de la Ley y en concordancia con lo requerido en la letra g) de este artículo.</p>	<p>La descripción de la fase de cierre, si la hubiere, indicando las partes, obras y acciones asociadas a esta fase. En caso de corresponder, deberá describir las actividades, obras y acciones para: Desmantelar o asegurar la estabilidad de la infraestructura utilizada por el proyecto o actividad; Restaurar la geoforma o morfología, vegetación y cualquier otro componente ambiental que haya sido afectado durante la ejecución del proyecto o actividad; Prevenir futuras emisiones desde la ubicación del proyecto o actividad, para evitar la afectación del ecosistema incluido el aire, suelo y agua; y La mantención, conservación y supervisión que sean necesarias</p>

Según la literatura, el fenantreno y fluoranteno son marcadores de fuentes pirogénicas (Lorenzi et al., 2011), es decir, de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa. Siendo más específicos, el fluoranteno fenantreno son marcadores de fuente diésel (Alani et al., 2021; Ravindra et al., 2008), se asocia también a la combustión de petróleo (Ravindra, 2008), por otro lado, para el fenantreno se sugiere que proviene en gran cantidad en las emisiones de la industria siderúrgica (Ravinda et al., 2008). Además, ambos compuestos por su característica semivolátil, se absorben en las partículas salinas.

Por lo tanto, las fuentes de origen del fenantreno y fluoranteno depositados en la esponja durante el tiempo de campaña (96 días) considerando además la

localización de los muestreadores PASS-DD, podrían ser fijas y/o móviles, puesto que tanto en Los Viñedos (LV) como en Los Canelos (LC) estos estaban orientados a la calle, la cual era de tránsito vehicular ligero, mientras que el muestreador ubicado en Las Lavandas (LL) se ubicaba en el patio interior de un domicilio, el cual estaba a la vez dentro de un condominio con poco tránsito vehicular. Por otro lado, el muestreador ubicado en Melipilla (Me), el cual, fue nuestro punto para el blanco de campo, arrojó los valores más altos de concentración ambiental, concluyendo preliminarmente, no es una ubicación para considerar a futuro como blanco de campo, ya que se esperaban concentraciones menores que los puntos ubicados en la comuna de San Bernardo.

IV. Conclusiones

Del objetivo general y el primer objetivo específico planteado, se puede concluir que a partir del método de extracción soxhlet, si es efectiva la recuperación de los compuestos objetivos y posterior evaluación de los niveles de concentraciones de estos, excepto del benzo (a) pireno.

Por otro lado, falta aún estudios que midan PAHs en vertederos inactivos, y por sobre todo de activos, puesto que en la literatura se encontró solo información acerca de incinerados de basura, y emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs), y emisiones de PAHs, pero de fuentes de contaminación diferente a la planteada como objetivo. Por lo que, la comparación solo se relevó a comparar que tan altas fueron las concentraciones estimadas en nuestro estudio con otros países.

Finalmente, al no obtener datos en la literatura, no podemos afirmar que el ex vertedero Lepanto sea totalmente responsable de las emisiones de fenantreno y fluoranteno, ya que, como se mencionó, existen diferentes fuentes de contaminación para estos compuestos, y dependiendo de las condiciones ambientales, es si se favorece el transporte de estas, por lo que los niveles de concentración para los compuestos objetivos pueden deberse también a fuentes móviles de contaminación. Por lo tanto, no se puede concluir que el ex vertedero Lepanto sea considerado un pasivo ambiental, debido a la falta de evidencia en la literatura y estudios realizados en estos sitios de disposición de residuos.

Para concluir, se recomienda estudiar las zonas de Melipilla y San Bernardo, y las fuentes de contaminación alrededor los sitios de estudio, debido a los altos valores encontrados para los compuestos objetivos. Por otro lado, la temperatura promedio para el cálculo de las concentraciones ambientales se obtuvo de un promedio de tres estaciones de la red SINCA, siendo estas Talagante, El Bosque y La Pintana, puesto que en las comunas de Melipilla y San Bernardo no poseen una red meteorológica ni

de calidad ambiental, por lo que sería recomendable que en un futuro cercano se plantee esta problemática, y así tener parámetros meteorológicos representativos de la zona, además de que estos, como se mencionó anteriormente influyen notoriamente en el comportamiento de los PAHs, como de otros contaminantes, de esta forma, para estudios posteriores en la zona, se podría ser más efectivo al momento de definir y concluir fuentes de contaminantes y niveles de concentración de contaminantes atmosféricos en la zona.

V. Bibliografía

- Akyüz, M., & Çabuk, H. (2010). Gas-particle partitioning and seasonal variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of Zonguldak, Turkey. *Science of the total environment*, 408(22), 5550-5558.
- Alani, R., Zhao, S., Liu, X., Akinrinade, O., Agunbiade, F., Ayejuyo, O., & Zhang, G. (2021). Concentrations, profiles and exposure risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in passive air samples from Lagos, Nigeria. *Atmospheric Pollution Research*, 12(9), 101162
- Bartkow, M. E., Booij, K., Kennedy, K. E., Müller, J. F., & Hawker, D. W. (2005). Passive air sampling theory for semivolatile organic compounds. *Chemosphere*, 60(2), 170-176.
- Boqué, R. (2005). La selectividad en análisis químico. *Técnicas de Laboratorio*, 299, 878-881.
- Carbal Herrera, A. E., Rosales García, C., Hernández Vilorio, A., & Martínez Gómez, L. (2019). Una aproximación conceptual al termino pasivos ambientales: una propuesta para su puesta en práctica.
- Chile. Ministerio de Minería. 2011. Ley 20.551: Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras, octubre 2011. 32 p. <https://bcn.cl/2eu2d>
- Chile. Ministerio de Minería. 2015. Ley 20.819: Modifica la ley nº 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras e introduce otras modificaciones legales, marzo 2015. 3 p. <https://bcn.cl/2epaj>
- Chile. Ministerio del Medio. 2012 Ambiente. Decreto 40: Aprueba reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, octubre 2012. 126 p. <http://bcn.cl/2ep4b>
- Chile. Ministerio Secretaria General De La Presidencia. 1994. Ley 19.300: Aprueba Ley sobre bases generales del medio ambiente, 9 marzo 1995. 48p. <http://bcn.cl/2dxy7>
- Chile. Ministerio de Minería. 2012. Decreto 41: Aprueba reglamento de la ley de cierre de faenas e instalaciones mineras, septiembre 2012. 42 p. <https://bcn.cl/2epi3>
- Climent, M. J., Coscollà, C., López, A., Barra, R., & Urrutia, R. (2019). Legacy and current-use pesticides (CUPs) in the atmosphere of a rural area in central Chile, using passive air samplers. *Science of The Total Environment*, 662, 646-654.
- Colmsjö, A. (1998). Concentration and extraction of PAHS from environmental samples. En: Neilson, A. H., & Hutzinger, O. (Eds.). (1997). In PAHs and Related Compounds: chemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, 55-76.
- De Castro, F., Hogenboom, B., & Baud, M. (Eds.) (2015). *Gobernanza ambiental en América Latina*. CLACSO. http://www.cedla.uva.nl/50_publications/other.html

- Decreto Supremo 189 de 2005 (Ministerio de Salud; Subsecretaría de Salud Pública). Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios. 5 de enero de 2008.
- Departamento de Química, Laboratorio de Química Ambiental, Universidad de Chile. Documento 5 de "Operaciones estándar del laboratorio", 2022.
- Dong TTT, Lee BK (2009) Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea. *Chemosphere* 74:1245–1253.
- Doroni, G. (2018). Pasivos ambientales: un problema [inter-intra] generacional. *Prometeica - Revista De Filosofía Y Ciencias*, (18), 47–58.
- Eng, A., Harner, T., & Pozo, K. (2013). A prototype passive air sampler for measuring dry deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(1), 77-81.
- Harner, T. Template for calculating PUF and SIP disk sample air volumes, Version 2, April 6, 2020.
- Harner, T., Su, K., Genualdi, S., Karpowicz, J., Ahrens, L., Mihele, C., ... & Narayan, J. (2013). Calibration and application of PUF disk passive air samplers for tracking polycyclic aromatic compounds (PACs). *Atmospheric Environment*, 75, 123-128.
- He, J., & Balasubramanian, R. (2010). A comparative evaluation of passive and active samplers for measurements of gaseous semi-volatile organic compounds in the tropical atmosphere. *Atmospheric Environment*, 44(7), 884-891.
- Infante, C. (2011). Pasivos ambientales mineros: barriendo bajo la alfombra. Lima: Observatorio Conflictos Mineros América Latina.
- Jaward, F. M., Farrar, N. J., Harner, T., Sweetman, A. J., & Jones, K. C. (2004). Passive air sampling of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated naphthalenes across Europe. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 23(6), 1355-1364.
- Lima, A. L. C., Farrington, J. W., & Reddy, C. M. (2005). Combustion-derived polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment—a review. *Environmental forensics*, 6(2), 109-131.
- Lorenzi D, Entwistle JA, Cave M, Dean JR (2011) Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust: implications for human health. *Chemosphere* 83:970–977.
- Manheim, D. C., Yeşiller, N., & Hanson, J. L. (2021). Gas Emissions from Municipal Solid Waste Landfills: A Comprehensive Review and Analysis of Global Data. *Journal of the Indian Institute of Science*, 1-33.
- Ministerio del Medio Ambiente. 2017. Informe Rellenos Sanitarios, Residuos Sólidos Urbanos en La RM. Área Residuos y Riesgo Ambiental-Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente. 21 p.

- Ministerio Del Medio Ambiente. 2019. Quinto Reporte del Medio Ambiente.
- Montero, F. E. R., & Navarro, V. P. Y. (2019). Análisis a las Problemáticas Asociadas a los Pasivos Ambientales. *Gerencia Libre*, 5, 103-115.
- Motelay-Massei, A., Harner, T., Shoeib, M., Diamond, M., Stern, G., & Rosenberg, B. (2005). Using passive air samplers to assess urban– rural trends for persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons. 2. Seasonal trends for PAHs, PCBs, and organochlorine pesticides. *Environmental science & technology*, 39(15), 5763-5773.
- Munizaga J. 2009. Prefactibilidad técnica de un vertedero controlado de alta densidad para la ciudad de Antofagasta. Chile, Universidad Internacional de Andalucía. 228 p.
- Navazo, M., Durana, N., Alonso, L., García, J. A., Ilardia, J. L., Gómez, M. C., & Gangoiti, G. Caracterización De Compuestos Orgánicos Volátiles Atmosféricos En Áreas Industriales, Urbanas Y Rurales De La Cav 1995-2003. Escuela de Ingenieros de Bilbao. Universidad del País Vasco. C/Alameda de Urquijo s/n. E-48013 Bilbao, España, 1-2.
- OLACEFS (2016). Auditoría Coordinada de Pasivos Ambientales. Informe regional. Organización Latinoamericana y del Caribe de Entidades Fiscalizadoras Superiores. <https://www.olacefs.com/wp-content/uploads/2016/10/02-Informe-Regional-ACPA-11oct16.pdf>.
- Osorio Múnera, J., y Correa Restrepo, F. (2004). Valoración Económica De Costos Ambientales: Marco Conceptual y Métodos De Estimación. *Semestre Económico*, 7 (13), 159-193.
- Pozo, K., Harner, T., Rudolph, A., Oyola, G., Estellano, V. H., Ahumada-Rudolph, R., ... & Focardi, S. (2012). Survey of persistent organic pollutants (POPs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the atmosphere of rural, urban and industrial areas of Concepcion, Chile, using passive air samplers. *Atmospheric Pollution Research*, 3(4), 426-434.
- Pozo, K., Harner, T., Shoeib, M., Urrutia, R., Barra, R., Parra, O., & Focardi, S. (2004). Passive-sampler derived air concentrations of persistent organic pollutants on a North– South transect in Chile. *Environmental science & technology*, 38(24), 6529-6537.
- Pozo, K., Harner, T., Wania, F., Muir, D. C., Jones, K. C., & Barrie, L. A. (2006). Toward a global network for persistent organic pollutants in air: results from the GAPS study. *Environmental Science & Technology*, 40(16), 4867-4873.
- Raffo Lecca, E., y Mayta Huatuco, R. (2015). Valoración económica ambiental: el problema del costo.
- Ravindra, K., Sokhi, R., & Van Grieken, R. (2008). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation. *Atmospheric environment*, 42(13), 2895-2921.

- Russi, D., & Martínez-Allier, J. (2003). Los pasivos ambientales. *Íconos-Revista de Ciencias Sociales*, (15), 123-133.
- Saavedra, R. Análisis de la concentración y distribución de Compuestos Aromáticos Policíclicos (PACs) en la Región Metropolitana usando captadores pasivos. 2023
- Sánchez Montero, J. M. (2009). *Compuestos orgánicos volátiles en el medio ambiente. Monografías de la Real Academia Nacional de Farmacia.*
- Schuster, J. K., Harner, T., Su, K., Mihele, C., & Eng, A. (2015). First results from the oil sands passive air monitoring network for polycyclic aromatic compounds. *Environmental science & technology*, 49(5), 2991-2998.
- SEIA, Ficha del Proyecto: Recuperación de biogás vertedero zona sur de Santiago, https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=670671 , 25 marzo 2022.
- Shoeib, M., & Harner, T. (2002). Characterization and comparison of three passive air samplers for persistent organic pollutants. *Environmental science & technology*, 36(19), 4142-4151.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Nieman, T. A. (2008). *Principios de análisis instrumental*, 20-21
- Tromp, P. C., Beeltje, H., Okeme, J. O., Vermeulen, R., Pronk, A., & Diamond, M. L. (2019). Calibration of polydimethylsiloxane and polyurethane foam passive air samplers for measuring semi volatile organic compounds using a novel exposure chamber design. *Chemosphere*, 227, 435-443.
- Tuduri, L., Millet, M., Briand, O., & Montury, M. (2012). Passive air sampling of semi-volatile organic compounds. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 31, 38-49.
- Wang, L., Wang, L., Tao, W., Smardon, R. C., Shi, X., & Lu, X. (2016). Characteristics, sources, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban surface dust: a case study of the city of Xi'an in Northwest China. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(13), 13389-13402.
- Wang, Q., Zuo, X., Xia, M., Xie, H., He, F., Shen, S., ... & Zhu, L. (2019). Field investigation of temporal variation of volatile organic compounds at a landfill in Hangzhou, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(18), 18162-18180.
- Wang, Q., Zuo, X., Xia, M., Xie, H., He, F., Shen, S., ... & Zhu, L. (2019). Field investigation of temporal variation of volatile organic compounds at a landfill in Hangzhou, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(18), 18162-18180.
- Wania, F., & Shunthirasingham, C. (2020). Passive air sampling for semi-volatile organic chemicals. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(10), 1925-2002.

Zapata, R. E. (2021). Pasivos ambientales y métodos de valoración económica. *Infometric@-Serie Sociales y Humanas*, 4(2). Recuperado a partir de <http://www.infometrica.org/index.php/ssh/article/view/166>.