



Universidad de Concepción



**FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES**

**PRESENCIA DE METALES PESADOS EN LA PENÍNSULA ANTÁRTICA POR
ACCIÓN ANTRÓPICA**

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

Paula Petit-Breuilh Padilla

CONCEPCIÓN (Chile), 2023



Universidad de Concepción



**FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES**

PRESENCIA DE METALES PESADOS EN LA PENÍNSULA ANTÁRTICA POR ACCIÓN ANTRÓPICA

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

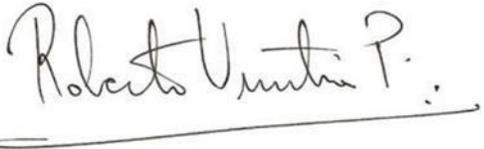
Alumno: Paula Petit-Breuilh Padilla

Profesor Guía: Dr. Roberto Urrutia Pérez

CONCEPCIÓN (Chile), 2023

“Presencia de metales pesados en la península antártica por acción antrópica”

Profesor Guía: Dr. Roberto Urrutia Pérez



Profesor Comisión Dr. Alberto Araneda Castillo



Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo Arias



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad: (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, diciembre 2023

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
- Hipótesis.....	4
- Objetivo General:	4
- Objetivos Específicos:	4
2. ANTECEDENTES	5
2.1. Definición de Metales Pesados	5
2.1.1. Bioacumulación y Biomagnificación de metales pesados.....	6
2.2. Factores de causalidad de metales pesados en la Península Fildes ..	6
2.2.1. Fuentes Antrópicas.....	7
2.2.2. Fuentes Naturales	12
2.3. Estudios Realizados de Medición de Metales Pesados	18
3. METODOLOGÍA	22
3.1. Área de Estudio	22
3.2. Muestreo	23
3.3. Análisis de Laboratorio	24
- Objetivo 1: Análisis histórico de la ocupación de las bases antárticas en la Península Fildes.	25
- Objetivo 2: Determinar la concentración de metales pesados en testigos de sedimentos lacustres de la Península Fildes.	26

- Objetivo 3: Establecer los niveles basales de metales pesados en la Península de Fildes.	29
- Objetivo 4: Determinar el impacto de las bases antárticas sobre el contenido de metales pesados en los ecosistemas lacustres de la península Antártica.....	31
3.4. Índices de contaminación	33
3.4.1. Factor de Enriquecimiento (FE).....	33
3.4.2. Índice de Geoacumulación (Igeo).....	34
3.4.3. Índice de carga contaminante (PLI).....	36
3.5. Análisis Estadístico	37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
- Objetivo 1: Análisis histórico de la ocupación de las bases antárticas en la Península Fildes.....	38
- Objetivo 2: Determinar la concentración de metales pesados en testigos de sedimentos lacustres de península Fildes.	44
- Objetivo 3: Establecer los niveles basales de metales pesados en la Península de Fildes.....	68
- Objetivo 4: Determinar el impacto de las bases antárticas sobre el contenido de metales pesados en los ecosistemas lacustres de la península Antártica.....	77
NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL DE SEDIMENTOS	139
5. APORTE A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)...	143
6. CONCLUSIONES.....	144
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
8. ANEXOS.....	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación concentraciones obtenidas y NCh. 409/1.	19
Tabla 2. Lugares de toma de muestra de sedimentos.	24
Tabla 3. Lista de elementos que pueden ser determinados por ICP/OES.....	25
Tabla 4. Clases de factores de enriquecimiento de un metal pesado.....	34
Tabla 5. Interpretación del Factor de Enriquecimiento.....	34
Tabla 6. Interpretación del Índice de Geoacumulación.....	35
Tabla 7. Interpretación del Índice de carga contaminante.	36
Tabla 8. Límites de Detección ICP.....	45
Tabla 9. Concentración metales en Lago Hotel.....	45
Tabla 10. Concentración de metales en Lago Xihu.....	51
Tabla 11. Concentración de metales en Lago Kitiesh.....	57
Tabla 12. Concentración de metales en Lago Uruguay.....	62
Tabla 13. Concentraciones Basales del Lago Hotel.....	71
Tabla 14. Concentraciones Basales del Lago Xihu.....	72
Tabla 15. Concentraciones Basales del Lago Kitiesh.....	74
Tabla 16. Concentraciones Basales del Lago Uruguay.....	76
Tabla 17. Índice de Geoacumulación Lago Hotel.....	86
Tabla 18. Factor de Enriquecimiento Lago Hotel.....	88
Tabla 19. Índice de carga contaminante Lago Hotel.....	90
Tabla 20. Índice de Geoacumulación Lago Xihu.....	102
Tabla 21. Factor de Enriquecimiento Lago Xihu.....	104
Tabla 22. Índice de carga contaminante Lago Xihu.....	106
Tabla 23. Índice de Geoacumulación Lago Kitiesh.....	117
Tabla 24. Factor de Enriquecimiento Lago Kitiesh.....	119
Tabla 25. Índice de carga contaminante Lago Kitiesh.....	121
Tabla 26. Índice de Geoacumulación Lago Uruguay.....	132
Tabla 27. Factor de Enriquecimiento Lago Uruguay.....	134

Tabla 28. Índice de carga contaminante Lago Uruguay.....	136
Tabla 29. Comparación de concentraciones del Lago Hotel con dos normativas con valores ERL y ERM	139
Tabla 30. Comparación de concentraciones del Lago Xihu con dos normativas con valores ERL y ERM	140
Tabla 31. Comparación de concentraciones del Lago Kitiesh con dos normativas con valores ERL y ERM	140
Tabla 32. Comparación de concentraciones del Lago Uruguay con dos normativas con valores ERL y ERM	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva del comportamiento de los turistas por temporada.	11
Figura 2. Área de Estudio.	22
Figura 3. ICP-OES Optima 8000	28
Figura 4. Ejemplo de Columna de Sedimentos	30
Figura 5. Diagrama Resumen de Metodología	32
Figura 6. Orden Cronológico Bases y Refugios Península Fildes	42
Figura 7. Orden Cronológico Bases y Refugios Península Fildes	43
Figura 8. Gráfico de Concentraciones del Lago Hotel	47
Figura 9. Valores de concentración máxima de metales pesados lago Hotel.....	48
Figura 10. Gráfico de Concentraciones del Lago Xihu	53
Figura 11. Valores de concentración máxima de metales pesados lago Xihu.....	54
Figura 12. Gráfico de Concentraciones del Lago Kitiesh.....	59
Figura 13. Valores de concentración máxima de metales pesados lago Kitiesh. .	60
Figura 14. Gráfico de Concentraciones del Lago Uruguay	64
Figura 15. Valores de concentración máxima de metales pesados lago Uruguay	66
Figura 16. Diagrama de caja metales Lago Hotel.....	80
Figura 17. Comportamiento de los metales Lago Hotel.....	81
Figura 18. Comportamiento de los metales Lago Hotel.....	82

Figura 19. Diagrama de caja Lago Xihu	96
Figura 20. Comportamiento de los metales Lago Xihu	97
Figura 21. Comportamiento de los metales Lago Xihu	98
Figura 22. Diagrama de caja Lago Kitiesh.....	111
Figura 23. Comportamiento de los metales Lago Kitiesh	112
Figura 24. Comportamiento de los metales Lago Kitiesh	113
Figura 25. Diagrama de caja Lago Uruguay	126
Figura 26. Comportamiento de los metales Lago Uruguay	127
Figura 27. Comportamiento de los metales Lago Uruguay	128

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Factor de Enriquecimiento.....	33
Ecuación 2. Índice de Geoacumulación	35
Ecuación 3. Índice de carga contaminante.....	36

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue realizada gracias al apoyo y contención de muchas personas que me acompañaron y me apoyaron en este camino, y por eso les agradezco infinitamente. Por nunca soltarme, sin importar nada.

Agradezco a mi familia, por aguantarme en mis altos y bajos, especialmente en los bajos. Por tenerme paciencia en este camino y estar ahí siempre con cualquier cosa que necesitara para cumplir cualquier meta que me propusiera. Gracias por llevarme a acampar desde pequeña y hacer que ame tanto la naturaleza que quise estudiar algo en lo que pudiera estar en contacto siempre. Gracias por acompañarme siempre.

Agradezco a mis amigas de la vida y mi familia del corazón, Carolina y Constanza. Gracias por apoyarme, por impulsarme a siempre ser más y mejor, por creer en mí a ojos cerrados, aun cuando yo no lo hacía. Gracias por estar sin necesidad de palabras, gracias por acompañarme en este viaje y ser un apoyo fundamental en mi vida, gracias infinitas por creer en mí y ser parte de mi vida. Gracias infinitas por estar siempre.

Agradezco a mi amiga Javiera. Gracias por escucharme y ayudarme, gracias por esas videollamadas infinitas, por estar en cada paso de este camino universitario. Por retarme y contenerme cuando lo necesité, por ayudarme a pensar cuando no tenía ganas de hacerlo, por motivarme a ser mi mejor versión, por siempre estar. Mil veces gracias.

Agradezco a Jacke, mi segunda mamá. La persona que me enseñó a dibujar casas y a leer, y me inculcó este amor por la lectura. Que me enseñó a sumar y restar, y a soñar grande. Sin ti no sería quien soy hoy, gracias por amarme y creer en mi mente y corazón.

Agradezco a las personas de laboratorio, Dani, Don Cristian y Don Miguel. Gracias por su increíble paciencia y sabiduría, por siempre ayudarme con la mejor disposición, por sus palabras y acciones, aun cuando no era su trabajo. Gracias a ustedes pude llevar a cabo esta tesis, gracias totales.

Agradezco a mi profesor guía, Roberto Urrutia, por ayudarme siempre cuando lo necesité, por su paciencia y sabiduría. Por su orientación en todo momento y su confianza. Agradezco también a todos los profesores, profesionales, académicos, ayudantes, secretarias, etcétera, que estuvieron en mi camino universitario y me enseñaron todo su conocimiento, y que de una forma u otra me entregaron herramientas para terminar mi carrera y realizar esta tesis.

Y siempre agradeceré a mi perra, Hera. Por ser un constante apoyo emocional, por desvelarse conmigo y tenerme paciencia cuando mis tiempos no coincidían con sus paseos. Gracias.

RESUMEN

Aunque la Antártida se considera el último continente prístino, no está totalmente libre de contaminación. El número de personas que han llegado a este continente se ha ido incrementando de forma progresiva, provocando que la contaminación de los ecosistemas polares aumente.

La Península Fildes se encuentra ubicada en el extremo suroeste de la Isla Rey Jorge, archipiélago Shetland del Sur. Presenta ocupación humana permanente, siendo una de las zonas más densamente pobladas de la Antártida. Actualmente hay presencia de seis bases de forma continua con una población permanente de alrededor de 125 personas, lo que se ve aumentado en verano. Las perturbaciones al medioambiente producida por las bases antártica se ven aumentada por el aeropuerto, las carreteras, tuberías, los generadores diésel y el uso de combustibles fósiles para transporte, calefacción y generación de electricidad, siendo esta la principal fuente de metales pesados y de los impactos negativos al continente antártico. Aunque los metales pesados se encuentran de forma natural en la corteza terrestre y algunos elementos son necesarios en pequeñas cantidades, la actividad humana suele provocar su mayor acumulación.

Los metales pesados tienen la capacidad de bioacumularse y biodegradarse, por lo que la presencia de estos en ciertas concentraciones es peligrosa, llegando a ser tóxicos e incluso cancerígenos, dependiendo de la concentración en la que estén y la naturaleza química del metal.

La presencia de lagos es una característica típica de la Península Fildes, donde muchos de ellos se encuentran ubicados cerca de las estaciones permanentes y son usados como reservorios de agua potable.

Para esta investigación se estudiaron cuatro lagos (Lago Hotel, Xihu, Kitiesh y Uruguay) de la Península Fildes de los cuales se extrajeron testigos de sedimentos. Estas muestras fueron tomadas mediante el proyecto “Una

evaluación de los impactos de las bases antárticas en los ecosistemas acuáticos de la Península Fildes”, financiado por el INACH. Esta investigación tiene la finalidad de analizar el grado en que los lagos de la Península Fildes han sido afectados por las actividades antropogénicas desde la instalación de las estaciones antárticas, a través de la medición de la concentración de metales pesados en las columnas de sedimentos de los lagos, y poder determinar cómo ha cambiado la calidad del agua de estos, y así evaluar la sustentabilidad de los lagos como fuentes de agua potable para las bases antárticas.

Las muestras de sedimentos fueron analizadas en el laboratorio por medio de ICP, donde se obtuvieron las concentraciones de los metales As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg para los lagos Hotel, Xihu, Kitiesh y Uruguay. De acuerdo con estas concentraciones, se determinaron los niveles basales de cada metal y lago respectivo.

Las concentraciones se analizaron mediante análisis estadístico para buscar diferencias significativas con respecto a sus concentraciones basales. Se mostraron diferencias significativas en los metales arsénico, cromo, cobre y zinc en el Lago Hotel; plomo y mercurio en el Lago Xihu; cadmio, plomo y mercurio en el Lago Kitiesh; y cromo y níquel en el Lago Uruguay. Estas diferencias sugieren que ha habido un cambio en la cantidad de estos metales en los sedimentos del lago con el tiempo, lo que puede estar relacionado con factores como la actividad humana o procesos naturales.

Además, a las concentraciones de cada lago se les aplicaron los índices de contaminación factor de enriquecimiento (FE), índice de geoacumulación (Igeo) e índice de carga contaminante (PLI), con el fin de conocer el grado, la fuente y si hay presencia de contaminación. A través del PLI se encontró que para los cuatro lagos estudiados de la Península Fildes hay existencia de contaminación, con los valores más altos en el Lago Hotel.

Del índice de geoacumulación se obtuvieron altos valores para el arsénico en el Lago Hotel, presentándose como extremadamente contaminado y fuertemente contaminado. El cadmio también se presenta en una muestra como fuertemente contaminado, y para todas las demás muestras y los metales restantes analizados del Lago Hotel exhiben clasificación de no contaminado a moderadamente contaminado y no contaminado. Sobre el FE del Lago Hotel, se muestran altos niveles para el arsénico con un enriquecimiento muy elevado y significativo, y para el cadmio con un enriquecimiento significativo. Los resultados del FE de los demás metales muestran un enriquecimiento deficiente.

Para el Lago Xihu, el índice Igeo obtuvo resultados bajos con clasificación no contaminado y/a moderadamente contaminado para todos los metales. Respecto al FE se encontraron enriquecimientos moderados para muestras del arsénico, plomo y mercurio, para los metales restantes se obtuvieron enriquecimientos deficientes.

El Lago Kitiesh presenta altos niveles para la muestra superior de mercurio con clasificación moderado a fuertemente contaminado, y el resto de los elementos muestras clasificación no contaminado y/a moderadamente contaminado. Por el índice FE, el mercurio muestra un enriquecimiento significativo y moderado, el cadmio y arsénico presentan una muestra con enriquecimiento moderado, y el resto de los elementos exhiben un enriquecimiento deficiente.

Respecto al Lago Uruguay muestra una clasificación del índice Igeo no contaminado y/a moderadamente contaminado para todos los metales analizados. El FE presenta un enriquecimiento moderado para algunas muestras en los elementos cadmio, plomo y mercurio. Los demás metales muestran un enriquecimiento deficiente.

De acuerdo con las concentraciones de cada lago, se muestran altos valores de mercurio, plomo y cobre para los cuatro lagos, presentando los valores más altos el Lago Hotel.

1. INTRODUCCIÓN

La Antártida es uno de los lugares más remotos y menos afectados por la actividad humana en todo el mundo. Sin embargo, en las últimas décadas se ha detectado la presencia de metales pesados en la Península Antártica, lo que indica acción antrópica en esta región. La actividad humana, como la minería, el transporte marítimo y la investigación científica, pueden estar contribuyendo a la contaminación de la Antártida y a la presencia de estos metales en el medio ambiente.

Durante décadas, la Península Antártica ha sido objeto de investigación científica, por lo que existen varios asentamientos humanos destinados a ello, provocando que los efectos de la acción humana comiencen a manifestarse. La concentración de metales pesados en la Antártida es un indicador crucial del impacto de las actividades humanas en los ecosistemas del continente. La presencia de estos ha empezado a dejar su marca, desencadenando preocupaciones sobre la preservación de esta región, ya que su presencia en la Antártida puede interferir en los sistemas hormonal e inmunitario de la biota local, lo que supone una amenaza para su salud y supervivencia (Catalá, 2017).

La contaminación por metales pesados puede ser de origen natural o antropogénico. Estos entran a los diferentes ambientes provenientes de fuentes como depositación atmosférica, actividad volcánica, que libera vapores y ceniza, uso de combustibles fósiles, la minería y metalurgia, descargas industriales y urbanas, utilización de pesticidas y herbicidas. Muchos metales pesados son muy usados en tuberías, baterías, cables, pigmentos (pinturas), gasolina, soldaduras y productos de acero (Paredes, 1998).

La península Fildes se destaca por tener una alta densidad de asentamientos científicos, sin embargo, esto puede tener un impacto negativo en los ecosistemas locales debido a la realización de diversas actividades, como la construcción de instalaciones, la operación de estaciones de investigación, el transporte de

suministros, el vertido de sustancias químicas, la generación de residuos, entre otras, las cuales pueden introducir contaminantes al suelo y agua perturbando el equilibrio natural de los ecosistemas y afectando a los residentes y científicos por la contaminación de lagunas que son suministros de agua potable.

El turismo en la Antártica también forma parte de este problema de contaminación de metales pesados, aunque limitado en comparación con otras regiones del mundo, el turismo ha ido en constante aumento en las últimas décadas. Aun cuando los operadores turísticos y las autoridades han implementado regulaciones estrictas para minimizar el impacto ambiental, el aumento en el número de visitantes y actividades recreativas ha traído consigo desechos generados por los turistas, emisiones de gases de efecto invernadero por los vuelos y cruceros, alteración del paisaje por el aterrizaje de aviones y la circulación de vehículos en la nieve, entre otros. Actualmente se registran 105.331 turistas en el periodo de 2022-2023 que visitan la Antártica, cifra histórica y preocupante.

Adicionalmente la dispersión y deposición atmosférica ayudan en la difusión y dispersión de contaminantes o partículas en la atmósfera por medio del viento, corrientes de convección y turbulencia atmosférica, para luego depositar estos contaminantes en la superficie.

La presencia de metales pesados, que son tóxicos para los organismos y el medio ambiente, puede darse a través de diversas actividades antrópicas y tener efectos perjudiciales. La utilización de transporte marítimo y terrestre como barcos y vehículos puede liberar metales pesados, como el plomo y el cobre, los cuales pueden depositarse en la nieve y el hielo, afectando la calidad del agua y el suelo. Los residuos generados por los turistas, como pilas, baterías, objetos de metal desechados y equipo de pesca, pueden contener metales pesados. Si estos residuos no se gestionan adecuadamente, existe el riesgo de que estos metales se liberen en el entorno antártico. La construcción y el mantenimiento de instalaciones turísticas, como estaciones de investigación y campamentos, a

menudo requiere la utilización de materiales de construcción que pueden contener zinc en las estructuras metálicas, contribuyendo a la contaminación.

Los problemas de contaminación se conocen desde hace varios años en la Antártida y se han firmado diversos tratados y acuerdos, entre ellos el Protocolo de Madrid para exigir la vigilancia y limitar el impacto ambiental de las actividades de investigación, y el Tratado Antártico en 1959 del que Chile pasó a ser parte en 1995 y que actualmente pertenecen 53 países. En este se aseguró la Antártida como reserva natural dedicada a la paz y la ciencia, convirtiéndola en la única zona terrestre y marina dedicada al bien común de la humanidad.

Y aunque se han realizado mejoras en la gestión de residuos, combustibles y aguas residuales, la cooperación entre los programas nacionales de los distintos países con base en la península es insuficiente.

La Península Antártica es testigo de un fenómeno que ilustra de manera contundente la huella global de la actividad humana: la presencia de metales pesados por acción antrópica. Este informe se adentra en un tema de creciente relevancia en el contexto de la conservación y la sostenibilidad ambiental, donde se explora el impacto de la actividad humana en uno de los ecosistemas más frágiles y aislados del mundo. La investigación de esta tesis se enfoca en analizar el impacto de las actividades humanas en la península Fildes, ubicada en la isla Rey Jorge, en el extremo norte de la Península Antártica. Para esto se analizaron muestras de sedimentos tomadas en cuatro lagos que sirven o servían como reservorios de agua potable para las bases científicas, para evaluar la presencia de metales pesados por acción antrópica.

Es esencial comprender el estado actual de las concentraciones de metales pesados en la Antártida y sus fuentes, y concienciar sobre la importancia de mantener este lugar único para futuras generaciones.

- Hipótesis

Las actividades antropogénicas asociadas a la instalación de las bases antárticas en la Península de Fildes, han producido el aumento de los niveles de metales pesados en el ambiente, lo que se vería reflejado en el incremento de ellos hacia los estratos superficiales en la columna de sedimentos de lagos ubicados en las cercanías de las bases.

- Objetivo General:

- Evaluar la contaminación antrópica en la Península Antártica a través del análisis de metales pesados en testigos de sedimentos lacustres.

- Objetivos Específicos:

- Determinar la concentración de metales pesados en testigos de sedimentos lacustres de la Península Fildes.
- Establecer los niveles basales de metales pesados en la Península de Fildes.
- Análisis histórico de la ocupación de las bases antárticas en la Península Fildes.
- Determinar el impacto de las bases antárticas sobre el contenido de metales pesados en los ecosistemas lacustres de la península Antártica.

2. ANTECEDENTES

2.1. Definición de Metales Pesados

El término "metales pesados" se utiliza habitualmente en la literatura medioambiental para referirse a los metales y metaloides asociados con la contaminación ambiental, la toxicidad y los efectos adversos en la biota y nocivos para todo organismo vivo, incluido el ser humano (Ali and Khan, 2018). Generalmente se consideran metales pesados aquellos cuya densidad supera los 5 g por centímetro cúbico (Barakat, 2011).

Algunos elementos como el Cobre (Cu) y el Zinc (Zn) se requieren en pequeñas concentraciones, ya que son esenciales en las funciones bioquímicas y fisiológicas de los seres vivos (Tahri et al., 2005). Sin embargo, todos los metales pueden ser tóxicos e incluso cancerígenos, dependiendo de la concentración en la que estén y la naturaleza química del metal (Bengtsson et al., 2006; Miller et al., 2004).

Dentro de los metales pesados más conocidos se encuentra: el Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn). Y los más probables a encontrar en el agua son el Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Cromo (Cr). Los metales pesados son considerados más peligrosos o tóxicos se encuentra el Mercurio, Plomo, Cadmio y Arsénico, y en raras ocasiones, el selenio, el cual es un no metal (Fergusson, 1990; Harte et al., 1991)

Es posible encontrarlos de manera natural en el medio ambiente, debido a fenómenos naturales. (Fan, 1996). Haciendo que sea muy fácil que entren al cuerpo de un ser vivo (MedlinePlus, 2020).

No obstante, la principal fuente de metales pesados son las actividades antropogénicas (Ouyang et al., 2006). La contaminación por metales pesados está muy extendida en todo el mundo como consecuencia de esto. (Ancora et al., 2002; Celis et al., 2012).

2.1.1. Bioacumulación y Biomagnificación de metales pesados

Los metales pesados poseen un carácter acumulativo y de permanencia, es por esto que se encuentran no sólo en el agua, aire o suelo, sino también se detectan en la flora y fauna (Zhao et al., 2006).

La bioacumulación se define como la acumulación neta de un contaminante en o sobre un organismo a partir de todas las fuentes, incluyendo el agua, el aire, los sedimentos y la dieta (Newman y Unger, 2003). Se produce cuando el compuesto se concentra en los organismos o tejidos vivos (Kodavanti et al., 2014).

La biomagnificación se define como el aumento de las concentraciones de contaminantes de un nivel trófico al siguiente debido a la acumulación a partir de los alimentos (Newman y Unger, 2003). A medida que se consume a lo largo de la cadena alimentaria, la concentración del contaminante puede aumentar hasta alcanzar un nivel tóxico (Kodavanti et al., 2014).

Es por esto que los metales pesados son tóxicos para los mamíferos y aves, y su exposición provoca cuadros de toxicidad aguda que afectan al sistema nerviosa central, riñón e hígado (Castillo, 2005).

2.2. Factores de causalidad de metales pesados en la Península Fildes

Aunque la Antártida se considera el último continente prístino, no está totalmente libre de contaminación (Chu et al., 2019). Esto es así a pesar de que el continente está aislado de la entrada de contaminantes de latitudes inferiores por barreras naturales como las corrientes atmosféricas y oceánicas circumpolares (Barker and Thomas, 2004; Chu et al., 2019).

Los sedimentos son uno de los principales reservorios de metales pesados y actúan como recurso secundario de contaminación en el medioambiente (Bargagli 2008; Braun et al. 2012).

2.2.1. Fuentes Antrópicas

La Península Fildes desempeña un papel importante en la acogida los turistas, ya que una gran parte de ellos pasan por allí durante su visita al continente (Liggett et al. 2011). Las bases chilenas, incluyendo la Base Aérea Pantano Teniente y Villa Las Estrellas, son el punto de entrada de los visitantes a la Antártida. La elevada actividad humana derivada del turismo y la alta densidad de bases hacen que la contaminación observada en la península sea principalmente de origen antropogénico. Los vertidos de combustible, la mala gestión de los residuos, la destrucción de hábitats y los daños causados a la vegetación por los vehículos son las principales causas de esta contaminación y alteración del medio natural (ASOC 2007; Bargagli 2008; Braun et al. 2012; Peter et al. 2013).

2.2.1.1. Bases Antárticas

En la Península de Fildes es donde existe la mayor concentración de instalaciones científicas y bases de la Antártida. Actualmente, está compuesta por seis bases que se encuentran de forma permanentes: La Base Presidente Eduardo Frei Montalva, la Base Profesor Julio Escudero de Chile, la Base Aérea Teniente Rodolfo Marsh Martin, la Base Científica Antártica Artigas de Uruguay, y las estaciones Gran Muralla de China y Bellingshausen de Rusia. La Base Presidente Eduardo Frei Montalva posee una población máxima en verano de 150 personas, y un promedio de población en invierno de 80 personas. Y la Base Profesor Julio Escudero de Chile cuenta con una población de 3 a 5 personas en invierno, y un máximo de 36 personas en verano.

Adicionalmente hay bases de la FACH, aeropuertos, carreteras y generadores diésel, lo que aumenta las perturbaciones al paisaje de la Antártida y los impactos que generan.

Aunque los metales pesados se encuentran de forma natural, la actividad humana suele provocar su mayor acumulación (Viček et al., 2017). Sin embargo, el

carácter persistente y escasa movilidad en el perfil del suelo permiten que sean buenos indicadores de la carga antropogénica en los ecosistemas antárticos.

En la actualidad, existen fuentes antropogénicas de metales pesados, que producen contaminación, lo que se introduce en los ecosistemas. Las principales fuentes son la contaminación por petróleo o combustibles, que suelen depositarse en los lagos a través de la deposición atmosférica; la construcción de infraestructura y caminos; los residuos; la eliminación de aguas residuales y el uso y eliminación de pintura. Metales como el níquel, zinc, cobre, cromo y plomo se asocian a la contaminación por petróleo, y las pinturas son una posible fuente de metales como el plomo y cobre (Alam and Sadiq, 1993; Bargagli, 2008; Bargagli et al., 2003; Espinoza, 2011; Harris, 1991; Ouyang et al., 2006; Tin et al., 2009). Los residuos peligrosos o los plaguicidas podrían contribuir a aumentar los niveles de Hg, As y Cd, mientras que los dispositivos eléctricos podrían aumentar los niveles de Pb en los ecosistemas marinos (Boersma, 2008; Celis et al., 2012).

Distintas investigaciones han señalado que uno de los principales impactos negativos descritos en el continente antártico, se produciría por el uso de combustibles fósiles para transporte, calefacción y generación de electricidad necesarios para la supervivencia de los asentamientos humanos en latitudes altas (Chong et al., 2010; Delille et al., 2007; Espinoza, 2011; Ferguson et al., 2008; Hughes et al., 2007; Lu et al., 2012; Stark et al., 2003).

La contaminación directamente relacionada con los combustibles es especialmente alarmante en los lugares donde se llenan de gasolina los aviones y los vehículos de motor, donde se almacena el combustible y a lo largo de la red de carreteras que une las bases y el aeropuerto (Peter et al. 2013). El suelo alrededor de la mayoría de las estaciones también muestra rastros de contaminación. La presencia de la mayoría de estos rastros de contaminación puede atribuirse al escaso mantenimiento de los equipos y al cuidado que se tiene al manipular el combustible (Braun et al. 2012; Peter et al. 2013).

2.2.1.2. Turismo

La población de la Antártica se renueva periódicamente y está compuesta por científicos de investigación y personal que realiza tareas logísticas. Sin embargo, se produce un aumento de personas en verano por el turismo, lo que genera un aumento en los impactos medioambientales a un territorio frágil.

La principal actividad comercial del continente antártico es el turismo, el cual se ha desarrollado desde hace 50 años y se ha incrementado en el tiempo, teniendo implicancias ambientales (Espinoza, 2011; Liggett et al., 2011). El turismo comercial en buques y aeronaves no ha dejado de crecer desde las primeras expediciones comerciales de fines de los años cincuenta (Turismo y Actividades no Gubernamentales, s/f). En 1958 se inició la actividad turística cuando el Transporte Naval argentino “Les Eclaireurs” trasportó por primera vez a turistas hacia el continente antártico. Hasta principios de la década de 1980, solo unos pocos cientos de turistas visitaban la Antártida cada verano (Turismo antártico, s/f; Turismo y Actividades no Gubernamentales, s/f). En 1977 se iniciaron vuelos regulares de excursión procedentes de Australia. La actividad ha continuado desarrollándose desde entonces, con el uso de aviones de pasajeros (Turismo y Actividades no Gubernamentales, s/f).

Desde principios de la década de 1990, el número de turistas que visitan la Antártida no ha dejado de crecer, sobre todo en la Península Antártica. De acuerdo con las estadísticas de la Asociación Internacional de Operadores Turísticos en la Antártica (IAATO, 2010), sólo por concepto de turismo, el número total de turistas que participan ha aumentado de 2.500 en 1990-1991 a 8.210 en el periodo de 1994-1995. En 2006-2007 tuvo un total de más de 37.000 turistas y en 2007/2008, un total de 60 barcos turísticos trajeron a la Antártida 46 000 turistas, además de más de 28 000 tripulantes y personal (www.iaato.org). En el periodo de 2008-2009 hubo 46.265 turistas, y luego de este registro, la cantidad de turistas comenzó a bajar hasta 33.800 personas en la temporada de 2011-2012. En 2012-2013 se registraron un total de 34.375 turistas para después, en el periodo de

2013-2014 subir a 37.405 personas. Para la temporada de 2014-2015 hubo 36.702 turistas y de ahí en adelante continuó subiendo exponencialmente con 38.478 personas en 2015-2016, y 44.367 en 2016-2017. En el periodo de 2017-2018 hubo un aumento del 17% con 51.707 turistas, y en la temporada de verano 2018- 2019 se alcanzó un total aproximado de 56.168 visitantes (Turismo antártico, s/f).

Durante la temporada de verano 2018-2019 se registraron 55.500 visitantes, además de unos 10.000 científicos (Turismo antártico, s/f). En el periodo de 2019-2020, específicamente entre octubre de 2019 y abril de 2020, que se vio afectado por el inicio de la crisis sanitaria, la cifra de visitantes fue de 74.401 turistas, de acuerdo con la IAATO (International Association of Antarctica Tour Operators, 2019). De estos 74.401 visitantes que viajaron, 18.506 viajaron en buques solo de crucero y no pisaron el continente, mientras que 731 viajaron a destinos de gran calado en avión, 165 en yate y 4.679 en avión/crucero, programas de viaje con al menos un vuelo de entrada o salida de la isla Rey Jorge, combinado con un crucero por la Península (Emol, 22 de Julio de 2023; International Association of Antarctica Tour Operators, 2019; Turismo y Actividades no Gubernamentales, s/f).

La cifra de turistas o visitantes ha continuado aumentando de forma constante, exceptuando las temporadas de pandemia de 2020 a 2022, donde el coronavirus fue el responsable de evitar que se superaran cifras anteriores (Emol, 22 de Julio de 2023; Tristán, 2020). Sin embargo, según datos de la Asociación Internacional de Tours Operadores de la Antártica (IAATO), en el período 2022-23 se registró un récord histórico de 105.331 personas que viajaron hasta la zona. De estas, 71.258 desembarcaron. Esta alza genera preocupación por el daño al medio ambiente, ya que se han registrado impactos como vertidos de combustible, colisiones entre embarcaciones y vida marina, además de turistas que han pisoteado musgos y plantas (Emol, 2023) (Figura 1).

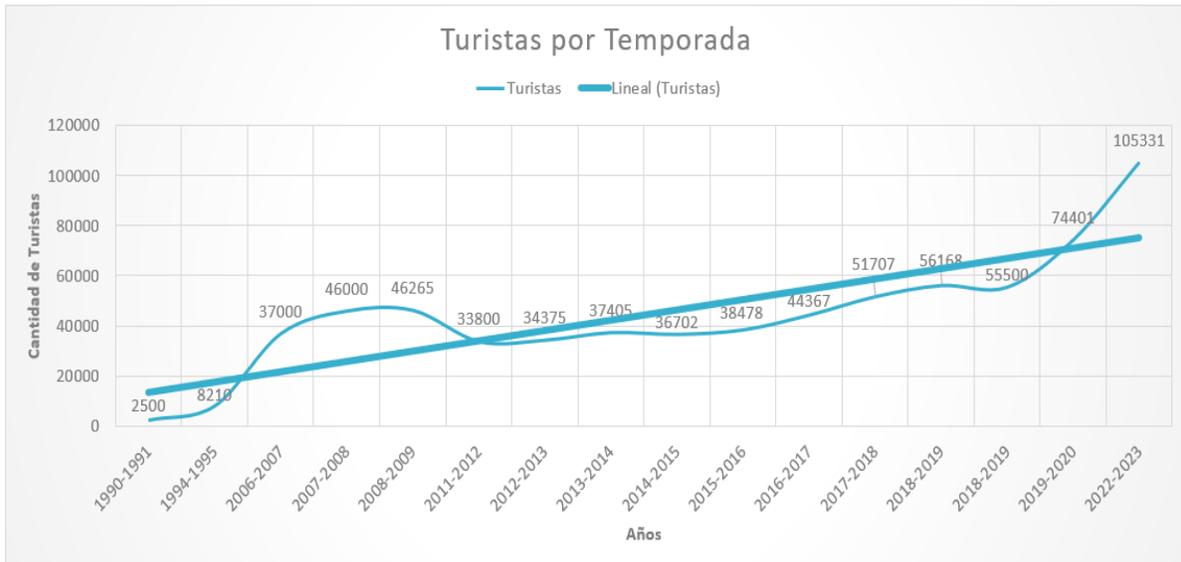


Figura 1. Curva del comportamiento de los turistas por temporada.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída de la Asociación Internacional de Operadores Turísticos de la Antártica.

Hasta hace poco, más del 95% de estos turistas iban en barco, sin embargo, el turismo se ha diversificado al uso de aviones, cruceros y embarcaciones menores (Chwedorzewska and Korczak, 2010; Riffenburgh, 1998). No obstante, actualmente más del 90% de las actividades turísticas en la Antártida se realizan a través de cruceros, y sólo unas pocas empresas realizan turismo aerotransportado. Los barcos turísticos navegan principalmente en la región de la Península Antártica y las islas Shetland del Sur, y algunas incluyen también entre sus itinerarios antárticos a las islas Georgias del Sur y Malvinas. Es por esto por lo que el aumento del turismo es preocupante debido al impacto ambiental que este tiene en los ecosistemas y la contaminación producida por el derrame de hidrocarburos que se produce producto de las embarcaciones, sin mencionar la contaminación que trae consigo los propios turistas que visitan los mismos lugares repetidamente (Turismo antártico, s/f.).

Un número cada vez mayor de turistas de verano visitan el continente, pero el personal gubernamental, que permanece allí durante todo el año, tiene la

oportunidad de crear un impacto considerablemente mayor en los ecosistemas terrestres (Chwedorzewska and Korczak, 2010; Riffenburgh, 1998). La generación de energía, la eliminación de residuos, el uso de vehículos, la gestión del combustible y la construcción de pistas de aterrizaje y carreteras, las zonas alrededor de las estaciones sufren un impacto humano mucho mayor que otras regiones de la Antártida (Campbell et al., 1998), teniendo una influencia negativa en su entorno (Olech, 1991).

2.2.2. Fuentes Naturales

Los animales, principalmente los pingüinos, son los principales vectores de contaminación en las islas cercanas, ya que transportan contaminantes desde los ambientes costeros a los lacustres (Chu et al. 2019).

2.2.2.1. Erupciones Volcánicas

La zona volcánica más grande de la Tierra se encuentra en la Antártica, y la mayoría de sus volcanes están ocultos. En 2017, un grupo de investigación liderado por la Universidad de Edimburgo descubrió más de 100 volcanes en la Antártica escondidos bajo la llamada "Hoja de hielo". Estos volcanes recién descubiertos se encuentran distribuidos en las profundas cuencas de la Antártida Occidental, especialmente concentrados y orientados a lo largo del eje central de 3.000 kilómetros (COTECNO, 2017).

Durante el transcurso del tiempo han sucedido acontecimientos donde se han descubierto nuevos volcanes o activado. Dentro de estos sucesos se destacan el de enero de 2010, donde se instalaron una serie de sismómetros en Marie Byrd Land, que es una región de la Antártida occidental. Esto produjo que se detectaran dos eventos sísmicos lo que provocó el descubrimiento de un volcán activo que se encuentra bajo una capa de hielo en la Antártica (Descubren un volcán activo bajo

la Antártida, 2017). Otro acontecimiento por destacar es el de octubre de 2020, en las proximidades del monte submarino Orca, donde un volcán submarino inactivo que se eleva 900 metros desde el lecho marino en el Estrecho de Bransfield, se activó provocando un enjambre de 85.000 terremotos. De acuerdo con los registros, los terremotos lograron mover el suelo en la Isla Rey Jorge alrededor de 11 centímetros (Cesca, 2022; Piacente, 2022).

La Antártida es un continente cubierto de una capa de hielo que en algunas zonas tiene un espesor de cuatro kilómetros, sin embargo, debajo estas capas se encuentra la mayor zona volcánica de la Tierra con alrededor de 138 picos debajo la capa de hielo de la Antártica Occidental, de los cuales 47 volcanes ya son conocidos debido a que sus picos sobresalen, y los 91 restantes se han identificado como volcanes recién descubiertos, tanto activos como extintos, con una altura de entre 100 y 3.850 metros, pero que no son visibles debido a que están sepultados por el hielo (García, 2021; Romero, 2017).

La Antártica es conocida por tener una serie de volcanes activos y potencialmente activos. Estos volcanes están ubicados en una región geológicamente activa y son monitoreados de cerca por científicos y organizaciones de investigación. Los volcanes donde se han observado erupciones son el Monte Erebus, la Isla Decepción y la Isla Buckle. Y las tres islas volcánicas del estrecho de Bransfield son la isla Decepción (volcanes activos), la isla Bridgeman y la isla Pingüino (volcanes jóvenes).

En la isla Deception, ubicada en el estrecho de Bransfield, se encuentra un volcán activo que nace en el fondo del océano (Lamberti, s/f), el cual ha tenido varias erupciones a lo largo de la historia. Este volcán tiene unos 1500 metros de altura, pero sólo asoman sobre la superficie marina los últimos 500 metros. Decepción es un volcán inquieto, que en el siglo XX hizo tres erupciones en los años 1967, 1969 y 1970, dos de las cuales destruyeron las bases chilena y británica que se encontraban en la isla. Por ese entonces, por motivos de seguridad la isla fue

completamente evacuada (Lamberti, s/f). La última erupción se registra en 1970, aunque recientemente se han producido episodios en 1992, 1999 y 2014-2015 (Pedrazzi et al., 2014). El volcán de la Isla Decepción es actualmente uno de los volcanes más activos de la Antártida, registrando más de 20 erupciones en los últimos 200 años (Universitat Autònoma de Barcelona, s/f).

La Isla Bridgeman no presenta registro de erupciones recientes y la última erupción registrada en la isla Pingüino data del año 1905. Esta última se encuentra bastante cercana a la isla Rey Jorge donde está la estación argentina y la base Frei (INACH, s/f). Aunque se sabe que existe actividad volcánica en algunas islas cercanas a la Isla Rey Jorge como la Isla Decepción e Isla Pingüino, se desconoce el número exacto de volcanes en la Isla Rey Jorge (INACH, s/f).

El monte Erebus es conocido por ser el volcán activo más austral que, hasta el momento, ha sido descubierto en la Tierra, además de ser uno de los volcanes más alto de la Antártida con 3794 metros de altura. Se encuentra en la isla de Ross y está incluido dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico. Ha tenido varias erupciones a lo largo del tiempo, pero su última erupción ocurrió en el año 2011 (Lavin & Antonio, 2016). Este volcán posee una actividad casi constante, arrojando piedras y lava muy viscosa. Además de que emite fumarolas, pero dadas las condiciones del ambiente, esas emisiones de gases se congelan y forman torres de hielo. Otra de sus características particulares es que su cráter contiene uno de los pocos lagos de lava, siendo un espectáculo indiscutible (García, 2021).

La Isla Buckle se encuentra ubicada cercana a la Isla Sturge y a la Isla Young, a unos 110 kilómetros al nor-noreste del cabo Belousov sobre el continente Antártico. La isla es de origen volcánico, y está todavía activa, registrando su última erupción en el año 1899 con columnas eruptivas oscuras. En el oeste de la cumbre de la isla se observa un cráter inactivo, y en la parte baja oriental de la isla se encuentra el cráter activo (Volcanian, 2017).

La Antártica es el área con la mayor concentración de actividad volcánica en todo el planeta y continuamente se descubren nuevos volcanes o los que se encuentran inactivos pueden activarse en cualquier instancia. Además de ser un continente elevado y uno de los continentes más secos del planeta, lo que puede aumentar el riesgo de deslizamientos de tierra y avalanchas, la actividad humana en la Antártica, como la construcción de infraestructuras y la exploración, también producen impactos en el medio ambiente y aumentan los riesgos geológicos y contaminantes de los ecosistemas (Sobre La Antártida, s/f).

Las erupciones volcánicas pueden tener un impacto significativo en el entorno y en investigaciones científicas en la región ya que los volcanes desprenden vapor de agua, columnas de ceniza, polvo, gases como dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), monóxido de carbono (CO), ácido clorhídrico (HCl), helio (He) e hidrógeno (H) y otros gases dañinos que se acumulan en zonas bajas (Erupciones volcánicas, n.d.; Problemas pulmonares y smog volcánico, n.d.). Algunos volcanes expulsan rocas balísticas y ceniza, otros volcanes producen flujos de lava o flujos de lodo, que ocurren cuando el calor magmático derrite el hielo o por fuertes lluvias que movilizan el sedimento volcánico en las laderas. La caída de ceniza o expulsión de gases, generan riesgo de contaminación del agua y del medio ambiente (Erupciones volcánicas, n.d.).

En la columna de erupción, se produce la mayor parte del dióxido de azufre, y elevadas emisiones de este, en presencia de humedad y en las condiciones adecuadas, reacciona químicamente hasta transformarse en ácido sulfúrico. Esta transformación química sucede con el agua de la atmósfera, siendo uno de los desencadenantes de la lluvia ácida, la cual acidifica las aguas y los suelos (García, 2021). También se emite a la atmósfera material particulado que suele contener metales pesados tales como el plomo y el mercurio, lo que modifica la acidez de las aguas, afectando a la flora y la fauna y dañando la salud de las personas.

En resumen, en la Antártica es posible encontrar 138 picos volcánicos tanto extintos como activos y se desconoce el número exacto de volcanes que existe en la Isla Rey Jorge, aunque se sabe que existe actividad volcánica en algunas islas cercanas como la Isla Decepción e Isla Pingüino (INACH, s/f). La última erupción registrada de un volcán en la Antártida fue en 2011 en la isla de Ross, por el volcán Erebus (Monte Erebus). Los volcanes liberan cenizas, gases y vapores, produciendo contaminación tanto para la fauna como para la flora; lo que incluye a los sistemas acuáticos que proveen de agua potable a las bases científicas y asentamientos humanos en la Península Fildes. Las cenizas y gases que sueltan los volcanes son un punto a tener en cuenta en el estudio de la contaminación de los sedimentos, debido a que pueden quedar retenidas en la columna de sedimento aumentando las concentraciones de metales o alterando los resultados de análisis.

2.2.2.2. Dispersión y Deposición Atmosférica

Aunque la Antártica parece ser un continente aislado, remoto y menos afectado por la actividad humana, no lo es. Este continente se encuentra conectado con el resto del planeta a través de las interacciones atmosféricas y oceánicas, y hoy en día antropogénicas (La Antártica no es un continente aislado - INACH, n.d.). Los contaminantes pueden viajar largas distancias a través de la atmósfera y llegar a esta región, haciendo a la Antártida no inmune a la contaminación atmosférica (Fernández, 2019; del Valle, 2018).

La circulación atmosférica sobre la Antártida presenta un diseño circular. Y mediante estas corrientes de masas de aire se produce la dispersión atmosférica de contaminantes en la Antártica, lo cual se ha observado en los últimos años. Los contaminantes pueden provenir de fuentes continentales cercanas, como las emisiones industriales y el transporte marítimo, así como de fuentes más distantes debido a la dispersión atmosférica global (SINCA, n.d.).

Las fuentes de metales pesados en la Antártida son principalmente antropogénicas, como la minería y las actividades industriales (Nathaly et al., n.d.).

La dispersión de contaminantes en la Antártida se debe principalmente a actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la eliminación de desechos y el transporte (Fernández, 2019; Portal, 2019). Dentro de las principales fuentes de contaminación atmosférica en la Antártida se encuentran los aerosoles, microplásticos, metales pesados y partículas en suspensión.

Estudios han demostrado que la concentración de partículas en la Antártida está aumentando, al igual que el aire de la región contiene altas concentraciones de aerosoles (del Valle, 2018; Fernández, 2019; Nathaly et al., n.d.; Usán, 2020). La falta de comunicación atmosférica con latitudes más bajas hace que la dispersión de contaminantes en la Antártida sea más difícil de monitorear y controlar (Antártida, el difícil continente aislado, 2014).

Mientras la dispersión atmosférica es la dispersión de contaminantes en la atmósfera y ayuda en la reducción de la concentración de los contaminantes presentes en el aire evitando su acumulación en concentraciones peligrosas, la deposición atmosférica es el proceso por el cual estos contaminantes caen y se depositan en la superficie terrestre de la región antártica, acumulándose, lo que puede tener efectos significativos en la calidad del suelo y del agua y del medio ambiente en general.

Parte de la deposición atmosférica es de **origen natural**, como el polvo mineral transportado por el viento desde regiones más secas, como Australia y Sudamérica. También pueden ocurrir erupciones volcánicas que liberan partículas y gases a la atmósfera, que luego pueden ser transportados y depositados en la Antártica.

Las **actividades humanas** también pueden contribuir a la deposición atmosférica en la Antártica. Los contaminantes generados por la quema de combustibles

fósiles, la industria y otros procesos industriales pueden ser transportados por la atmósfera y depositados en la región. Estos contaminantes incluyen óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, compuestos orgánicos volátiles y partículas finas.

Debido a los patrones de circulación atmosférica, los contaminantes emitidos en otras partes del mundo pueden ser transportados a **largas distancias** y depositados en la Antártica.

La deposición atmosférica en la Antártica puede tener impactos significativos en los ecosistemas locales, ya que puede introducir nutrientes que afectan los ciclos biogeoquímicos y la cadena alimentaria, así como contaminantes que pueden ser perjudiciales para la vida. Además, la presencia de contaminantes puede afectar la calidad del hielo y la nieve, así como el equilibrio químico en los ecosistemas acuáticos cercanos.

2.3. Estudios Realizados de Medición de Metales Pesados

Aunque la Antártica es percibida, en general, como un lugar más bien exento de los problemas de contaminación que se observan en otras zonas del mundo, existen estudios que evidencian un incremento de los impactos de las actividades de origen antropogénico en su ecosistema. Los elementos químicos se han incrementado en el tiempo como consecuencia del aumento de la población, el turismo y el desarrollo industrial en el hemisferio sur, lo que podría afectar a los ecosistemas y biodiversidad del lugar.

Se realizaron estudios tanto nacionales como internacionales sobre las concentraciones de metales pesados en la Península Antártica. En estos estudios se midieron distintos parámetros tanto de vegetación y bacterias, como de sedimentos, encontrando altos niveles de metales pesados para el Ni, Pb, Zn y Cd, en sitios donde ha habido intervención humana, siendo hasta 10 veces mayor en comparación con lugares donde no existía acción antrópica. Estudios

realizados en las décadas de 1990 y 2000 mostraron que algunos de los lagos de la península podrían haber estado enriquecidos en metales pesados por encima de sus umbrales naturales (Prendez et al. 1996; Prendez y Carrasco 2003). Sin embargo, no pudieron afirmar que las actividades humanas fueran la fuente de este enriquecimiento debido a la falta de datos a largo plazo sobre el tema.

En el “Estudio Químico de las aguas continentales de Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica” (Préndez et al., 1996) donde se analizaron nueve lagunas las cuales son fuente actual y potencial de agua potable para las bases instaladas en la isla, se muestra un no cumplimiento de la norma chilena N.Ch. 409/1 que presenta los requisitos químicos exigidos para el consumo humano en los elementos Cd en todas las lagunas, y Cr, As, Se y Fe.

Tabla 1. Comparación concentraciones obtenidas y NCh. 409/1.

Laguna	Valores	Norma Chilena 409/1
Todas	Cd= 0,036 mg/L Cd= 0,037 mg/L Cd= 0,43 mg/L	Cd= 0,01 mg/L
LH	Cr= 0,51 mg/L	Cr= 0,05 mg/L
	As= 0,29 mg/L	As= 0,01 mg/L
	Se= 2,21 mg/L	Se= 0,01 mg/L
	Fe= 0,53 mg/L	Fe= 0,3 mg/L
LI	Fe= 0,87 mg/L	
LF	Fe= 0,75 mg/L	

Fuente: Elaboración Propia mediante información extraída del estudio Préndez, 1996 y la Norma Chilena 409/1.

Los autores sugirieron que la superación de la norma chilena de calidad de agua potable para Cd que se da en todas las lagunas no parece debida a una

contaminación de tipo antrópico, sino más bien a una condición natural, sin embargo, no se aportaron pruebas que apoyaran esta afirmación. El enriquecimiento de otros elementos, como el Zn, en ciertos lugares, se sugirió que era el resultado de actividades antropogénicas.

En el estudio internacional a cargo del Programa Polar Portugués, sobre la Evaluación de la contaminación por oligoelementos en la Península Fildes (Isla Rey Jorge) y la Isla Ardley, en la Antártida (Amaro et al., 2015), donde se midió la concentración de oligometales en la Isla Rey en la Península de Fildes con muestras de suelo a lo largo del mar, en la bahía de la Gran Muralla, la isla Ardley, la bahía de los Elefantes, y en la bahía del glaciar Collins Glacier Bay. Y muestras de musgo recogidas en la orilla del mar y en la bahía de Collins. Se muestra que las concentraciones de cada elemento son homogéneas, pero tenían un enriquecimiento en zonas con mayor densidad de estaciones científicas. Además se concluyó que la Península de Fildes se encuentra sometida a una gran presión ambiental, derivada de la importante presencia humana (Amaro et al., 2015).

De acuerdo con el estudio "Baseline values for metals in soils on Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica: the extent of anthropogenic pollution" (Lu et al., 2012), donde se realizaron mediciones de los contenidos de metales en suelos superficiales de la Península Fildes para ver el alcance de la contaminación antropogénica. Los valores obtenidos de los elementos metálicos en suelo, combinados con el análisis del factor de enriquecimiento y la evaluación del índice de geoacumulación, proporcionan una base para la Evaluación del impacto de la contaminación antropogénica en la Península Fildes. Se identificó a las actividades humanas como la causa de la contaminación, especialmente en lo que respecta al aumento de los niveles de Plomo, Cadmio y Mercurio, con una contaminación fuerte por parte del Pb y una contaminación moderada por Cd y Hg.

Altos niveles de metales pesados en sedimentos de los lagos producto de acciones antrópicas acarrear problemas significativos tanto para la flora y fauna de la Antártica, como para los seres humanos que la habitan (Blais et al., 2007).

De esta manera, a través de esta investigación se quiere evaluar la presencia de metales pesados debido a las actividades humanas en los sedimentos de lagos que han sido o son suministro actualmente de agua potable.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de Estudio

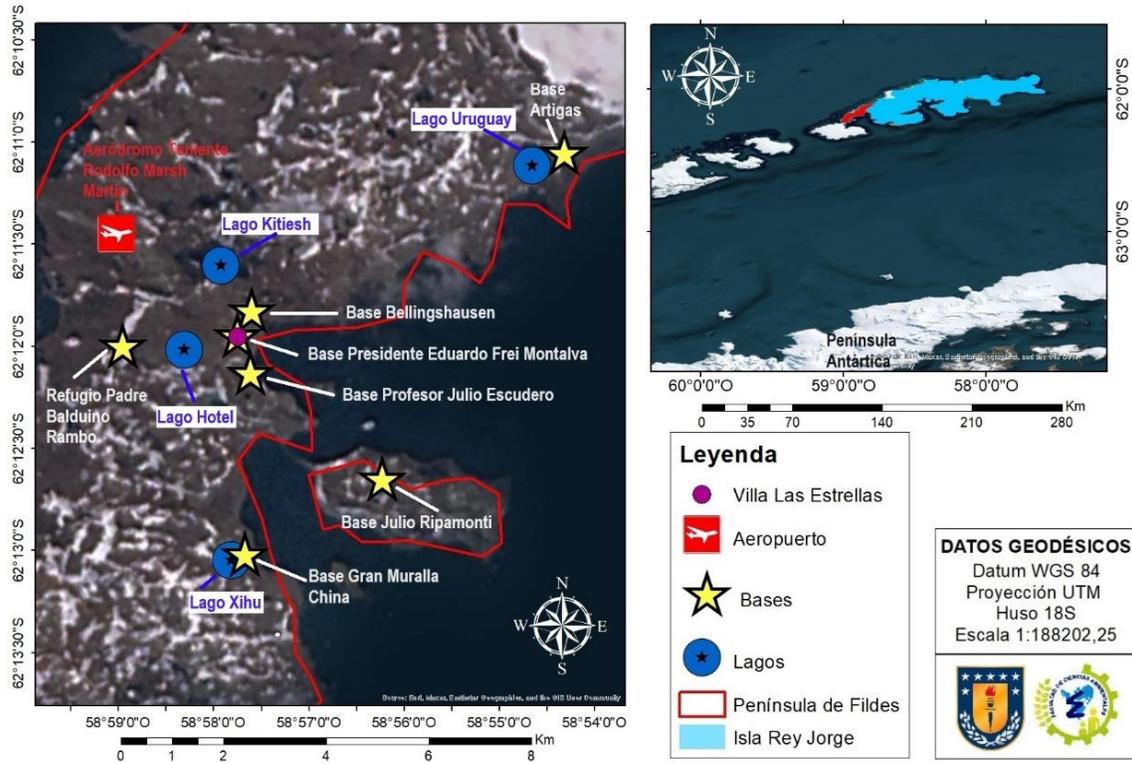


Figura 2. Área de Estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de información extraída del Sistema de Información Geográfico Regional del Gobierno Regional de Magallanes y de la Antártica Chilena.

La Antártica abarca los territorios al sur del paralelo 60° S. Es el último continente ocupado por el ser humano y el más austral de la Tierra, careciendo de habitantes nativos, ya que la población está compuesta por científicos de todo el mundo que hacen investigación y personas con labores logísticas, los cuales se renuevan periódicamente.

La Península Antártica se encuentra en la Antártica Occidental, aproximadamente en 69°S y 66°O, y es una continuación geológica de la Cordillera de los Andes. Esta zona fue reclamada por Argentina, Chile y Reino Unido, perteneciendo la mayor parte a Argentina. Cabe mencionar que este territorio de la Antártida es la que alberga la mayor cantidad de bases, donde Argentina y Chile poseen asentamientos con población civil todo el año. (Vlček et al., 2017). La huella humana en este continente está empezando a estresar los frágiles ecosistemas polares y existe una creciente preocupación sobre las amenazas que atenazan a los sistemas continentales naturales.

La península Fildes (62° 11' S, 58° 58' W) se encuentra ubicada en el extremo suroeste de la Isla Rey Jorge, archipiélago Shetland del Sur (Vieira et al., 2015), frente a la Península Antártica. Debido a la historia glacial y neotectónica la península Fildes posee un gran número de playas elevadas y cuencas aisladas en altitudes inferiores a 20 metros, concentrando de esa manera gran cantidad de lagos, humedales y depósitos del periodo holocénico (Watcham et al., 2011). Siendo los lagos un rasgo característico de la Península de Fildes (Quesada et al., 2006; Vincent et al., 2008), la cual presenta ocupación humana permanente, siendo una de las zonas más densamente pobladas de la Antártida.

3.2. Muestreo

Las muestras de sedimento fueron recolectadas en los lagos que han sido o son utilizadas como suministro de agua, situados cerca de las bases internacionales de la Península Fildes, fueron obtenidas en diciembre de 2016 a través del proyecto “*Una evaluación de los impactos de las bases antárticas en los ecosistemas acuáticos de la Península Fildes*”, financiado por el INACH (Tabla 2).

Tabla 2. Lugares de toma de muestra de sedimentos.

Sitio de toma de muestra	Coordenadas	Características
Lago Kitiash	62° 12' 3.6" S; 58° 58' 22.1" W	Abastece de agua potable a las Estaciones Frei y Bellingshausen
Lago Xihu	62° 13' 1.7" S, 58° 57' 57.3" O	Fuente de agua potable para la Estación de Great Wall
Lago Uruguay	62° 11' 6,6" S, 58° 54' 42,8" O	Abastece a la Base Artigas
Lago Hotel	62° 11' 40.4" S, 58° 58' 42.2" W	Antes era suministro del Aeropuerto del Pantano Teniente, pero debido a la contaminación (Peter et al.) ya no se utiliza. Se extraerá el núcleo para determinar el grado de cambio geoquímico durante el período de impacto antropogénico

Fuente: Información extraída del proyecto *“Una evaluación de los impactos de las bases antárticas en los ecosistemas acuáticos de la Península Fildes”*.

3.3. Análisis de Laboratorio

El análisis de los metales pesados en los sedimentos lacustres de la Península Fildes, se realizará mediante ICP (Inductively Coupled Plasma), específicamente la espectroscopia de emisión óptica ICP (ICP-OES), en el laboratorio de Química Ambiental del Centro EULA-Chile. Este análisis abarcará tres de los cuatro objetivos específicos.

El análisis ICP es un potente método de análisis químico que puede utilizarse para identificar tanto las trazas como las concentraciones principales de casi todos los elementos de una muestra. Las muestras líquidas y gaseosas pueden inyectarse directamente en el instrumento, pero las muestras sólidas necesitan extracción o digestión ácida para que los analitos estén presentes en la solución (Hou and Jones, 2000).

Los metales pesados, indicadores de la contaminación antropogénica del lago, se determinarán mediante espectrometría de emisión óptica ICP (ICP-OES). Esta es una de las herramientas analíticas más potentes y populares para la determinación de oligoelementos (Hou and Jones, 2000).

En la Tabla 3, se puede apreciar una lista de elementos que pueden ser determinados por este análisis de sedimentos, donde se encuentra los metales de interés a analizar en este estudio (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg).

Tabla 3. Lista de elementos que pueden ser determinados por ICP/OES

Alcalinos y alcalinotérreos	Tierras raras	Metales de transición	Otros
Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba	Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th, U	Se, V, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Nb, Zr, Mo, Ru, Th, Pd, Ag, Cd, La, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg	B, C, N, Al, Si, P, S, Cl, Ga, Ge, As, Se, Br, In, Sn, Sb, Te, I, Tl, Pb, Bi

Fuente: Extraído del informe “Inductively Coupled Plasma/Optical Emission Spectrometry” (Hou and Jones, 2000).

- **Objetivo 1: Análisis histórico de la ocupación de las bases antárticas en la Península Fildes.**

Para el desarrollo de este objetivo, se realizó una revisión bibliográfica buscando información mediante:

- Atlas Antártico 1993, del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- Artículo “Próceres de la Independencia Nacional” del Memorial del Ejército de Chile.
- Artículo “Significados en torno al territorio antártico chileno por parte de docentes de Historia, Geografía y Ciencias Sociales del Liceo Manuel Barros Borgoño”.

- Información recolectada de estudios científicos proporcionados por universidades, privados y diversas plataformas.

Con el fin de tener un conocimiento cronológico de cuando han sido instaladas las bases antárticas en la Península Fildes y poder determinar si estas han afectado las concentraciones de los metales pesados de interés en los sedimentos de los lagos Hotel, Xihu, Kitiesh y Uruguay. Además de observar si existen diferencias significativas entre las concentraciones obtenidas de cada metal y sus concentraciones basales respectivas anterior a la instalación de bases antárticas como la Base presidente Eduardo Frei Montalva, la Base Aérea teniente Rodolfo Marsh Martin, Estación Marítima Bahía Fildes, la Base Profesor Julio Escudero (ex Refugio Fildes), Base Escudero, la Base Bellingshausen de Rusia, la base de China llamada Base Gran Muralla, la Base Artigas de Uruguay, los diversos refugios y el aeródromo.

- **Objetivo 2: Determinar la concentración de metales pesados en testigos de sedimentos lacustres de la Península Fildes.**

Para la determinación de las concentraciones de los metales pesados en las muestras de sedimentos de los lagos de la Península Fildes, se realizaron dos grandes procedimientos: la digestión ácida y el análisis en ICP.

La digestión ácida es el proceso donde se prepara la muestra, pasándola de un estado sólido (sedimentos) a un estado líquido para poder analizarla en el equipo ICP. Se realiza para todos los metales, aunque para el Hg se utiliza menos gramos de muestra y un procedimiento diferente.

El procedimiento de digestión ácida para todos los metales menos el mercurio, se llevó a cabo pesando 1,0 gramo de cada muestra de sedimento y estándares certificados MEES y PACS como control, con el fin de obtener buenos resultados y también debido al escaso volumen de muestra que existía. A esto se le agregaron los analitos a identificar, ácido clorhídrico y ácido nítrico principalmente, para luego

de diversos procesos pasar la muestra filtrada a un matraz para su análisis en ICP.

En el caso de la digestión del mercurio, se utilizaron 0,2 gramos de cada muestra y estándares certificados MESS Y PACS, los cuales poseen concentraciones conocidas de metales. A esto se le agregó mercurio estándar, agua destilada, agua regia (combinación de ácido clorhídrico y nítrico) y permanganato de potasio principalmente. Y luego de pasar por baños de maría, se filtró y pasó a un matraz para su posterior análisis en ICP.

Para la lectura de las muestras a través de ICP (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente) se utilizó el equipo ICP-OES Optima 8000 (figura 3) y, se llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

Se utilizaron estándares con concentraciones conocidas de los metales a analizar. Estos estándares se utilizaron para crear una curva de calibración que proporcionó una referencia precisa para la lectura de las muestras. La curva de calibración se basó en las concentraciones conocidas de los estándares y se utilizó como una guía para cuantificar las concentraciones de metales en las muestras.

Para la lectura del mercurio, se prepararon las muestras mediante la adición de ácido clorhídrico y NaCl (cloruro de sodio). Además, se realizó una solución de borohidruro para una lectura más precisa de las concentraciones de mercurio en las muestras.

La lectura del arsénico se llevó a cabo utilizando el método de arsénico borohidruro. En este proceso, a las muestras a las que previamente se les realizó una digestión, se les agregó ácido clorhídrico, yoduro de potasio y ácido ascórbico. Estos reactivos permitieron preparar las muestras para su análisis mediante ICP. Adicionalmente, se utilizó una solución de borohidruro para alimentar de manera adecuada el equipo ICP y obtener resultados precisos.

Este proceso es fundamental para obtener datos fiables sobre la presencia de metales As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg en los sedimentos de los cuerpos de agua analizados.

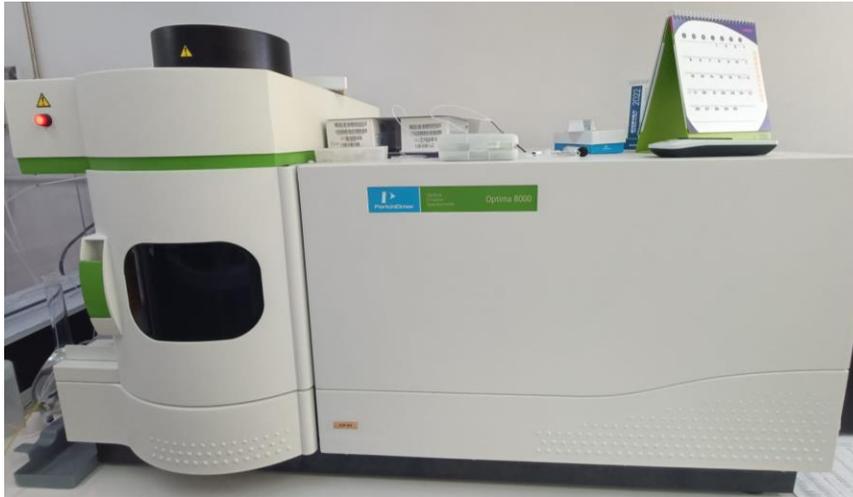


Figura 3. ICP-OES Optima 8000

Fuente: Fotografía propia.

Este proceso funciona mediante la propiedad física-química de los átomos a excitarse por la exposición a la radiación. Para esto se aplica energía en forma de temperatura elevada (aprox. 10.000 k), que se consigue con un plasma de argón. Es ahí donde la muestra se introduce y se mezcla con el plasma excitando los átomos que se quieren analizar, liberando fotones. Estos tienen energías características que están determinadas por la estructura de niveles de energía cuantificada para cada tipo de átomo o ion. Así, la longitud de onda de los fotones puede utilizarse para identificar los elementos de los que proceden. El número total de fotones es directamente proporcional a la concentración del elemento originario en la muestra.

Una parte de los fotones emitidos por el ICP se recoge con un sistema de espejo óptico cóncavo que forma una imagen en la apertura de entrada de un dispositivo de selección de longitud de onda, como un monocromador. La longitud de onda particular de la luz que sale del monocromador se convierte en una señal eléctrica

mediante un fotodetector, la cual es procesada y almacenada por una computadora (Hou and Jones, 2000).

Cabe mencionar que cada elemento tiene una longitud de onda distinta y cada elemento puede tener más de una longitud de onda. El ICP va leyendo a distintas longitudes de onda y puede ser de un elemento o de distintos elementos. De esta manera, el equipo realiza una curva de calibración proporcional para ver las concentraciones de los metales pesados.

- **Objetivo 3: Establecer los niveles basales de metales pesados en la Península de Fildes.**

En el caso de los lagos, los sedimentos se van acumulando y los sedimentos del fondo son más antiguos que los superficiales que son más jóvenes. Por lo tanto, el nivel basal es la concentración de los sedimentos antes que llegaran y se establecieran las bases antárticas, porque ahí no hay intervención humana, no hay ningún tipo de actividad que se pudiera asociar a que existiera contaminantes en la antártica, a menos que sean procesos naturales como erupciones, deslizamientos de tierra dispersión atmosférica, entre otros.

Para llevar a cabo este proceso, se contó con columnas de sedimentos cortadas cada 0,3 cm (3 milímetros), donde cada uno de los cortes corresponde a un periodo de años aproximado, como se ilustra en la Figura 4. Para realizar las dataciones de los años de las muestras de sedimentos correspondientes, se utilizó la Memoria elaborada por Samuel Yergeau (2021) como principal referencia.

A través del análisis de las concentraciones de metales pesados en las muestras de sedimentos, obtenidas mediante la técnica de ICP (Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente), y considerando la información proporcionada por el análisis histórico, se determinó el nivel basal de los metales pesados de cada lago.

Se examinaron los metales a estudiar en 15 muestras de sedimentos, abarcando una cantidad suficiente de muestras (milímetros/centímetros) para tener mediciones antes de la llegada de las bases y después de su establecimiento. Esto permitió evaluar los cambios que existieron en las concentraciones de metales pesados cuando las bases estuvieron operativas. Este enfoque ayudó a comprender mejor el impacto de la presencia de las bases en el entorno sedimentario de la región estudiada.

Para esto se seleccionaron un conjunto de las últimas cuatro muestras de cada metal en cada lago respectivo, las cuales mostraron concentraciones no muy distantes unas de otras, con poca diferencia significativa entre ellas y que presentaban constancia. Además de esto, se eligieron estas muestras con el propósito de que existiera una uniformidad en las concentraciones basales.

A las últimas cuatro concentraciones seleccionadas de cada elemento, se promediaron obteniendo un resultado el cual se determinó como la concentración basal del metal respectivo para cada uno de los cuatro lagos.

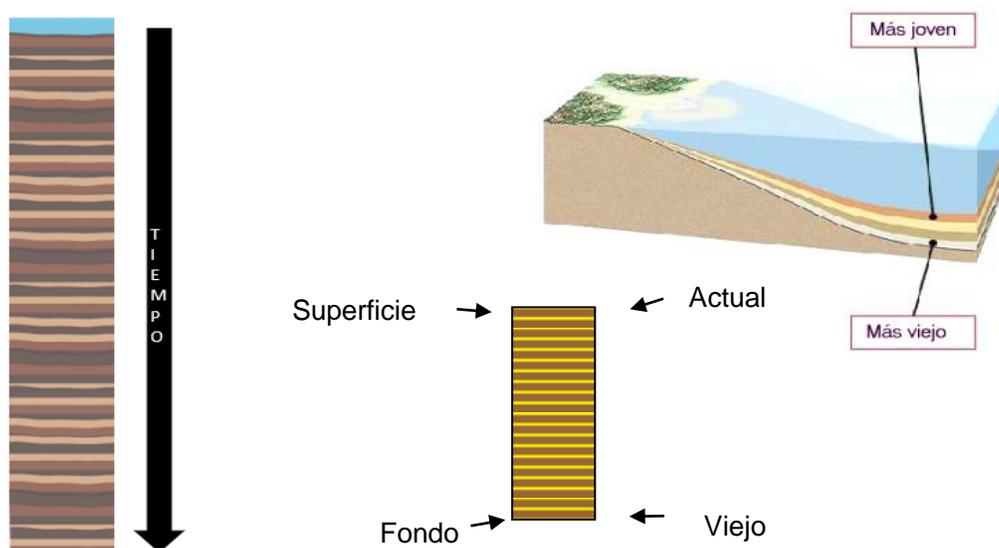


Figura 4. Ejemplo de Columna de Sedimentos

Fuente: Imagen extraída de "Registro sedimentario de los últimos ca. 17000 años del lago de Zirahuén, Michoacán, México" (Vázquez et al., 2010).

- **Objetivo 4: Determinar el impacto de las bases antárticas sobre el contenido de metales pesados en los ecosistemas lacustres de la península Antártica.**

Para evaluar el impacto de las bases antárticas en las concentraciones de metales pesados en los sedimentos de los cuatro lagos, se llevó a cabo un análisis detallado de las concentraciones obtenidas mediante ICP. Este análisis incluyó la determinación del periodo de años al que aproximadamente correspondían las muestras, lo que permitió discernir si los niveles de cada metal en las muestras eran anteriores o posteriores a la llegada de las bases científicas y la actividad antrópica en la región.

La combinación de los resultados del análisis ICP con la investigación bibliográfica de las bases científicas (análisis histórico de las bases en la Península Fildes), arrojó luz sobre cómo y en qué medida la actividad humana ha influido en las concentraciones de metales en los sedimentos de los lagos Hotel, Xihu, Kitiesh y Uruguay a lo largo del tiempo. Esto ayudó a identificar la contribución de las bases científicas y otras actividades antrópicas en la variación de las concentraciones de metales.

Además de evaluar la influencia de la actividad humana, también se investigaron posibles perturbaciones naturales, como erupciones volcánicas registradas, que podrían haber afectado las concentraciones de metales pesados en los sedimentos de los lagos. Este enfoque permitió comprender la interacción compleja entre factores naturales y antropogénicos en la dinámica de los metales en el ambiente acuático de la región.

Para una evaluación más completa, se aplicaron índices de contaminación, como el Índice de Geoacumulación (Igeo), el Factor de Enriquecimiento (FE) y el Índice de Carga Contaminante (PLI), a las concentraciones obtenidas. Estos índices proporcionaron información adicional sobre la existencia, el grado y el origen de la

contaminación por cada metal en cada lago respectivo. Ayudaron a cuantificar y calificar la contaminación, lo que fue esencial para comprender el estado de los sedimentos y cuerpos de agua en la región de la Península Fildes.

Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico entre las concentraciones obtenidas y las concentraciones basales determinadas para ver la existencia de diferencias significativas entre estas.

Este enfoque interdisciplinario que combina análisis químicos, investigaciones históricas, la aplicación de índices de contaminación y análisis estadístico, proporcionó una comprensión integral de cómo la actividad humana y los factores naturales han influido en las concentraciones de metales pesados en los lagos antárticos, lo que es fundamental para la protección y conservación de estos ecosistemas únicos.

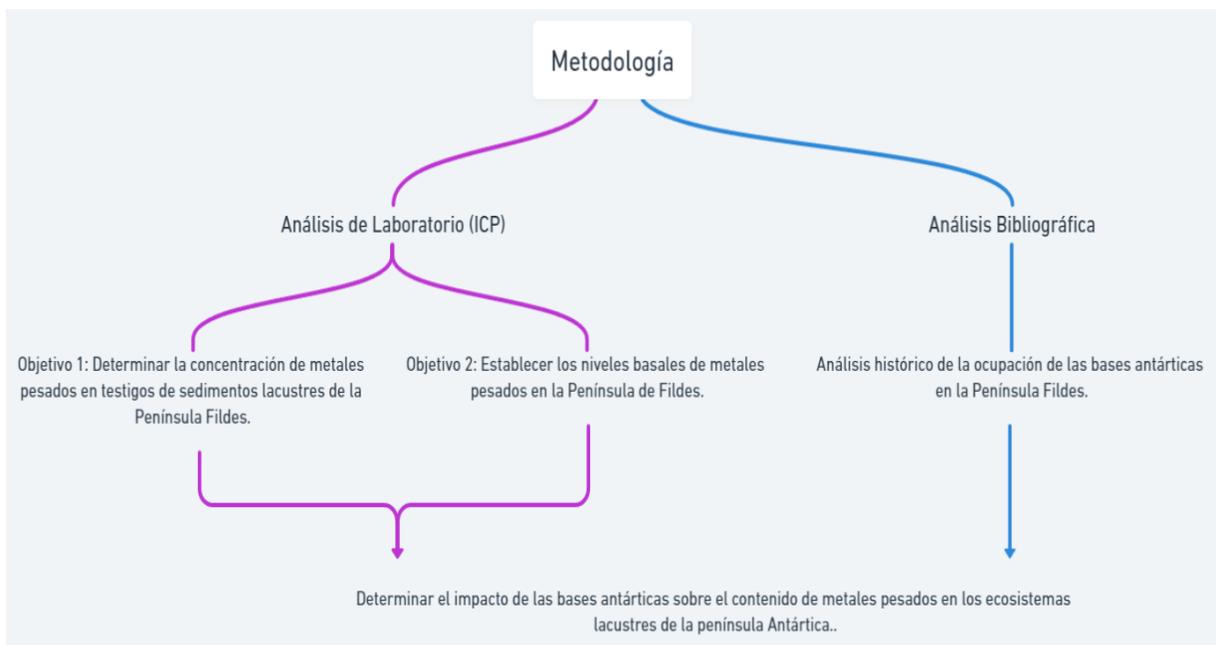


Figura 5. Diagrama Resumen de Metodología

Fuente: Elaboración Propia.

3.4. Índices de contaminación

3.4.1. Factor de Enriquecimiento (FE)

El factor de enriquecimiento identifica anomalías en concentraciones de metales, tomando en cuenta el enriquecimiento atribuido por efectos de acciones antrópicas en relación con un elemento conservativo (elemento resistente a ciclos geoquímicos) (Muyulema-Allaica, 2019). Comparando valores medidos y valores de fondo o prehistóricos (Cabrera, 2018; Querol-Suñé, 2019; Muyulema-Allaica, 2019; Oluwagbenga, Tunde y Funsho, 2019). El FE se utiliza como referencia para imputar la fuente de contaminación de algunas sustancias de acuerdo con una escala numérica como se observa en la Tabla 4. De esta manera se evalúa un posible impacto ambiental de origen antropogénico (Quevedo, 2014)

La fórmula del factor de enriquecimiento está representada como:

$$FE = (X/Zn) \text{ muestra} / (X/Zn) \text{ corteza}$$

Ecuación 1. Factor de Enriquecimiento

Donde:

- **Xm**: Concentración del metal
- **Xb**: Concentración basal o natural local
- **Zn m**: Concentración de Zinc en la muestra
- **Zn b**: Concentración de Zinc basal o natural

(Xm/Zn) muestra / (Xb/Zn) corteza denotan la relación de la concentración del metal con la del zinc proveniente de la muestra y en la corteza terrestre respectivamente (del Aguila Juárez, 2005)

Con lo establecido en la Tabla 8 (Lawson y Winchester, 1979) se determina cuál es el origen del elemento en estudio (del Aguila Juárez, 2005). Además, con la Tabla 5 realizada bajo los criterios de Barbieri (2016), es posible interpretar el

grado de contaminación (Muyulema-Allaica, 2019). Adicionalmente, se le asignaron colores a la interpretación para una mayor comprensión.

Tabla 4. Clases de factores de enriquecimiento de un metal pesado.

Clases de FE	Origen del Elemento X (metal pesado)
1 - 10	De la roca madre
10 - 500	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre
>500	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico

Fuente: Del Águila et al., 2005; Lawson y Winchester (1979)

Tabla 5. Interpretación del Factor de Enriquecimiento.

Valor	Interpretación	
$FE \leq 2$	Enriquecimiento Mínimo	
$2 \leq FE \leq 5$	Enriquecimiento Moderado	
$5 \leq FE \leq 20$	Enriquecimiento Significante	
$20 \leq FE \leq 40$	Enriquecimiento muy elevado	
$FE \geq 40$	Enriquecimiento Extremadamente Alto	

Fuente: Barbieri (2016); Muyulema-Allaica (2019)

3.4.2. Índice de Geoacumulación (Igeo)

El índice de geoacumulación denota en una escala cualitativa el grado de contaminación metálica en suelos por sustancias orgánicas e inorgánicas, mediante la comparación de valores de concentraciones medidas y valores de fondo. (Cáceres et al., 2013; Del Águila et al., 2005; Loska et al., 1997; Moreira y Boaventura, 2003; Muyulema-Allaica, 2019).

Este índice se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1,5 B_n)$$

Ecuación 2. Índice de Geoacumulación

Donde:

- **C_n** es la concentración del metal analizado en la muestra
- **B_n** es la referencia regional y/o valor de fondo en los sedimentos de la zona estudiada.

Una vez calculado el índice de I_{geo}, se interpreta sus resultados bajo los criterios de Cáceres et al., (2013); Cabrera (2018), mismos que se presentan en la Tabla 6. Y para un mayor entendimiento de los resultados obtenidos, se asignaron colores a cada grado de contaminación respectivo.

Tabla 6. Interpretación del Índice de Geoacumulación

Valor de I _{geo}	Clases de I _{geo}	Grado de Contaminación	
0	I _{geo} < 0	No contaminado	
1	0 < I _{geo} < 1	No contaminado a moderadamente contaminado	
2	1 < I _{geo} < 2	Moderadamente contaminado	
3	2 < I _{geo} < 3	De moderado a fuertemente contaminado	
4	3 < I _{geo} < 4	Fuertemente contaminado	
5	4 < I _{geo} < 5	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado	
6	5 < I _{geo}	Extremadamente contaminado	

Fuente: Cáceres et al., (2013); Cabrera (2018); Del Águila et al., 2005; Loska et al., (1997).

3.4.3. Índice de carga contaminante (PLI)

El índice de carga contaminante evalúa el nivel de carga de contaminación en una muestra para un total de elementos metálicos analizados en una muestra. A diferencia de los índices Igeo y FE, que determinan la contaminación de un solo elemento. (Muyulema-Allaica et al., 2019; Pejman, et al., 2015).

$$PLI = \sqrt[n]{(Cf\ 1 \times Cf\ 2 \times Cf\ 3 \times \dots \times Cf\ n)}$$

$$Cfi = \frac{Cm}{Cb}$$

Ecuación 3. Índice de carga contaminante

Donde:

- **Cf:** Concentración de un metal en la muestra
- **Cm:** Concentración medida de un metal
- **Cb:** Concentración de fondo de un metal en los sedimentos de la zona estudiada

La Tabla 7, presenta la interpretación del índice PLI, bajo los criterios de Pejman et al., (2015). Además, se muestra la selección de colores para mayor entendimiento de la interpretación de los resultados obtenidos.

Tabla 7. Interpretación del Índice de carga contaminante.

Valor	Interpretación	
PLI > 1	Existencia de Contaminación	
PLI < 1	Ausencia de Contaminación	
PLI > 2, 3, 4	Deterioro Progresivo	

Fuente: Muyulema-Allaica et al., 2019; Pejman et al., (2015)

3.5. Análisis Estadístico

Para realizar el análisis estadístico, se ocupará la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, con el fin de evaluar las concentraciones obtenidas. Esta prueba permitirá determinar si las concentraciones exhibían una distribución normal (paramétrica) o una distribución no paramétrica.

Luego, con base en los resultados que se obtendrán a través del análisis de normalidad, se procederá a aplicar pruebas estadísticas, ya sea la prueba T de Student o la prueba U de Mann-Whitney, dependiendo de la naturaleza paramétrica o no paramétrica de los datos.

En aquellos casos en los que se verificará la normalidad de la distribución, se realizará una prueba adicional de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene, con el fin de evaluar la similitud de las medias entre los grupos. Posteriormente, se aplicará la prueba T de Student.

Por otro lado, cuando los datos no cumplan con los supuestos de normalidad, se optará por la prueba U de Mann-Whitney Wilcoxon para comparar los metales a los cuales se les habían identificado niveles basales, para examinar la existencia de diferencias significativas en las medianas de los resultados que se obtendrán de las muestras de cada uno de los cuatro lagos analizados para los elementos de cadmio, cromo, cobre, plomo, níquel, mercurio, arsénico y zinc.

Según la hipótesis creada, la concentración de los metales pesados puede variar en los sitios de las muestras y también mientras estas son tomadas más cerca de los estratos superficiales, por lo que las concentraciones serían diferentes dependiendo de donde es la muestra y de cuán cerca de los estratos superficiales fue tomada.

Por esto se utilizará este método para comprar y determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones basales y las concentraciones obtenidas, para ver la variación que han tenido.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este informe se estructuró en base al desarrollo de cuatro objetivos específicos, los cuales se abordaron a través de análisis de laboratorio y la investigación de información bibliográfica en la literatura científica. Los resultados obtenidos se presentarán de manera detallada, vinculándolos con cada uno de estos objetivos específicos.

- **Objetivo 1: Análisis histórico de la ocupación de las bases antárticas en la Península Fildes.**

La Península de Fildes es un área ubicada en la isla Rey Jorge, en el archipiélago de las Shetland del Sur, en la Antártida. Es conocida por albergar la mayor concentración de diversas instalaciones científicas y bases de investigación de diferentes países que realizan investigaciones en el continente Antártico. En este contexto, Chile destaca como el país que posee la mayor cantidad de instalaciones en dicha península.

En la actualidad, la Península de Fildes alberga seis bases científicas permanentes, lo que la convierte en una de las zonas con mayor concentración de población de la Antártida en términos de instalaciones y personal de investigación. Esta concentración de bases permanentes en la península refleja la importancia estratégica de esta región para la comunidad científica internacional. Las bases científicas presentes en la Península de Fildes representan una plataforma clave para llevar a cabo investigaciones multidisciplinarias, abordando temas como el cambio climático, la biología polar, la geología, la meteorología y otros campos de estudio relevantes para comprender mejor el entorno antártico y sus implicaciones globales. Para esto se ha instalado una gran infraestructura que da soporte a estas bases, la cual incluye un aeropuerto, carreteras, tuberías y generadores diésel. La construcción y funcionamiento de estas infraestructuras ha causado una

perturbación considerable en el medioambiente antártico, aunque hay un gran desconocimiento sobre el alcance preciso de los efectos de estas perturbaciones.

En octubre de 1819 con el primer desembarco registrado en las islas Shetland del Sur que fue en la costa noreste de la isla Rey Jorge por William Smith, comenzó el establecimiento de las bases y el aumento de la población permanente (Barton 1965). Hoy en día, hay seis estaciones permanentes en la península, que acogen hasta 300 personas en el pico de ocupación del verano austral. Estas estaciones pertenecen a Chile, China, Rusia y Uruguay y todas fueron construidas entre 1968 y 1994 (Braun et al. 2012; COMNAP 2018).

A continuación, se presenta un orden cronológico de las principales bases científicas en la Península de Fildes:

1. Base Artigas (Uruguay): Fue inaugurada el 22 de diciembre de 1984 y es la primera base antártica permanente de Uruguay. Se encuentra en la isla Rey Jorge, en la bahía de Uruguay, con coordenadas 62°11'S 58°54'O. En enero de 1984 se decidió la ubicación de la estación y en diciembre del mismo año se construyó el primer edificio. Posteriormente en 1987 se construyó un nuevo módulo habitacional y un sistema de agua conectado con el lago Uruguay.

2. Base Escudero (Chile): Es el ex Refugio Fildes, el cual comenzó en 1975 con la instalación de un grupo de contenedores para apoyar los estudios científicos que se realizaban. En 1990 se comenzaron a agregar módulos nuevos para, posteriormente, en 1994 comenzar a construir el primer módulo habitacional dando paso a la Base Profesor Julio Escudero que fue inaugurada oficialmente el 5 de febrero de 1995. Esta base es una base de investigación científica y militar que es operada por el Instituto Antártico Chileno. Está ubicada en el cabo Shirreff, en la costa noroeste de la isla Rey Jorge.

3. Base Frei (Chile): Fundada el 7 de marzo de 1969. Ubicada en la península Fildes en las coordenadas 62°11'27"S 58°59'12"O, sobre la costa de la caleta

Ardley en la bahía Maxwell. Comenzó a operar en 1969 como Centro Meteorológico Antártico Presidente Eduardo Frei Montalva. Al ampliarse las instalaciones se llamó "Base Teniente Rodolfo Marsh", manteniendo el centro meteorológico su nombre original. En la década de 1990 todo el conjunto pasó a llamarse Base Presidente Eduardo Frei Montalva. Es una estación científica chilena situada en la caleta Marian, en la bahía Fildes. Es una de las bases más grandes y cuenta con una pista de aterrizaje que permite el acceso a aviones de gran tamaño. Esta base es operada en la actualidad por la Fuerza Aérea de Chile y comprende el Centro Meteorológico Antártico Presidente Eduardo Frei Montalva, el núcleo poblacional Villa Las Estrellas, y la Base Aérea Teniente Rodolfo Marsh Martín. La Villa Las Estrellas contiene una escuela, un hospital, oficina de registro civil, oficina de correos, banco, biblioteca, emisora de radio FM, y una capilla católica, todo lo cual es también utilizado por personal de bases de otros países en el área y por turistas.

4. Estación Marítima Bahía Fildes: Inaugurada el 5 de enero de 1987. Es una capitania de puerto de la Armada de Chile, y se encuentra ubicada junto a Villa Las Estrellas.

5. Base Great Wall (China): Inaugurada el 20 de febrero de 1985, operando continuamente, es la primera base de investigación científica de China en la Antártida. Se encuentra en la isla Rey Jorge, cerca de la base chilena Frei, en las coordenadas 62°13'S 58°58'O.

6. Base Bellingshausen (Rusia): Se construyó el 22 de febrero de 1968, es la base antártica rusa más antigua en la isla Rey Jorge. Está ubicada en la bahía de Fildes y opera continuamente desde su inauguración. La Península Fildes (Figura 3) es una de las regiones de la Antártida con mayor densidad de bases militares o de investigación (Chu et al. 2019). Desde su construcción, la población permanente de la península ha aumentado gradualmente hasta alcanzar los 125 habitantes (COMNAP 2018).

7. Refugio Padre Rambo de Brasil: Establecido en el verano de 1984-1985 en las coordenadas 62°09'55"S;58°57'56"O. Posteriormente fue trasladado dejando una cruz conmemorativa en el lugar. Finalmente, en el año 2004 fue desmontado completamente.

8. Refugio Prioda (Rusia): Ubicado en las coordenadas 62°08'59"S;58°56'39"O fue construido en 1987.

9. Refugio Collins: Ubicado en la base de la península sobre la bahía Collins y al pie del glaciar Collins. Este refugio fue inaugurado en la temporada de 2006-2007 con el fin de reemplazar al refugio homónimo cedido a Uruguay en 1984 como apoyo a la construcción de su base y desarmado en 1989.

Es importante tener en cuenta que la presencia y el estado de las bases científicas pueden variar con el tiempo debido a las actividades de investigación y las políticas de los países involucrados. Es posible que existan otras bases científicas en la Península de Fildes que no se mencionen aquí, como bases de investigación temporal o de menor tamaño. Además, es posible que haya cambios en las bases existentes y se establezcan nuevas bases en el futuro.

A continuación, en las figuras 6 y 7 se presenta un detalle cronológico de la llegada de bases y refugios de menor tamaño que con el tiempo fueron desmantelados.



Figura 6. Orden Cronológico Bases y Refugios Península Fildes

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Orden Cronológico Bases y Refugios Península Fildes

Fuente: Elaboración propia.

- **Objetivo 2: Determinar la concentración de metales pesados en testigos de sedimentos lacustres de península Fildes.**

El análisis de las concentraciones de metales en las muestras se llevó a cabo mediante la técnica de ICP (Espectroscopía de Plasma Acoplado Inductivamente), seleccionando las 15 primeras muestras que contenían una cantidad adecuada de sedimentos para el análisis. Dentro de los metales a determinar se encuentra el cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo, zinc, arsénico y mercurio.

Es importante destacar que para realizar cada análisis es necesario que la muestra contenga como mínimo 1,20 gramos de sedimentos, es por esto por lo que no se realizaron los análisis de forma continua para los milímetros, debido a la insuficiente cantidad de sedimento disponible en algunos milímetros, no se realizaron análisis de forma continua en todos los puntos de la muestra.

Para el análisis de los metales pesados, lo que incluye el cobre, cromo, plomo, níquel, zinc, cadmio y arsénico, se extrajo una cantidad de 1,0 gramo de cada muestra. Además, en el caso del análisis de mercurio, se utilizó una cantidad específica de 0,2 gramos de cada muestra. Cabe mencionar que las muestras analizadas para los metales cromo, cadmio, arsénico, plomo, cobre, níquel y zinc fueron las mismas que se emplearon para llevar a cabo el análisis de mercurio.

Además, es importante tener en consideración los límites de detección del ICP (tabla 8), ya que estos representan los valores mínimos hasta los cuales el equipo puede leer con precisión las concentraciones de los metales analizados.

Los límites de detección son valores críticos, ya que indican la sensibilidad del ICP y marcan el umbral por debajo del cual las concentraciones de metales pueden no ser detectadas de manera confiable. Es decir, si las concentraciones de los metales en una muestra se encuentran por debajo de los límites de detección del ICP, es posible que no puedan ser cuantificadas de forma precisa y, por lo tanto, podrían quedar fuera de los resultados del análisis.

Tabla 8. Límites de Detección ICP

Metales	As	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn	Hg
Límites de Detección (mg/kg)	1,19 ug/kg	0,005	5,04	0,32	0,03	0,04	0,10	19,7 ug/kg

Fuente: Extraída de Manual de uso de equipo ICP-OES Optima 8000

A continuación, se presentan los resultados de las concentraciones obtenidas a partir de dicho análisis y lago respectivo.

Lago Hotel

Las muestras de sedimento del Lago Hotel, para las cuales se obtuvieron las concentraciones, abarcan una profundidad en la columna de sedimento de 0 a 51 milímetros.

Cabe mencionar que el lago Hotel, adyacente al aeropuerto del Pantano Teniente, dejó de utilizarse para agua potable debido a la contaminación (Peter et al. 2013). En 2011 fue drenado y rellenado en un esfuerzo por mejorar la calidad de su agua, sin embargo, su agua continuó siendo inadecuada como agua potable (Peter et al. 2013). No obstante, la obtención de las concentraciones de las muestras fue con la finalidad de determinar el grado de cambio geoquímico durante el periodo de impacto antropogénico.

A continuación, en la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos que revelaron las siguientes concentraciones de los elementos en el lago Hotel:

Tabla 9. Concentración metales en Lago Hotel

Muestra (mm)	Arsénico (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)
H0-3 mm	43,63	1,743	17,4	175,7	7,4	406,59	138,6	1123,747
H3-6 mm	31,17	0,977	18,8	137,9	6,1	286,50	121,2	563,918
H6-9	38,08	1,705	13,3	87,4	6,5	148,16	69,1	448,211

mm								
H15-18 mm	30,62	1,712	12,8	78,3	5,1	75,36	56,5	360,746
H18-21 mm	18,69	0,593	10,2	54,9	3,6	75,86	49,5	208,027
H21-24 mm	21,85	0,598	9,8	60,0	3,9	63,95	48,4	106,905
H24-27 mm	17,36	0,477	9,8	53,4	3,3	52,84	52,0	129,425
H27-30 mm	138,97	17,822	29,7	73,4	20,4	205,51	85,0	255,649
H30-33 mm	16,50	0,647	9,9	49,9	3,7	70,14	46,3	135,452
H33-36 mm	11,75	0,512	8,3	41,6	2,8	56,34	35,3	60,914
H36-39 mm	5,89	0,827	8,5	39,9	7,5	170,17	43,0	149,537
H39-42 mm	2,33	0,646	6,9	22,2	5,8	126,35	26,5	107,658
H42-45 mm	2,20	0,831	8,8	40,5	6,3	174,60	36,1	140,639
H45-48 mm	1,64	0,862	8,9	48,2	7,1	164,96	42,6	464,808
H48-51 mm	1,78	0,932	9,4	52,0	6,5	202,38	44,0	209,020

Fuente: Elaboración propia a partir de información obtenida analíticamente.

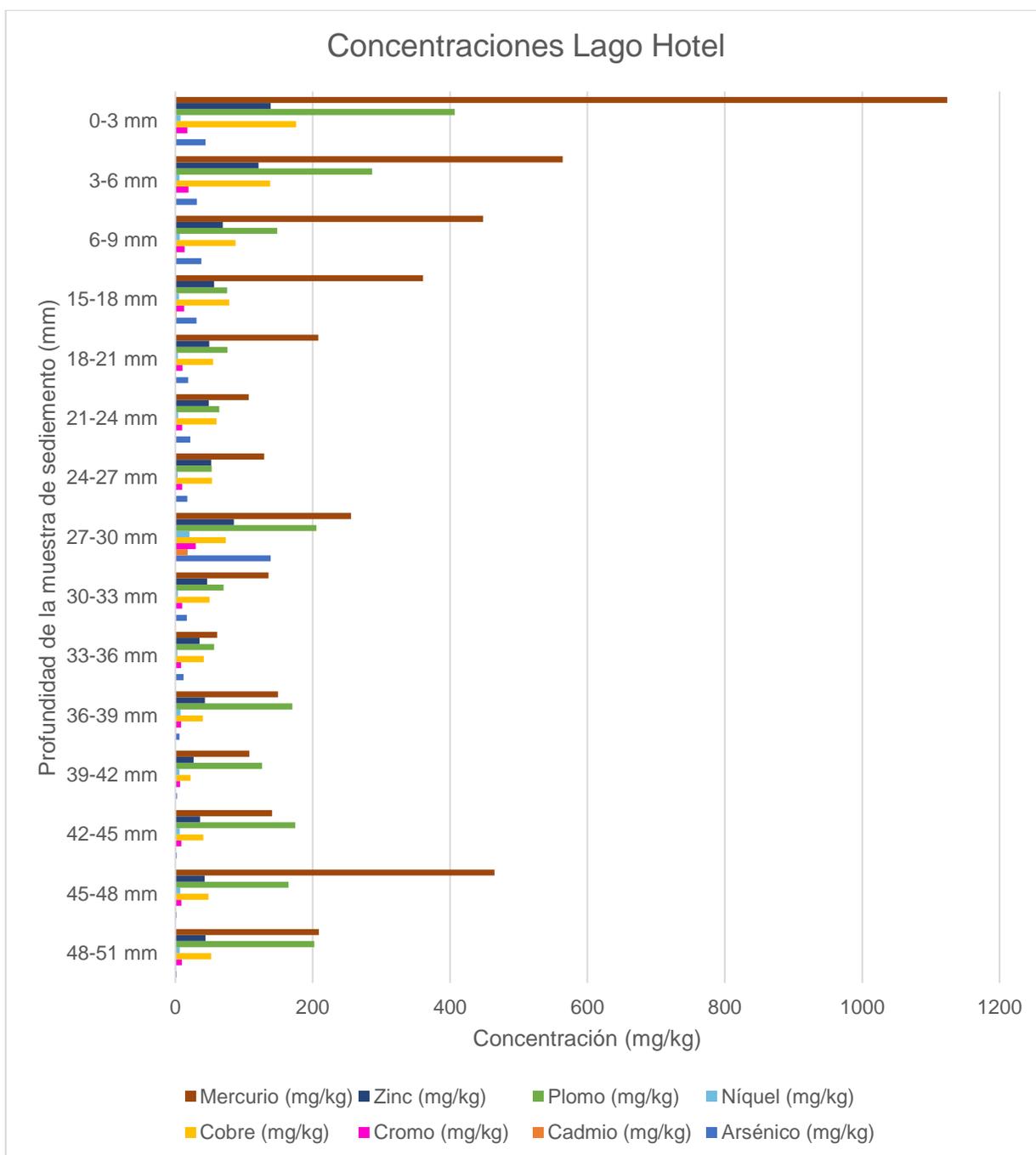


Figura 8. Gráfico de Concentraciones del Lago Hotel

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 9 y la figura 8 muestran las concentraciones de los metales analizados del lago Hotel. Mientras la tabla 9 muestra en detalle las concentraciones obtenidas de las muestras analizadas del lago Hotel, en la figura 8 se observa la variación presente en las concentraciones mientras se alcanza más profundidad de la muestra en la columna de sedimento.

De acuerdo con las concentraciones obtenidas de los metales pesados analizados para las muestras, se observa mediante la figura 8 que el mercurio y el plomo son los elementos que presentan las concentraciones más altas en la mayoría de las muestras, especialmente en las muestras más superficiales de la columna de sedimento.

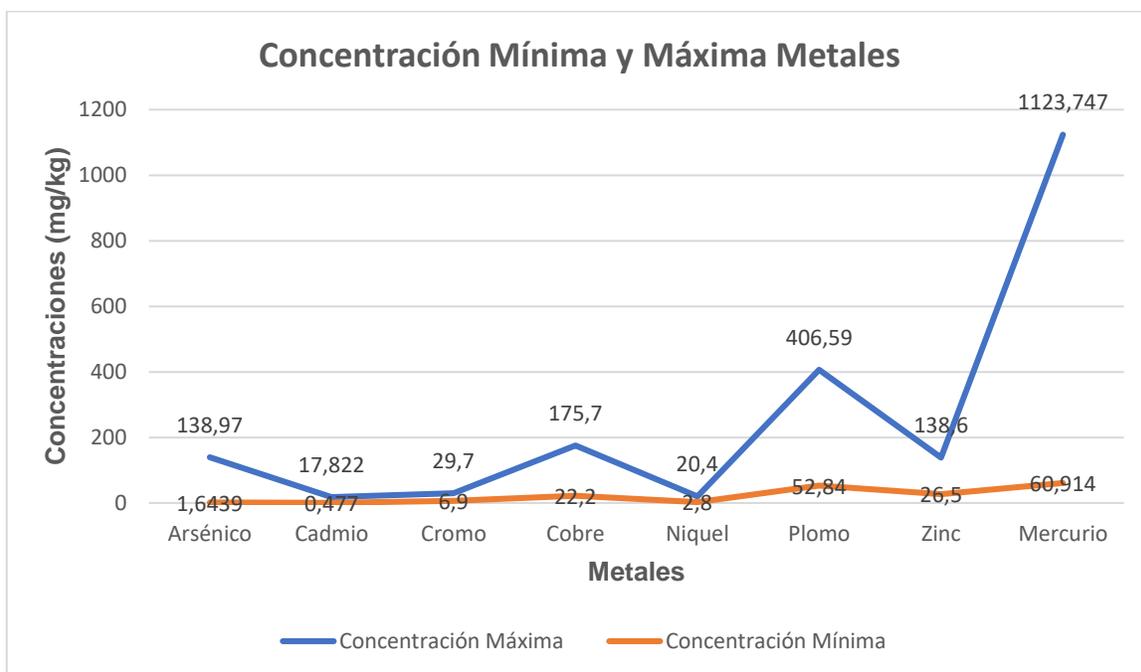


Figura 9. Valores de concentración máxima de metales pesados lago Hotel.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las concentraciones obtenidas de las muestras de sedimento del Lago Hotel, se muestran las concentraciones mínimas y máximas de cada metal analizado en la figura 9.

En los sedimentos del lago Hotel las concentraciones de arsénico son notoriamente elevadas en comparación con los valores iniciales, oscilando en un rango desde 1,6439 hasta 138,97 mg/kg, y con una concentración promedio de 25,50 mg/kg. Los niveles de cadmio varían en un rango más bajo, desde 0,477 mg/kg hasta 17,822 mg/kg, teniendo una concentración promedio en estas muestras de alrededor de 2,06 mg/kg. Aun así, las concentraciones de Cd siguen siendo comparativamente más bajas.

Respecto a las concentraciones de cromo, varían entre 6,9 mg/kg y 29,7 mg/kg, con un valor promedio en estas muestras de 12,17 mg/kg. Las concentraciones de Cr, en promedio, son más bajas que la de otros metales.

En el caso del cobre, sus concentraciones son significativamente altas presentando una variación desde 22,2 mg/kg hasta 175,7 mg/kg, y un nivel promedio de 67,69 mg/kg.

El níquel muestra un rango de variación de sus concentraciones más bajo, con una concentración mínima de 2,8 mg/kg a una concentración máxima de 20,4 mg/kg, y un valor promedio en estas muestras de 6,4 mg/kg. Estas concentraciones son variables, pero en promedio, más bajas que la mayoría de los metales analizados.

Las concentraciones del plomo presentan un rango desde 56,34 mg/kg hasta 406,59 mg/kg, y una concentración promedio de 151,98 mg/kg. Estas concentraciones son excepcionalmente altas, con valores muy superiores a los demás metales con excepción del mercurio.

Con respecto a las concentraciones del zinc, estas oscilan desde 26,5 mg/kg a 138,6 mg/kg, con un nivel promedio en estas muestras de 59,61 mg/kg. Las concentraciones de Zn son variadas, con algunos valores notoriamente altos.

Por último, el mercurio presenta la mayor diferencia entre sus concentraciones mínimas y máximas, mostrando un amplio rango de concentraciones desde 60,914 mg/kg hasta 1123,747 mg/kg, y un valor promedio de 297,64 mg/kg. Estas concentraciones son extremadamente altas en varias de las muestras y sugieren una posible contaminación importante, lo que indica una oscilación significativa en su presencia en diferentes momentos del lago.

Al comparar las concentraciones mínimas y máximas de cada metal, es posible observar que algunos metales, como el cromo y el níquel, tienen una diferencia relativamente menor en comparación con otros, como el mercurio y el plomo. Esto sugiere que la presencia de cromo y níquel puede ser más estable o menos influenciada por fuentes de contaminación en el lago.

Las altas concentraciones del plomo y el mercurio son preocupantes debido a que estos metales son conocidos por ser tóxicos y pueden representar un riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

Lago Xihu

Se realizaron análisis de las muestras de sedimentos extraídas del lago Xihu, abarcando un rango de profundidad en la columna de sedimento desde 0 a 63 milímetros. A continuación, se muestran las concentraciones obtenidas de dichas muestras en la siguiente tabla:

Tabla 10. Concentración de metales en Lago Xihu

Muestra (mm)	Arsénico (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)
X0-3 mm	55,9771	2,024	13,4	88,9	8,8	375,19	72,5	218,835
X9-12 mm	31,3738	1,556	10,8	88,2	6,9	380,36	54,1	177,498
X12-15 mm	34,2304	1,567	10,7	86,2	7,0	359,50	51,3	261,026
X15-18 mm	45,7710	1,806	12,0	95,1	7,9	391,77	59,4	275,773
X27-30 mm	23,5232	1,352	10,7	100,4	6,7	306,33	50,3	285,984
X30-33 mm	18,3250	1,206	10,1	107,5	6,6	244,44	52,2	167,955
X33-36 mm	13,0622	1,237	10,1	109,1	6,6	284,21	53,4	89,763
X36-39 mm	14,9416	1,236	11,6	113,1	6,5	184,07	53,6	153,721
X39-42 mm	16,1570	1,215	11,1	101,8	6,2	198,23	58,7	85,855
X42-45 mm	18,0212	1,292	12,3	113,7	6,8	178,35	55,0	116,711
X48-51 mm	23,9698	1,482	14,2	120,6	7,8	225,43	62,2	179,544
X51-54 mm	24,4387	1,397	13,2	109,1	7,4	151,67	56,1	90,250

X54-57 mm	20,8544	1,384	12,4	101,8	6,7	170,46	58,3	126,809
X57-60 mm	19,6277	1,465	12,7	110,5	6,9	181,27	58,6	73,182
X60-63 mm	17,0945	1,341	11,0	97,1	6,2	148,79	50,9	93,837

Fuente: Elaboración propia.

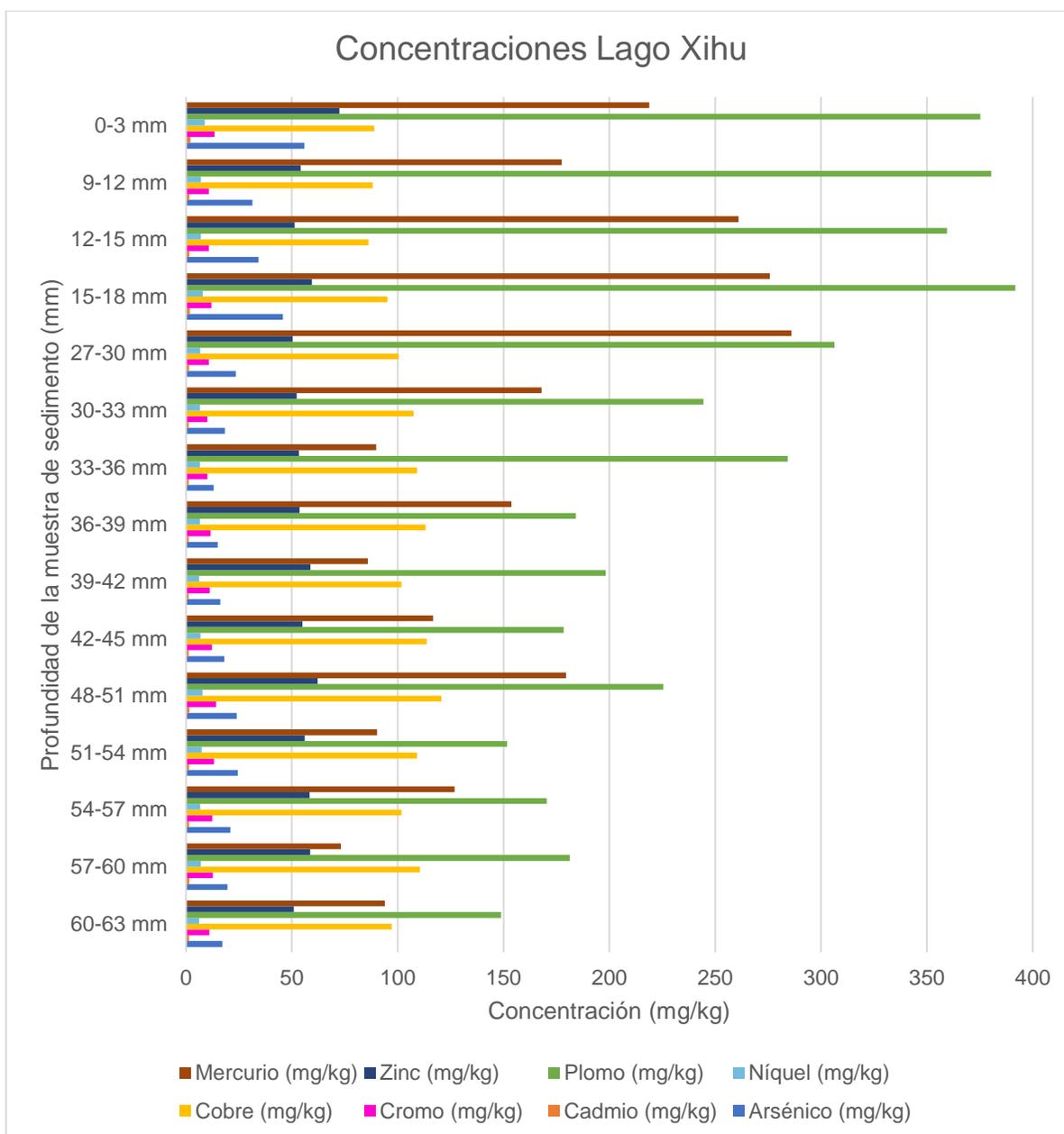


Figura 10. Gráfico de Concentraciones del Lago Xihu

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la tabla 10 y la figura 10 se observan las concentraciones obtenidas del lago Xihu. En la figura 10 se puede analizar con mayor claridad la variación que estas concentraciones tienen dependiendo la profundidad de la muestra analizada.

Respecto a las concentraciones obtenidas de cada muestra, el plomo es el elemento que muestra las concentraciones más altas en cada muestra, especialmente en las más superficiales, indicando una disminución de más del doble a medida que las muestras alcanzan más profundidad.

Además del plomo, el mercurio y el cobre son los metales que muestran altas concentraciones. El Cu presenta un comportamiento más uniforme con respecto a sus concentraciones, con leves variaciones entre sí. Por el contrario, el mercurio señala un comportamiento similar al plomo, disminuyendo su concentración a medida que se alcanza las muestras más profundas.

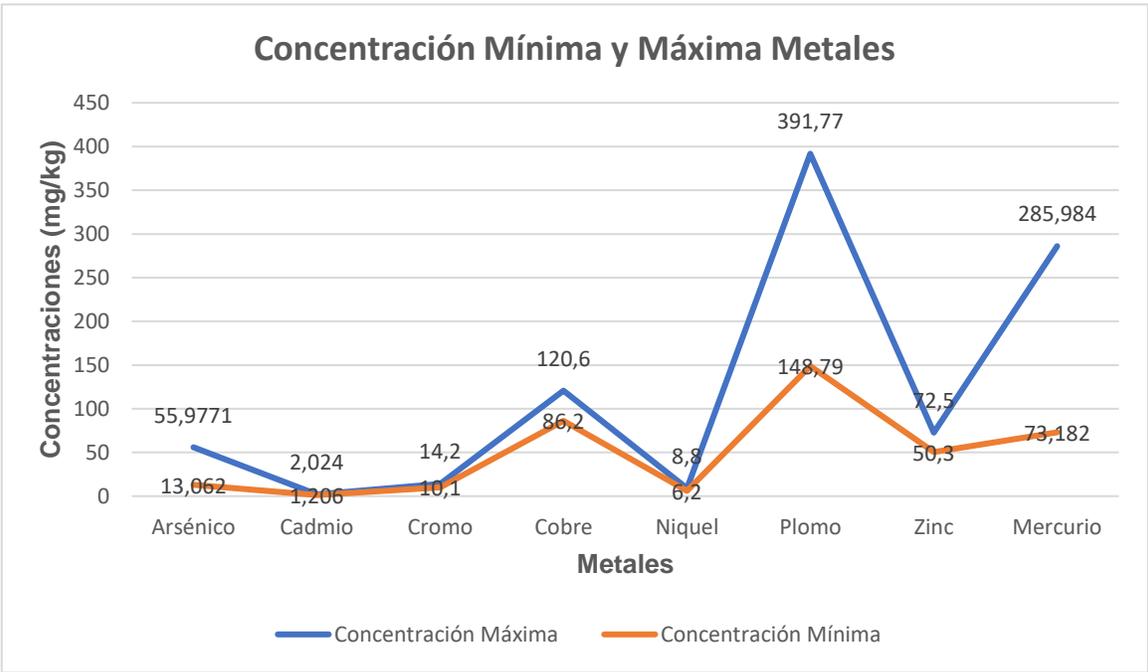


Figura 11. Valores de concentración máxima de metales pesados lago Xihu.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11 se puede observar una comparación entre las concentraciones mínimas y máximas de los metales, obteniendo para la mayoría de los metales que las concentraciones máximas son considerablemente más altas que las

mínimas, lo cual proporciona información sobre la variabilidad y la dispersión de las concentraciones del Lago Xihu.

Los metales plomo, cobre y mercurio muestran diferencias más pronunciadas entre sus concentraciones mínimas y máximas que otros metales. Estas diferencias pueden ser preocupantes, ya que revelan una mayor variabilidad en la presencia de estos elementos en el entorno analizado, lo que podría indicar fuentes de contaminación o condiciones ambientales adversas.

En el caso del plomo, se presentan concentraciones altas con una concentración máxima de 391,77 mg/kg, y una concentración mínima de 148,79 mg/kg, y un valor promedio de 252,01 mg/kg. Esta diferencia en magnitudes sugiere una variación significativa en la presencia de plomo en las muestras analizadas.

Las concentraciones de cobre varían desde 86,2 mg/kg hasta 120,6 mg/kg, y un nivel promedio en las muestras de 102,87 mg/kg. Sin embargo, sus concentraciones siguen siendo notables y se mantienen en cierto rango.

El mercurio muestra variabilidad y un rango amplio en sus concentraciones, desde 73,182 mg/kg hasta 285,984 mg/kg, teniendo un valor promedio de 159,78 mg/kg. Las concentraciones de Hg son notoriamente más altas que otros metales.

Con respecto al cadmio, sus concentraciones muestran variación en un rango más bajo, desde 1,206 mg/kg hasta 2,024 mg/kg, con una concentración promedio de 1,44 mg/kg. Las concentraciones de cadmio son consistentes y en general bajas.

Estos metales (Pb, Cd y Hg) son conocidos por ser tóxicos y pueden representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. La comparación entre concentraciones mínimas y máximas puede ayudar a entender la magnitud del riesgo potencial y a tomar decisiones informadas en términos de mitigación y regulación.

De acuerdo con las concentraciones de cromo, muestran una menor oscilación con una concentración máxima de 14,2 mg/kg y una concentración mínima de 10,1 mg/kg, obteniendo un valor promedio de 11,75 mg/kg. En cambio, el plomo tiene una oscilación más amplia que las concentraciones de cromo que son relativamente constantes, lo que indica que las concentraciones varían más entre diferentes muestras y presentan más perturbaciones.

El arsénico presenta concentraciones en estas muestras que son considerablemente elevadas, con un rango que va desde 13,0622 mg/kg hasta 55,9771 mg/kg. Además de una concentración promedio en las muestras de 25,16 mg/kg. Esto indica una presencia significativa de arsénico.

Las concentraciones de níquel varían en un rango más bajo, desde 6,2 mg/kg hasta 8,8 mg/kg, con un valor promedio en las muestras de 7,0 mg/kg. Los niveles de Ni son relativamente constantes y se mantienen bajo un cierto rango.

Con respecto a las concentraciones de zinc, estas varían en un rango desde 50,9 mg/kg hasta 72,5 mg/kg, y tienen un nivel promedio de 56,44 mg/kg. Las concentraciones de zinc son consistentes y en general más altas que otros metales.

Los metales, en ciertas concentraciones, pueden ser indicadores de dispersión de actividades industriales, descargas de aguas residuales o procesos naturales que pueden afectar la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. Con las concentraciones obtenidas de los metales en las muestras del lago Xihu es posible analizar la presencia y cantidad de estos elementos en los sedimentos del lago, con el fin de evaluar la calidad ambiental del lago y determinar posibles niveles de contaminación.

Lago Kitiesh

Mediante las muestras extraídas del Lago Kitiesh, se llevaron a cabo análisis en 15 muestras, abarcando una profundidad en la columna de sedimento que varió desde 0 hasta 111 milímetros. Se excluyeron aquellas muestras que no contenían una cantidad suficiente de sedimento para realizar el análisis correspondiente.

A continuación, se detallan las concentraciones obtenidas de las muestras del Lago Kitiesh:

Tabla 11. *Concentración de metales en Lago Kitiesh*

Muestra (mm)	Arsénico (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)
K0-3 mm	5,2398	1,710	14,952	78,284	11,405	34,097	56,613	359,678
K18-21 mm	4,8969	1,661	14,284	83,550	10,432	30,062	42,623	176,410
K48-51 mm	4,3139	1,880	14,710	67,407	8,364	32,139	36,277	93,818
K51-54 mm	2,9582	2,640	16,478	58,183	7,999	37,409	42,223	94,626
K57-60 mm	2,8499	2,837	17,411	65,713	8,287	43,843	46,471	66,322
K66-69 mm	2,9248	2,838	14,829	59,865	7,995	41,969	43,282	32,594
K72-75 mm	2,4498	1,930	11,895	43,545	7,095	28,234	36,073	24,045
K81-84 mm	1,8715	1,878	11,966	39,480	6,808	31,240	30,248	198,278

K84-87 mm	1,6975	2,139	10,469	34,209	7,490	31,752	28,889	85,691
K87-90 mm	2,7624	1,886	11,376	38,420	7,753	27,640	35,449	51,950
K96-99 mm	4,7136	1,756	14,693	78,818	12,021	30,909	49,778	59,280
K99-102 mm	7,2435	1,735	15,536	76,946	14,760	31,616	48,410	47,612
K102-105 mm	1,9913	1,250	12,315	45,599	10,890	25,831	37,858	40,682
K105-108 mm	0,9349	1,099	11,474	36,521	8,262	17,745	31,540	30,180
K108-111 mm	0,6757	1,175	10,498	34,461	8,421	25,156	31,473	24,730

Fuente: Elaboración propia.

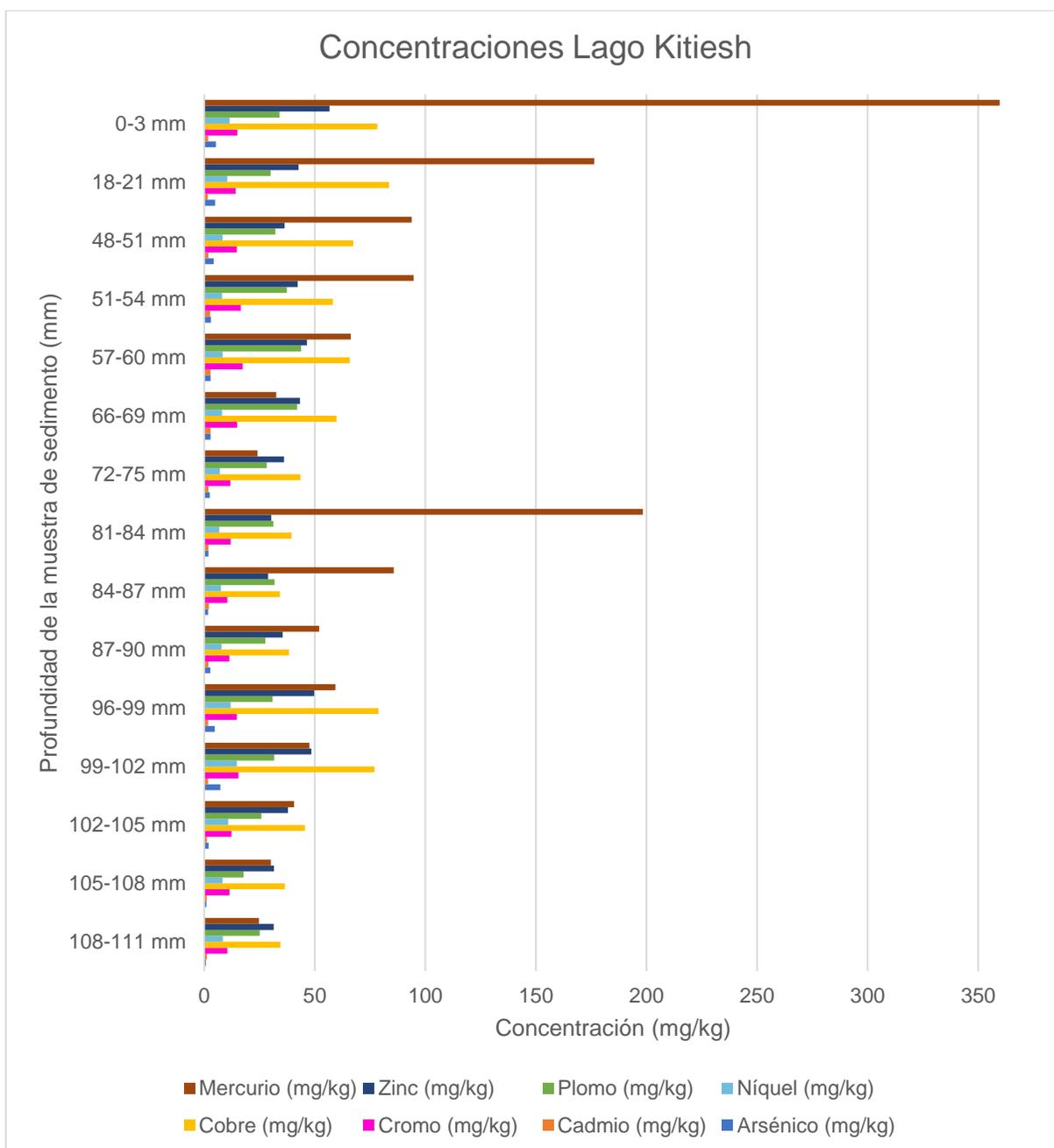


Figura 12. Gráfico de Concentraciones del Lago Kitiesh

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11 y la figura 12 se muestran las concentraciones obtenidas de las muestras analizadas del núcleo del Lago Kitiesh. Donde, en la figura 12 se ofrece

una comparación de las concentraciones de los metales a lo largo de la columna de sedimentos.

De los metales analizados, se destaca la alta concentración de mercurio, particularmente en las muestras más superficiales las cuales muestran la situación actual del sedimento. La figura 12 indica que, para la muestra 81-84 mm (8,1-8,4 cm), existe una perturbación en el comportamiento de las concentraciones del Hg, presentando un aumento exponencial, lo que se puede atribuir a algún evento ya sea natural o antrópico.

El cobre es otro elemento con concentraciones mayores, donde en las muestras más profundas de sedimento, supera las concentraciones de mercurio. De la misma forma que el comportamiento del Hg, el Cu muestra un aumento en su concentración, aunque de forma más leve, mientras más se acerca las muestras más superficiales.

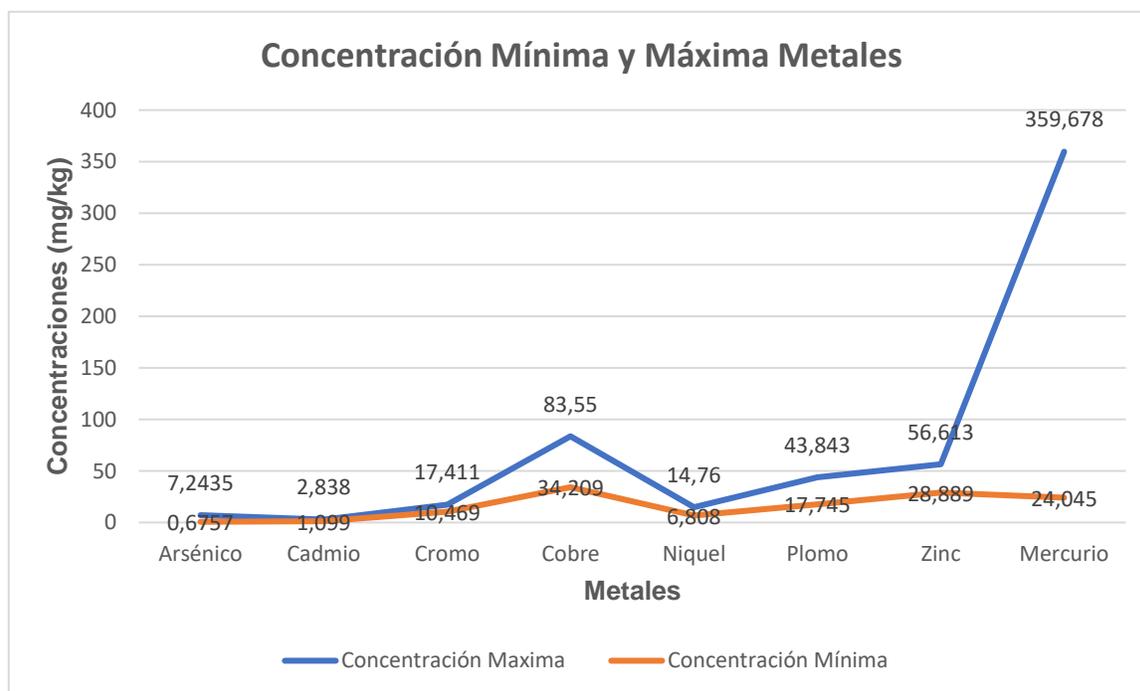


Figura 13. Valores de concentración máxima de metales pesados lago Kitiesh.

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las concentraciones máximas y mínimas de cada metal (figura 13), se observa la oscilación entre estos extremos. Esta variabilidad puede deberse a factores ambientales, geológicos y antropogénicos que afectan la distribución y presencia de los metales en el lago.

El mercurio muestra un amplio rango entre sus concentraciones desde 24,73 mg/kg hasta 359,678 mg/kg, lo que indica una variación significativa en su presencia en diferentes momentos (años) del lago y sugiere una posible contaminación importante. Este metal posee un valor promedio en las muestras de 92,39 mg/kg, sugiriendo concentraciones notables y con una amplia variabilidad.

Las concentraciones de cromo, aunque muestran un comportamiento consistente continúan siendo altas, con un rango entre 10,469 mg/kg y 17,411 mg/kg, y un nivel promedio de 13,53 mg/kg. Por otro lado, el cadmio presenta una variación con una concentración mínima de 1,099 mg/kg y una concentración máxima de 2,838 mg/kg, además de un promedio de las muestras de 1,89 mg/kg.

El cromo y el cadmio presentan una diferencia relativamente menor en comparación con el mercurio y el plomo. Esto sugiere que la presencia de cromo y cadmio puede ser más estable o menos influenciada por fuentes de contaminación puntuales en el lago.

En cambio, el plomo y el mercurio siguen siendo motivo de preocupación debido a las altas concentraciones máximas encontradas en el lago. Estos metales son conocidos por ser tóxicos y pueden representar un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente.

El plomo muestra un rango de concentraciones desde 17,745 mg/kg hasta 43,843 mg/kg, con una concentración media de 31,31 mg/kg. Mientras que las concentraciones de cobre varían desde 34,209 mg/kg hasta 83,55 mg/kg, y tiene una concentración promedio en las muestras de 56,07 mg/kg, mostrando concentraciones notables.

Las concentraciones de arsénico varían significativamente, con un rango de 0,6757 mg/kg a 7,2435 mg/kg, y un nivel promedio de 3,17 mg/kg.

Los metales como el plomo, el mercurio, cobre y el arsénico, que muestran diferencias considerables entre sus concentraciones mínimas y máximas, pueden plantear preocupaciones sobre la exposición a largo plazo a niveles elevados, especialmente en los casos en que las concentraciones máximas superan los límites establecidos por las normativas ambientales.

El níquel muestra un comportamiento más constante y no tan alto como otros metales, presentando una oscilación entre 6,808 mg/kg y 14,76 mg/kg, y un valor promedio de 9,20 mg/kg. Y las concentraciones de zinc varían en un rango desde 28,889 mg/kg hasta 56,613 mg/kg, con una concentración media de 39,81 mg/kg.

Lago Uruguay

Se realizaron análisis en muestras extraídas del lago Uruguay, abarcando una profundidad en la columna de sedimento que varió desde 0 hasta 96 milímetros. Con el fin de tener claridad de las concentraciones de diversos elementos y compuestos presentes en los sedimentos del lago.

A continuación, se presentan las concentraciones obtenidas del análisis realizado en laboratorio:

Tabla 12. *Concentración de metales en Lago Uruguay*

Muestra (mm)	Arsénico (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)
U0-3 mm	20,5836	3,484	10,559	50,585	3,442	58,222	60,549	63,928

U6-9 mm	20,8689	2,808	14,484	50,378	4,717	97,827	62,366	15,556
U12-15 mm	3,8907	2,248	10,330	49,502	4,843	34,712	60,331	156,105
U15-18 mm	3,9998	2,047	8,987	36,987	5,141	28,474	45,042	83,313
U18-21 mm	5,0754	1,857	9,269	33,562	4,971	29,817	41,822	78,241
U21-24 mm	3,6998	1,563	9,055	21,269	5,830	18,024	31,672	59,281
U24-27 mm	9,7198	2,480	10,589	26,917	5,131	46,390	36,833	62,390
U27-30 mm	9,0798	6,771	14,356	88,581	7,657	53,323	76,695	343,990
U42-45 mm	7,6540	2,235	12,533	38,809	7,120	43,132	46,782	159,069
U45-48 mm	4,3164	1,573	10,841	23,262	6,816	25,762	34,337	145,428
U51-54 mm	3,1993	1,883	9,422	73,470	4,823	20,363	71,785	91,287
U75-78 mm	20,444	1,961	12,101	98,625	6,392	30,285	75,083	120,960
U87-90 mm	9,0532	2,334	17,715	68,452	10,168	35,696	73,206	82,066
U90-93 mm	8,0215	1,534	16,762	47,153	10,283	14,107	56,843	83,992

U93-96 mm	7,9756	1,517	18,079	39,276	10,231	15,084	52,960	52,510
----------------------	--------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Fuente: Elaboración propia.

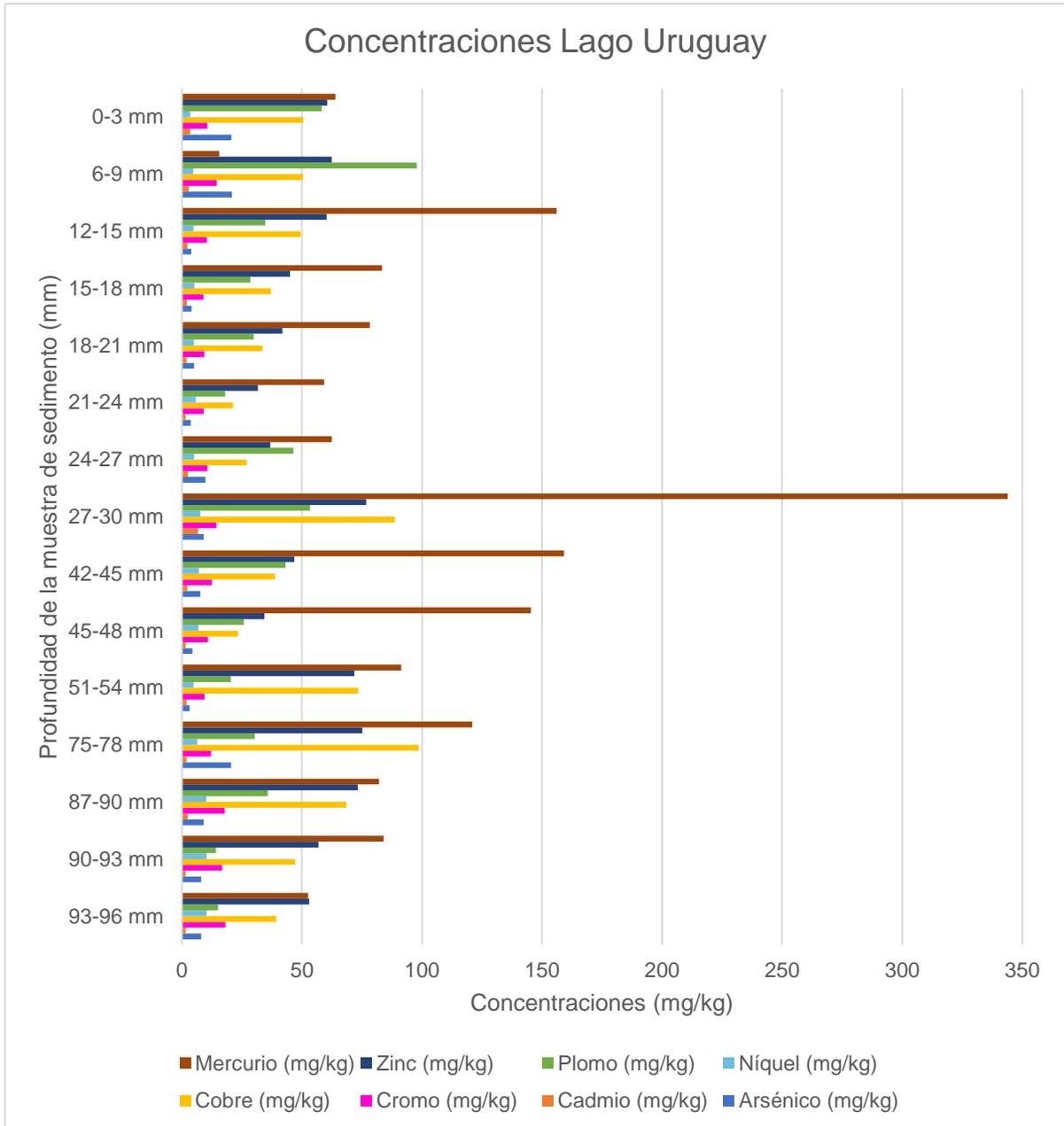


Figura 14. Gráfico de Concentraciones del Lago Uruguay

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 12 se puede observar las concentraciones obtenidas del análisis de las muestras del lago Uruguay, y en la figura 14 es posible ver la variación y cómo estas se comportan con respecto a las diferentes profundidades de la columna de sedimento.

De acuerdo con las concentraciones obtenidas mediante el análisis realizado a las muestras (figura 14), los metales que presentan las concentraciones más altas son el mercurio, cobre, plomo y zinc. En particular, en la muestra 27-30 mm, el Hg señala su concentración más alta (343,9 mg/kg) con un aumento de casi siete veces su concentración de la muestra más profunda (52,5 mg/kg).

El cobre también presenta un incremento de su concentración a casi el doble, indicando un aumento en las muestras 27-30 mm hasta la muestra 75-78 mm.

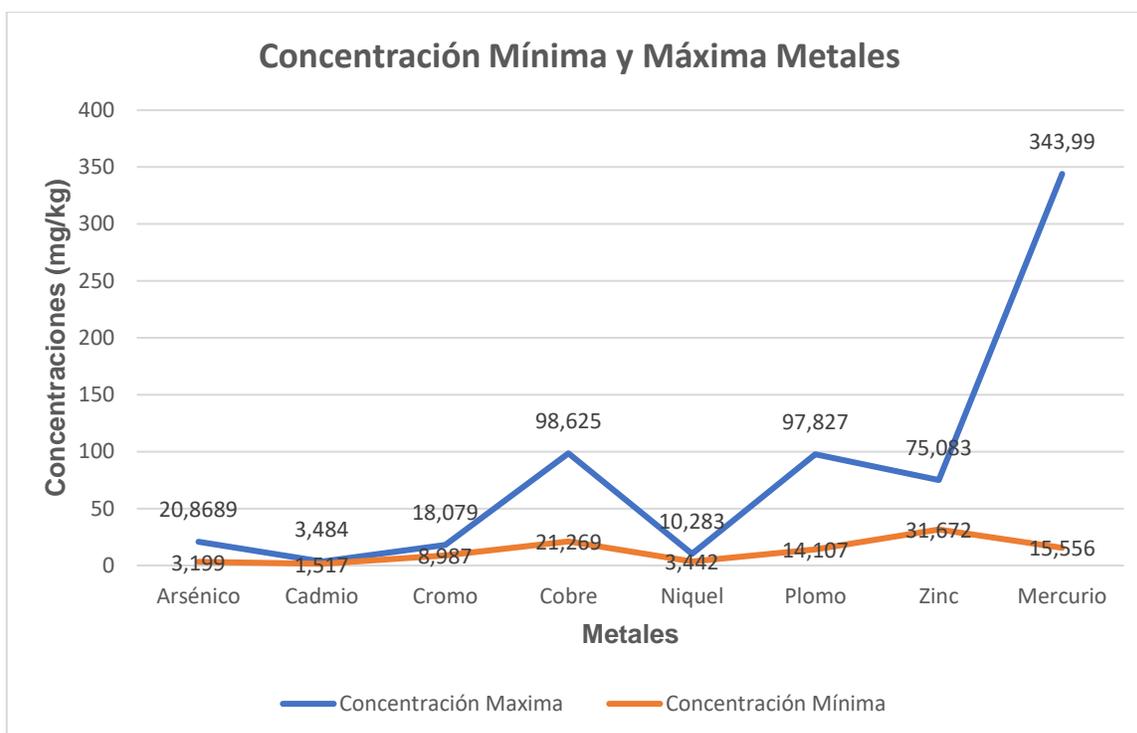


Figura 15. Valores de concentración máxima de metales pesados lago Uruguay

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 15 se muestra una comparación y la oscilación existente de las concentraciones mínimas y máximas de los metales analizados del Lago Uruguay.

Se destaca especialmente el elemento químico mercurio, que muestra la mayor variación significativa en sus concentraciones, con un rango que va desde 15,556 mg/kg hasta 343,99 mg/kg, con una diferencia significativa de 328,434 mg/kg y un valor promedio de 106,54 mg/kg. Esta oscilación destacada sugiere que la presencia de mercurio en el lago puede variar significativamente en diferentes momentos y por distintos acontecimientos que pudieron haber sucedido para hacer esta variación.

El plomo y el cobre también muestran una amplia variación entre sus concentraciones mínimas y máxima. El plomo, con concentraciones que varían entre 14,107 mg/kg y 97,827 mg/kg, y un valor promedio en las muestras de 36,75

mg/kg. Su concentración más alta (97,827 mg/kg) es notable y supera significativamente las demás.

El cobre presenta una concentración significativa, con concentraciones que oscilan entre 21,269 mg/kg y 98,625 mg/kg, y un valor promedio de 49,79 mg/kg.

Las altas concentraciones de estos metales (Pb y Cu) podría indicar la presencia de fuentes de contaminación importantes que pueden afectar la calidad del agua y representar un riesgo para la salud humana y el ecosistema del lago.

Algunos metales como el cromo y el cadmio también muestran una diferencia considerable entre sus concentraciones mínimas y máximas, aunque son variaciones moderadas, indica que su presencia puede estar influenciada por factores ambientales y fuentes específicas de contaminación.

El cromo exhibe una variación considerable, con concentraciones que varían desde 8,987 mg/kg hasta 18,079 mg/kg, y un valor promedio de 12,34 mg/kg. No obstante, las concentraciones de Cr son bastante consistentes en comparación con los otros metales pesados.

En el caso del cadmio, sus concentraciones también varían con un rango de 1,517 mg/kg a 6,771 mg/kg, siendo su concentración promedio de 2,42 mg/kg. Aunque las concentraciones son menores que otros elementos, la muestra con el valor más alto de cadmio (6,771 mg/kg) es notable.

Por otro lado, otros metales, como el níquel y el arsénico, tienen una diferencia más pequeña entre sus concentraciones mínimas y máximas. Esto sugiere una mayor estabilidad en sus niveles, aunque aún pueden ser de preocupación.

Las concentraciones de níquel muestran una variabilidad moderada, variando entre 3,442 mg/kg y 10,283 mg/kg, y presentando una concentración media de 6,504 mg/kg. Y por el lado del arsénico, sus concentraciones varían significativamente, con un rango de 3,1993 mg/kg a 20,8689 mg/kg y una

concentración promedio de 9,17 mg/kg. Su muestra con la concentración más alta de arsénico (20.8689 mg/kg) supera significativamente las demás.

El zinc presenta el menor rango en comparación con algunos otros metales. Sus concentraciones varían desde 31,672 mg/kg hasta 76,695 mg/kg, con un valor promedio en las muestras de 55,087 mg/kg. Mostrando concentraciones relativamente homogéneas.

- Objetivo 3: Establecer los niveles basales de metales pesados en la Península de Fildes.

Durante el análisis de las concentraciones de metales mediante ICP (Espectrometría de Plasma Acoplado Inductivamente), se llevó a cabo una búsqueda específica para identificar las concentraciones basales en cada uno de los cuatro lagos. Este proceso se realizó mediante la observación de concentraciones que mostraran una constancia en la columna de sedimento y que no presentaran diferencias significativas.

El objetivo de encontrar concentraciones basales radica en determinar los niveles naturales y estables de cada metal en los lagos, antes de considerar la influencia de fuentes de contaminación o actividades humanas que puedan alterar dichos

niveles. Las concentraciones basales proporcionan una referencia inicial, lo que permite evaluar cambios en las concentraciones a lo largo del tiempo y comprender la dinámica de los metales.

Con este propósito y para que existiera una uniformidad en los datos, se tomaron las concentraciones obtenidas de las últimas cuatro muestras de cada lago y de cada metal, para luego sacar el promedio y el resultante es la concentración determinada como basal de cada elemento.

Algunas concentraciones muestran un comportamiento con una tendencia más marcada, mientras que para otros metales es más dispersa. Sin embargo, todas las concentraciones de los metales analizados presentan una inclinación que permitió establecer las concentraciones basales de cada elemento por los cuatro lagos estudiados.

Concentraciones Basales Lago Hotel

Las cuatro muestras que fueron tomadas para determinar la concentración basal de cada metal para el Lago Hotel son de la profundidad 39-42 mm, 42-45 mm, 45-48 mm y 48-51 mm.

Las concentraciones ocupadas para establecer la concentración basal de los metales del Lago Hotel se presentan a continuación.

Arsénico

Para el As se seleccionaron las concentraciones de 2,33 mg/kg, 2,2 mg/kg, 1,64 mg/kg, 1,78 mg/kg pertenecientes a las muestras mencionadas. Con estas se determinó la concentración basal del arsénico de 1,99 mg/kg.

Cadmio

Se tomaron las concentraciones 0,646 mg/kg, 0,831 mg/kg, 0,862 mg/kg, 0,932 mg/kg y se sacó el promedio, determinando una concentración basal de Cd de 0,818 mg/kg.

Cromo

Se seleccionaron las concentraciones 6,9 mg/kg, 8,8 mg/kg, 8,9 mg/kg y 9,4 mg/kg, dando una concentración basal de Cr de 8,5 mg/kg.

Cobre

Para el cobre se utilizaron las concentraciones 22,2 mg/kg, 40,5 mg/kg, 48,2 mg/kg y 52,0 mg/kg, resultando una concentración basal de Cu de 40,7 mg/kg.

Níquel

Se seleccionaron las concentraciones de 5,8 mg/kg, 6,3 mg/kg, 7,1 mg/kg y 6,5 mg/kg. Con estas se estableció una concentración basal del Ni de 6,4 mg/kg.

Plomo

Las concentraciones usadas para el caso del plomo son 126,35 mg/kg, 174,6 mg/kg, 164,96 mg/kg y 202,38 mg/kg, estableciendo una concentración basal del Pb de 167,07 mg/kg.

Zinc

Se tomaron las concentraciones 26,5 mg/kg, 36,1 mg/kg, 42,6 mg/kg y 44,0 mg/kg, resultando una concentración basal de Zn de 37,3 mg/kg.

Mercurio

Para el mercurio se seleccionaron las concentraciones 107,658 mg/kg, 140,639 mg/kg, 464,808 mg/kg y 209,02 mg/kg, determinando como concentración basal del Hg de 230,531 mg/kg.

Tabla 13. Concentraciones Basales del Lago Hotel

Metal	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Concentración Basal (mg/kg)	1,99	0,818	8,5	40,7	6,4	167,07	37,3	250,531

Fuente: Elaboración propia.

Concentraciones Basales Lago Xihu

Las concentraciones que se utilizaron para determinar la concentración basal de los metales del Lago Xihu pertenecen a las muestras 51-54 mm, 54-57 mm, 57-60 mm y 60-63 mm. A continuación, se presentan las concentraciones seleccionadas para cada metal:

Arsénico

Se tomaron las concentraciones 24,4387 mg/kg, 20,8544 mg/kg, 19,6277 mg/kg y 17,0945 para determinar la concentración basal del As de 20,504 mg/kg.

Cadmio

Las concentraciones utilizadas del cadmio son 1,397 mg/kg, 1,384 mg/kg, 1,465 mg/kg, 1,341 mg/kg. Con estas se estableció la concentración basal del Cd de 1,397 mg/kg.

Cromo

Se seleccionaron las concentraciones de 13,2 mg/kg, 12,4 mg/kg, 12,7 mg/kg y 11, mg/kg, determinando una concentración basal del Cr de 12,3 mg/kg.

Cobre

Para el Cu se tomaron las concentraciones 109,1 mg/kg, 101,8 mg/kg, 110,5 mg/kg y 97,1 mg/kg para establecer la concentración basal de 104,6 mg/kg.

Níquel

Se seleccionaron las concentraciones de 7,4 mg/kg, 6,7 mg/kg, 6,9 mg/kg, 6,2 mg/kg, resultando una concentración basal del Ni de 6,8 mg/kg.

Plomo

Las concentraciones utilizadas del plomo son 151,67 mg/kg, 170,46 mg/kg, 181,27 mg/kg y 148,79 mg/kg. Con estas se determinó la concentración basal de 163,05 mg/kg.

Zinc

Se seleccionaron las concentraciones de 56,1 mg/kg, 58,3 mg/kg, 58,6 mg/kg y 50,9 mg/kg, estableciendo como concentración basal del Zn a 56,0 mg/kg.

Mercurio

Las concentraciones utilizadas del mercurio son 90,25 mg/kg, 126,809 mg/kg, 73,182 mg/kg y 93,837 mg/kg. Como concentración basal resultante se obtiene 96,02 mg/kg.

Tabla 14. Concentraciones Basales del Lago Xihu

Metal	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Concentración Basal (mg/kg)	20,504	1,397	12,3	104,6	6,8	163,05	56,0	96,02

Fuente: Elaboración propia.

Concentraciones Basales Lago Kitiesh

Para determinar las concentraciones basales del Lago Kitiesh, se seleccionaron cuatro muestras que son 99-102 mm, 102-105 mm, 105-108 mm y 108-111 mm. Las concentraciones correspondientes a estas muestras dependen de cada metal y se presentan a continuación:

Arsénico

Se utilizaron las concentraciones de 7,2435 mg/kg, 1,9913 mg/kg, 0,9349 mg/kg y 0,6757 mg/kg para determinar la concentración basal del As resultando 2,711 mg/kg.

Cadmio

Se seleccionaron las concentraciones de 1,735 mg/kg, 1,25 mg/kg, 1,099 mg/kg, 1,175 mg/kg. Determinando una concentración basal del Cd de 1,315 mg/kg.

Cromo

Las concentraciones tomadas del cromo son 15,536 mg/kg, 12,315 mg/kg, 11,474 mg/kg y 10,498 mg/kg, promediándolas y resultando en la concentración basal del Cr de 12,456 mg/kg.

Cobre

Para el cobre se utilizaron las concentraciones 76,946 mg/kg, 45,599 mg/kg, 36,521 mg/kg y 34,461 mg/kg pertenecientes a las muestras mencionadas. Se estableció como concentración basal del Cu a 48,382 mg/kg.

Níquel

Se tomaron las concentraciones del níquel 14,76 mg/kg, 10,89 mg/kg, 8,262 mg/kg y 8,421 mg/kg. Promediando estas concentraciones se obtuvo la concentración basal del Ni de 10,583 mg/kg.

Plomo

Las concentraciones pertenecientes a las muestras elegidas son 31,616 mg/kg, 25,831 mg/kg, 17,745 mg/kg y 25,156 mg/kg. Determinando con estas la concentración basal del Pb de 25,087 mg/kg.

Zinc

Se seleccionaron las concentraciones de 48,41 mg/kg, 37,858 mg/kg, 31,54 mg/kg, 31,473 que corresponden a las muestras mencionadas. Con estas se determinó la concentración basal del Zn con un valor de 37,320 mg/kg.

Mercurio

Para el mercurio se tomaron las concentraciones 47,612 mg/kg, 40,682 mg/kg, 30,18 mg/kg y 24,73 mg/kg. Resultando en la concentración basal del Hg de 35,801 mg/kg.

Tabla 15. Concentraciones Basales del Lago Kitiesh

Metal	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Concentración Basal (mg/kg)	2,711	1,315	12,456	48,382	10,583	25,087	37,320	35,801

Fuente: Elaboración propia.

Concentraciones Basales Lago Uruguay

Las cuatro muestras utilizadas para determinar las concentraciones basales de los metales del Lago Uruguay son 75-78 mm, 87-90 mm, 90-93 mm y 93-96 mm. Las concentraciones correspondientes a estas muestras se muestran a continuación dependiendo de cada metal:

Arsénico

Se utilizaron las concentraciones 20,444 mg/kg, 9,0532 mg/kg, 8,0215 mg/kg y 7,9756 mg/kg, pertenecientes a las muestras mencionadas. Con estas se calculó la concentración basal del As de 11,374 mg/kg.

Cadmio

Las concentraciones correspondientes a las muestras seleccionadas son 1,961 mg/kg, 2,334 mg/kg, 1,534 mg/kg, 1,517 mg/kg, promediando como concentración basal del Cd a 1,837 mg/kg.

Cromo

Se seleccionaron las concentraciones de 12,101 mg/kg, 17,715 mg/kg, 16,762 mg/kg y 18,079 mg/kg para determinar la concentración basal del Cr obteniendo a 16,164 mg/kg.

Cobre

Para el cobre, las concentraciones pertenecientes a las muestras son 98,625 mg/kg, 68,452 mg/kg, 47,153 mg/kg y 39,276 mg/kg. Se obtuvo la concentración basal del Cu de 63,377 mg/kg.

Níquel

Se tomaron las concentraciones 6,392 mg/kg, 10,168 mg/kg, 10,283 mg/kg y 10,231 mg/kg para determinar la concentración basal del Ni de 9,269 mg/kg.

Plomo

Las concentraciones del plomo que corresponden a las muestras son 30,285 mg/kg, 35,696 mg/kg, 14,107 mg/kg y 15,084 mg/kg. Con estas se estableció la concentración basal del Pb de 23,793 mg/kg.

Zinc

Se seleccionaron las concentraciones 75,083 mg/kg, 73,206 mg/kg, 56,843 mg/kg y 52,96 mg/kg, las cuales se promediaron resultando en la concentración basal del Zn de 64,523 mg/kg.

Mercurio

Para el mercurio, las concentraciones correspondientes a las muestras son 120,96 mg/kg, 82,066 mg/kg, 83,992 mg/kg y 52,51 mg/kg. De estas se determinó la concentración basal del Hg de 84,882 mg/kg.

Tabla 16. *Concentraciones Basales del Lago Uruguay*

Metal	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Concentración Basal (mg/kg)	11,374	1,837	16,164	63,377	9,269	23,793	64,523	84,882

Fuente: Elaboración propia.

- **Objetivo 4: Determinar el impacto de las bases antárticas sobre el contenido de metales pesados en los ecosistemas lacustres de la península Antártica.**

De acuerdo con los resultados derivados de las muestras mediante el análisis de laboratorio llevado a cabo por ICP, se obtuvo las concentraciones de los metales Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Zn, Cd y As presentes en cada una de las cuatro lagunas.

Por medio del análisis estadístico, fue posible conocer la normalidad de los metales de cada laguna y definir cuáles poseían una diferencia significativa de las concentraciones basales con respecto a las concentraciones obtenidas de cada metal.

La totalidad de los elementos en el Lago Hotel presentaron un comportamiento no normal, en cambio, en el Lago Xihu se encontraron tres elementos con distribución normal (Cr, Cu, Hg) y los metales restantes con distribución no normal. Para el Lago Kitiash, seis de los metales tuvieron un comportamiento normal (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn), y para el Lago Uruguay se detectaron a casi la totalidad de metales con distribución no normal exceptuando a dos metales (Cu, Zn) que presentaron distribución normal.

Con respecto con los resultados obtenidos a través de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, se aplicaron las pruebas T de Student (paramétricos) o U de Mann-Whitney (no paramétricos). Y se hicieron boxplot para cada laguna y metal, para esquematizar las diferencias significativas existentes entre la concentración obtenida de cada elemento químico con la concentración basal de cada laguna respectiva. Para los diagramas de caja se emplearon dos conceptos: "Background" para el valor que se determinó como nivel o concentración basal para cada elemento para el cual se encontró y todos aquellos valores que sean iguales o menores a este. Y, el concepto "Exceso" como el que engloba al resto de concentraciones superiores a este nivel basal.

Adicionalmente se implementaron los índices de contaminación Enrichment Factor (EF), Índice de geoacumulación (Igeo) y Pollution Load Index (PLI), para determinar la contaminación en sedimentos y suelos con respecto a las concentraciones y su concentración basal.

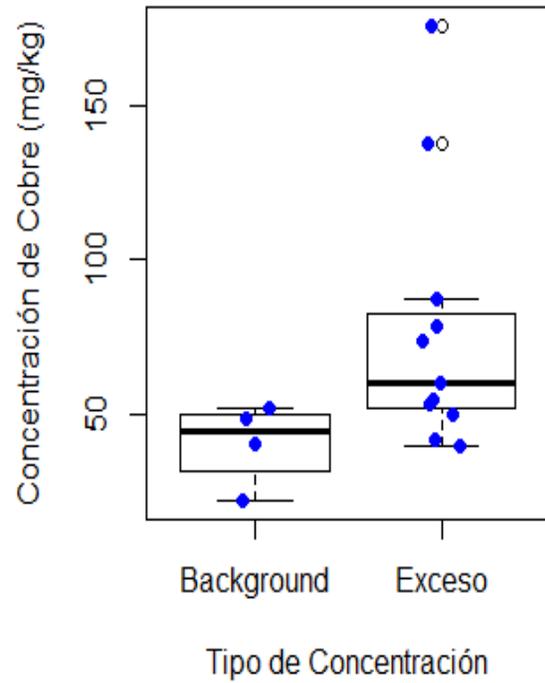
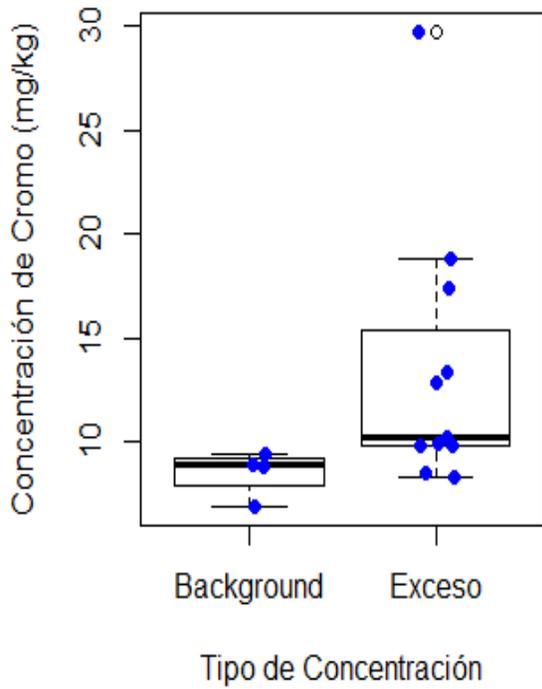
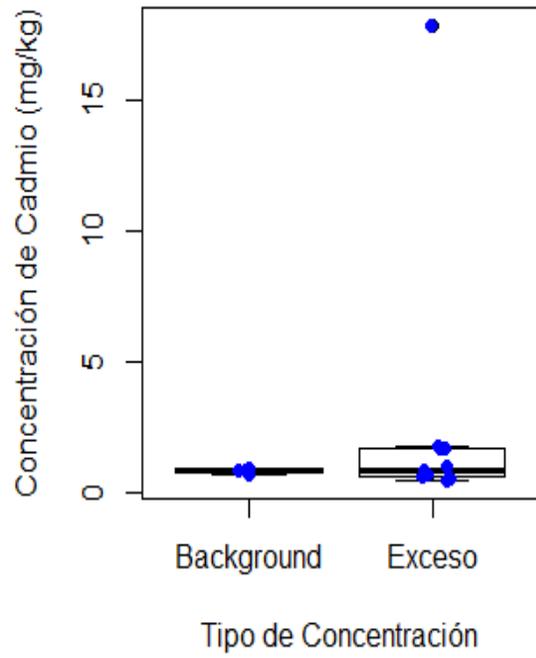
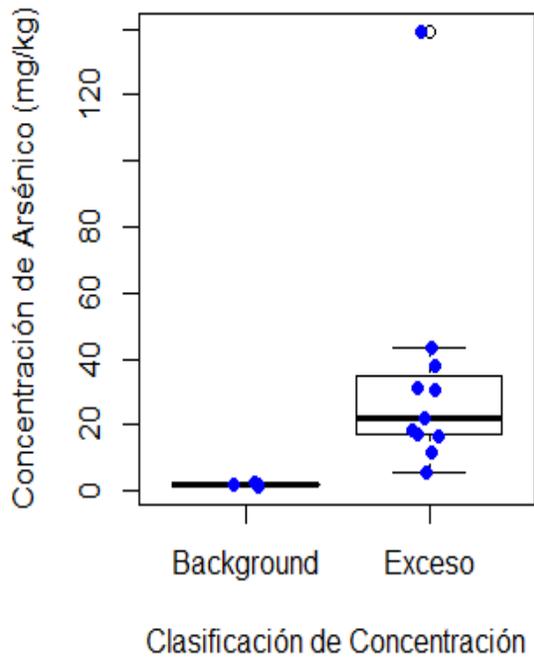
Lago Hotel

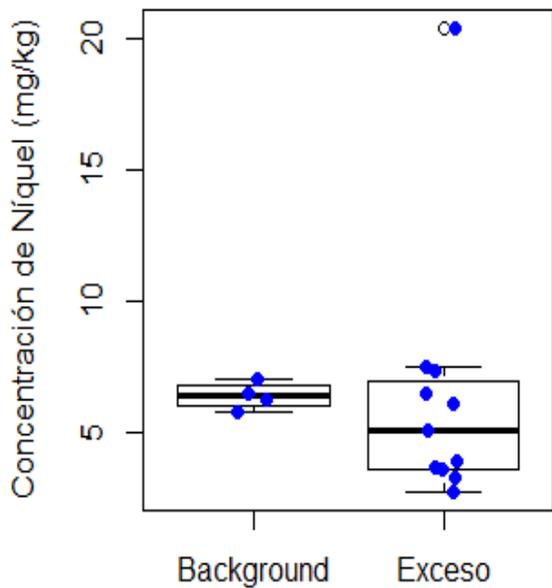
Las concentraciones obtenidas y las concentraciones basales determinadas de los metales del Lago Hotel se muestran en diagramas de caja (figura 16) para ver la existencia de una diferencia significativa entre ellas. Además, se presentan gráficos de la concentración de cada metal en contraste con su concentración basal (figura 17 y 18), donde se observa el cambio de las concentraciones en cada muestra (profundidades) y es posible ver la diferencia que tiene con los otros elementos analizados.

Mediante el análisis estadístico, se obtuvo que el As, Cr, Cu y Zn presentan diferencias significativas con respecto a sus concentraciones basales determinadas con un $p < 0,05$ (Anexo), mientras que el Cd, Ni, Pb y Hg presentan un valor de $p > 0,05$ lo que indica que la diferencia entre su concentración basal y sus concentraciones obtenidas no es estadísticamente significativa.

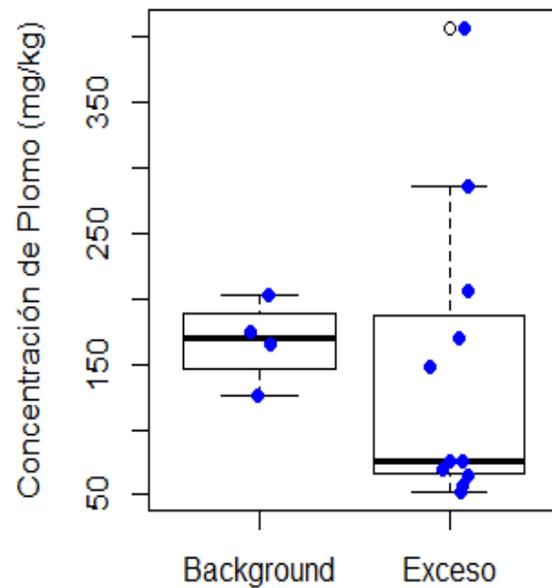
Por medio de los diagramas de caja de cada metal (figura 16) se observa el comportamiento de cada elemento de acuerdo con su concentración basal. En todos los casos se puede ver la presencia de valores atípicos lo cual indica que existe una alteración y que se encuentra distante del conjunto de las concentraciones.

En la figura 17 y 18 se observa a detalle que los valores atípicos corresponden a la muestra 27-30 mm, lo que significa que existió una perturbación de la muestra, ya sea por interacciones antrópicas como desechos de aguas residuales, uso de combustibles fósiles, etc., o naturales como erupciones volcánicas, lixiviación del suelo, erosión de suelos y rocas, entre otros.

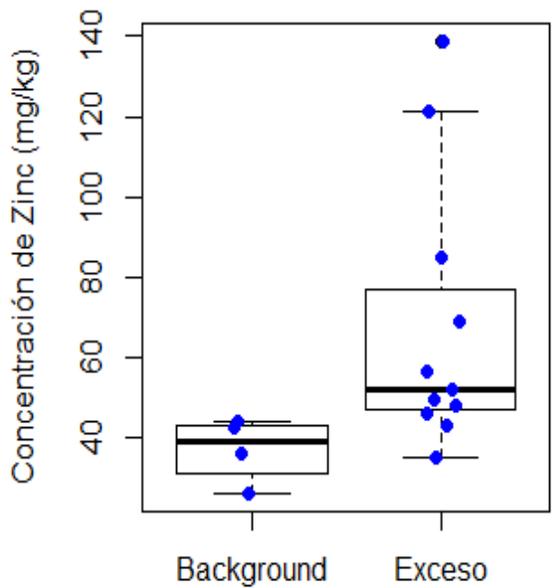




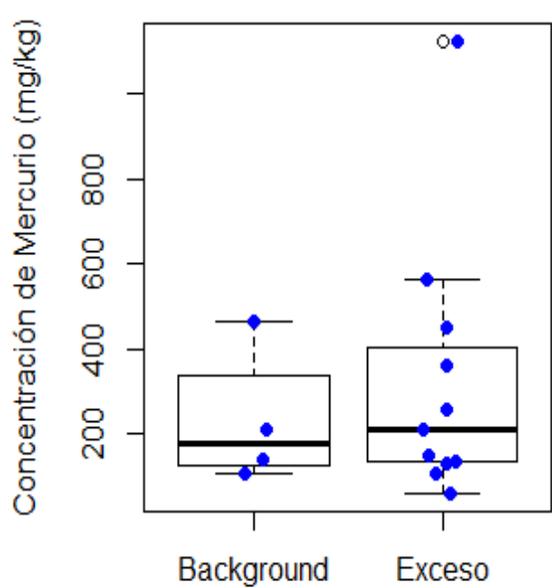
Clasificación de Concentración



Tipo de Concentración



Clasificación de Concentración



Tipo de Concentración

Figura 16. Diagrama de caja metales Lago Hotel

Fuente: Elaboración propia.

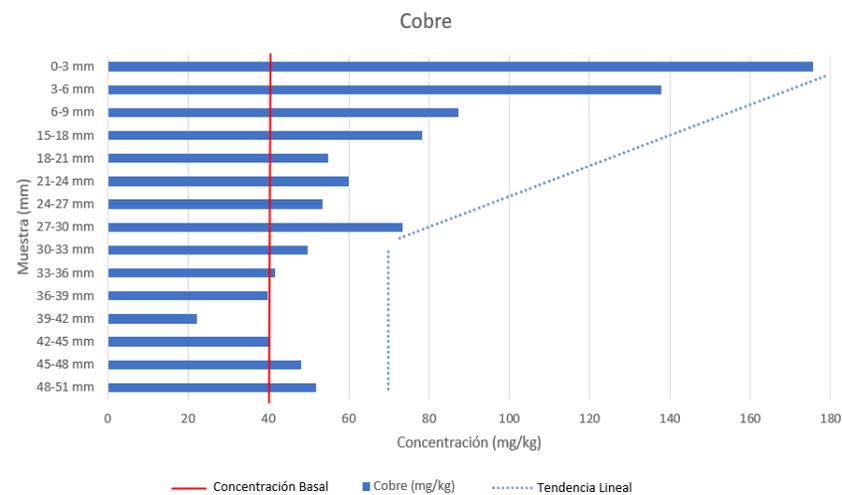
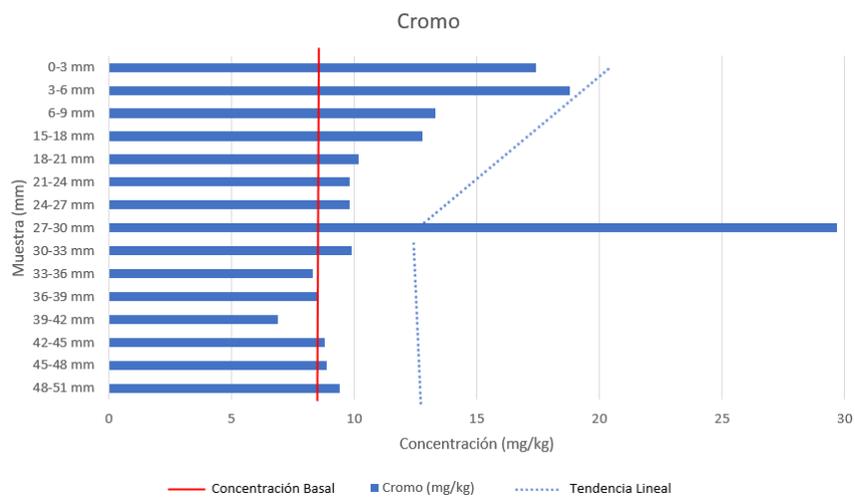
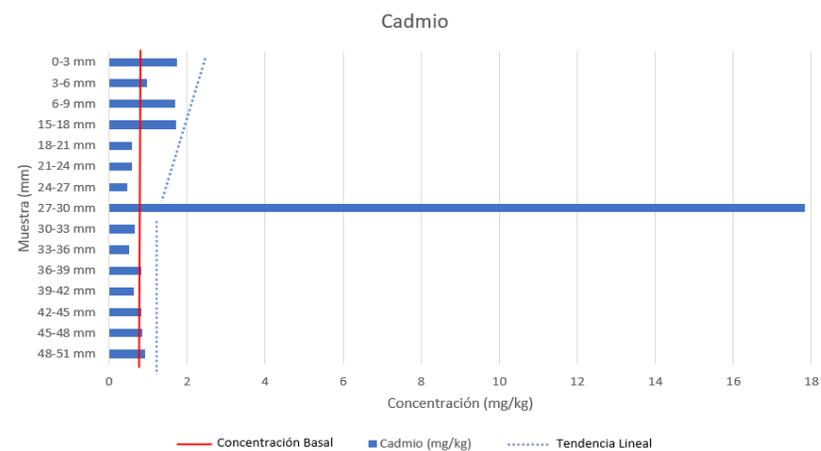
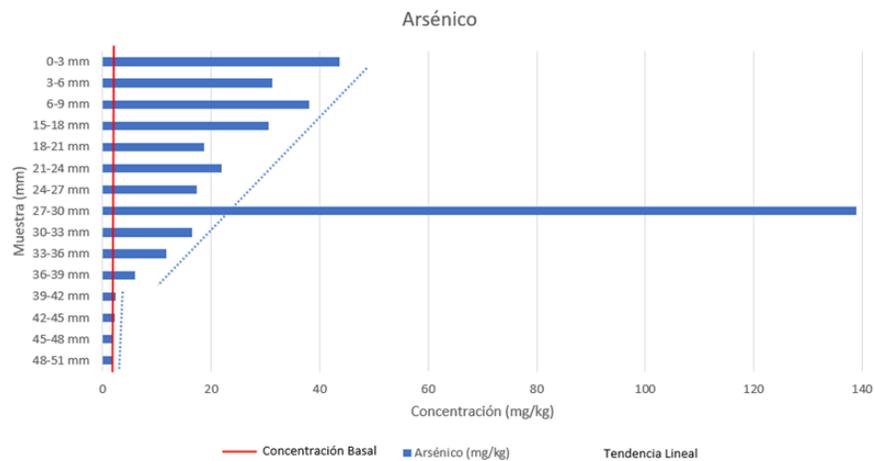


Figura 17. Comportamiento de los metales Lago Hotel

Fuente: Elaboración propia.

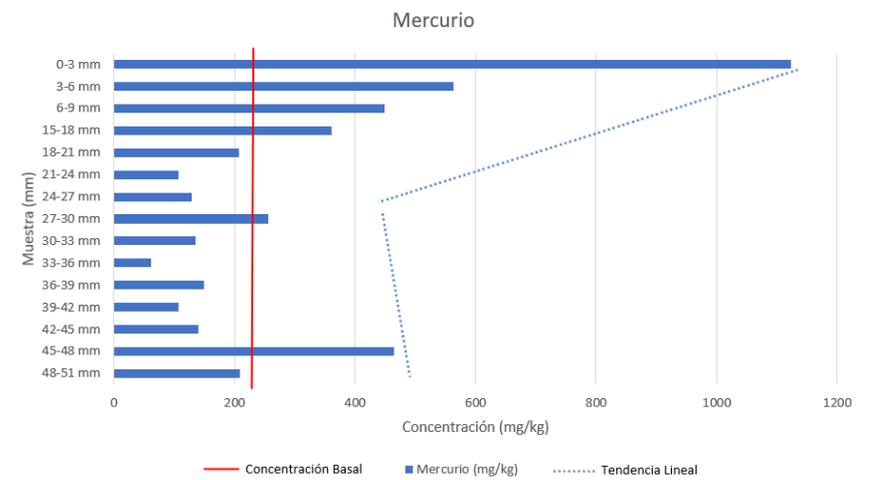
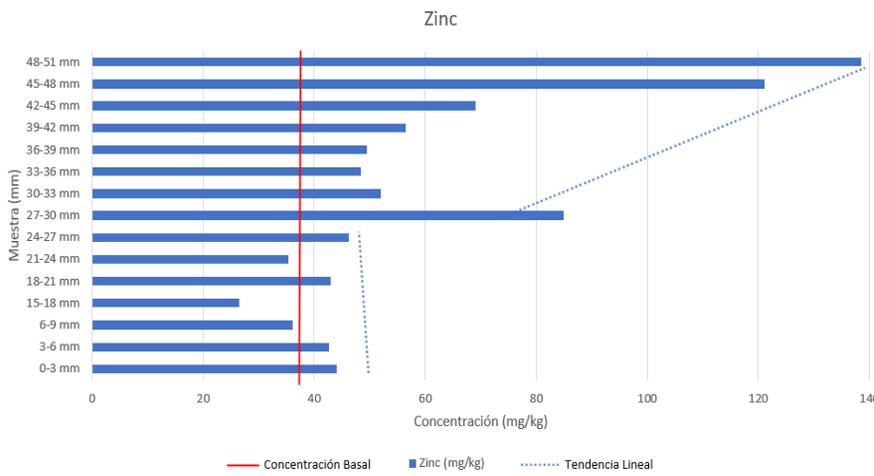
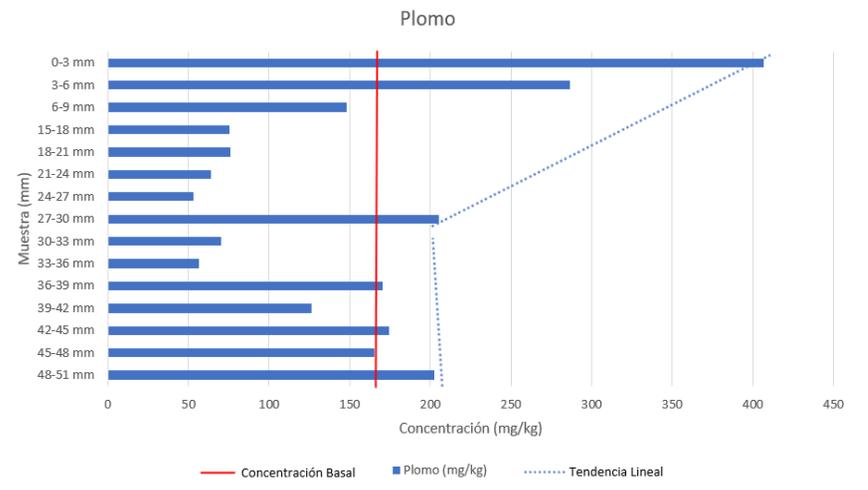
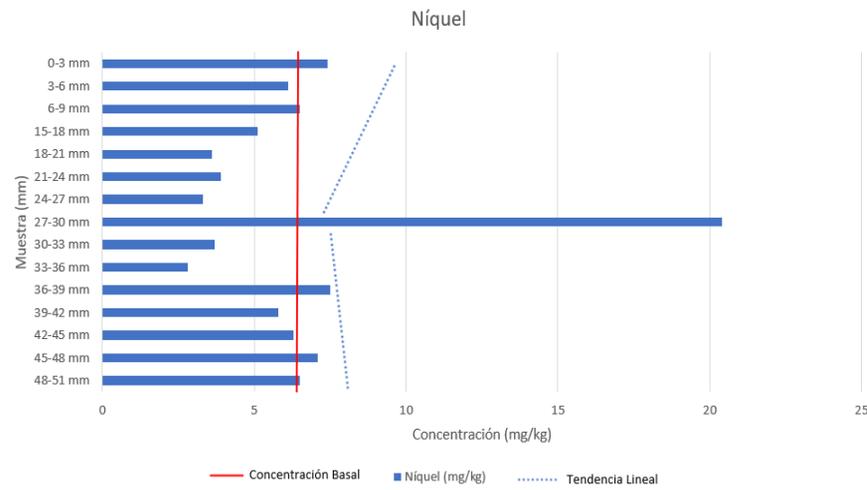


Figura 18. Comportamiento de los metales Lago Hotel

Fuente: Elaboración propia.

Los metales As, Cr, Cu y Zn que muestran diferencias estadísticamente significativas (figura 16), presentan una tendencia al aumento en las concentraciones de las muestras del centro a las más superficiales de la columna de sedimento. Lo cual puede ser indicio de la actividad antrópica como el uso de artefactos electrónicos como microondas (As), los residuos de aguas, la combustión de petróleo y combustibles fósiles, la dispersión atmosférica de pesticidas y fertilizantes (Zn y Cu), y presencia de cenizas por actividad volcánica, entre otros.

De acuerdo con las concentraciones obtenidas del Hg, estas presentan un comportamiento que va en disminución a medida que las muestras son más profundas en la columna de sedimentos, mostrando mayor concentración en las muestras más superficiales. En la muestra de 0-3 milímetros (0-0,3 cm.), se obtiene la concentración más alta, siendo casi seis veces mayor que su concentración basal determinada (figura 17 y 18).

El mercurio puede estar de forma natural en los sedimentos, pero una mayor concentración de mercurio sugiere una alteración en el curso normal de los ecosistemas, la cual puede ser una incorporación de actividad antrópica o erupciones de volcanes, representando un riesgo tanto para la salud humano como para el ecosistema, especialmente en este caso, donde las mayores concentraciones de Hg se encuentran en las muestras más cercanas a la superficie. Además de que el Hg suele quedar atrapado en los sedimentos, permaneciendo en formas que son difíciles de remover, debido a la presencia de materia orgánica y sulfuros que le proporcionan una condición reductora (Vane et al. 2009).

La muestra de 0-3 milímetros corresponde a los años 2018-1987 aproximadamente, por lo que el enriquecimiento de este metal puede deberse a la existencia de actividad volcánica que pudo haber interferido en la concentración del mercurio. La actividad volcánica en este periodo abarca episodios en 1992,

1999 y 2014-2015 en el volcán de la Isla Decepción (Pedrazzi et al., 2014), y la última erupción registrada en la Isla de Ross en el año 2011 (Lavin & Antonio, 2016).

Adicionalmente, es importante tener en cuenta la actividad antropogénica continua, derivada tanto del crecimiento significativo del turismo en la región como de la presencia constante de bases científicas Presidente Eduardo Frei Montalva y Profesor Julio Escudero, además del Aeródromo Teniente Rodolfo Marsh Martin y la Villa Las Estrellas. Las actividades humanas desarrolladas en estas zonas pueden haber tenido un impacto en las concentraciones de este elemento. La presencia del aeródromo que se ubica cercano al Lago Hotel es un factor a tener en cuenta debido al aumento de la actividad turística y al aumento de tránsito a la Península en los últimos años, lo que puede influir en la concentración de los metales pesados en los sedimentos por parte de las emisiones y partículas emitidas.

El As, Cu, Pb, Zn y Hg son los elementos que poseen concentraciones más altas. En el caso del As, Cu y Hg, obtuvieron concentraciones de más de cuatro veces su concentración basal. El Zn, superó su concentración basal en casi el triple; y el Pb hasta casi el doble de su concentración basal.

Elevados niveles de plomo y mercurio pueden deberse a derrames de petróleo, uso de pinturas, uso de combustibles, combustión de basuras, partículas traídas por dispersión atmosférica, combustión de compuestos derivados del petróleo (Motas et al., 2021), baterías y pilas usadas por parte del Aeródromo Teniente Rodolfo Marsh Martin, la Villa Las Estrellas y las bases Presidente Eduardo Frei Montalva y Profesor Julio Escudero cercanas al Lago Hotel. El enriquecimiento por Zn puede deberse a fertilizantes traídos por dispersión, como también al uso de baterías; y el del Cu, a la presencia de abonos de origen animal (Smith, 1996).

La mayoría de los elementos analizados muestran un comportamiento de constante incremento de la concentración en las muestras superficiales, con la

excepción de la muestra 27-30 mm (2,7-3,0 cm.) donde se percibe un aumento muy marcado de solo esta muestra en todos los metales para luego volver a bajar.

Esta muestra es equivalente a los años 1730-1586 aproximadamente y en la mayoría de los metales analizados exhibe un pick de aumento, no conforme al comportamiento del resto de las muestras. En este periodo de años no existió intervención antrópica por construcción de alguna infraestructura puntual alrededor del lago Hotel, por lo que esta alteración puede atribuirse a alguna actividad o acontecimiento puntual en el periodo, el cual mediante dispersión atmosférica haya repercutido en las concentraciones de los sedimentos del Lago Hotel derivando en el incremento de estas. Es importante destacar que la referencia de los años equivalentes a las muestras corresponden a aproximaciones que pueden tener un rango de error.

Todos los metales analizados es posible encontrarlos de forma natural, pero un aumento significativo, como es el caso de esta muestra en particular puede deberse a algún acontecimiento natural como erupciones volcánicas, dispersión de contaminantes o partículas a través de corrientes de masas de aire.

Cabe recalcar que en 2011 el lago Hotel fue drenado y rellenado para mejorar la calidad de su agua, aunque sin tener éxito (Peter et al. 2013). Esta acción pudo haber removido los sedimentos del lago produciendo una alteración en las concentraciones de los metales pesados analizados, por lo que es un factor para tener en cuenta, especialmente en las muestras que corresponden al año 2011 o años cercano a este.

Además de cercanía con respecto a la ubicación que posee el Lago Hotel con el Aeródromo Teniente Rodolfo Marsh Martín inaugurado en 1980. Las emisiones que se liberadas pueden ser la mayor razón para la contaminación de los sedimentos por metales pesados.

Tabla 17. Índice de Geoacumulación Lago Hotel

LAGO HOTEL																
Igeo									INTERPRETACIÓN							
Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Igeo As	Igeo Cd	Igeo Cr	Igeo Cu	Igeo Ni	Igeo Pb	Igeo Zn	Igeo Hg
H0-3 mm	3,87	0,51	0,45	1,52	-0,38	0,70	1,31	1,70	Fuertemente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	Moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	Moderadamente contaminado	Moderadamente contaminado
H3-6 mm	3,39	-0,33	0,56	1,17	-0,66	0,19	1,12	0,71	Fuertemente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	Moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	Moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
H6-9 mm	3,68	0,48	0,06	0,52	-0,57	-0,76	0,30	0,37	Fuertemente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
H15-18 mm	3,36	0,48	0,01	0,36	-0,92	-1,73	0,01	0,06	Fuertemente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
H18-21 mm	2,65	-1,05	-0,32	-0,15	-1,42	-1,72	-0,18	-0,73	Moderado a fuertemente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado

H21-24 mm	2,87	-1,04	-0,38	-0,03	-1,31	-1,97	-0,21	-1,69	Moderado a fuertemente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
H24-27 mm	2,54	-1,36	-0,38	-0,19	-1,55	-2,25	-0,11	-1,42	Moderado a fuertemente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
H27-30 mm	5,54	3,86	1,22	0,26	1,08	-0,29	0,60	-0,44	Extremadamente contaminado (Extremadamente fuerte)	Fuertemente contaminado	Moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	Moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado
H30-33 mm	2,47	-0,92	-0,36	-0,29	-1,38	-1,84	-0,27	-1,35	Moderado a fuertemente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
H33-36 mm	1,98	-1,26	-0,62	-0,55	-1,78	-2,15	-0,66	-2,51	Moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
H36-39 mm	0,98	-0,57	-0,58	-0,61	-0,36	-0,56	-0,38	-1,21	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
H39-42 mm	-0,36	-0,93	-0,89	-1,46	-0,73	-0,99	-1,08	-1,68	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
H42-45 mm	-0,44	-0,56	-0,53	-0,59	-0,61	-0,52	-0,63	-1,30	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
H45-48 mm	-0,86	-0,51	-0,52	-0,34	-0,44	-0,60	-0,39	0,43	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
H48-51 mm	-0,74	-0,40	-0,44	-0,23	-0,57	-0,31	-0,35	-0,73	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Factor de Enriquecimiento Lago Hotel

LAGO HOTEL																
FE									INTERPRETACIÓN							
Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	FE As	FE Cd	FE Cr	FE Cu	FE Ni	FE Pb	FE Zn	FE Hg
H0-3 mm	5,91	0,57	0,55	1,16	0,31	0,65	1,00	1,31	Enriquecimiento significativo	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H3-6 mm	4,83	0,37	0,68	1,04	0,29	0,53	1,00	0,75	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H6-9 mm	10,34	1,13	0,84	1,16	0,55	0,48	1,00	1,05	Enriquecimiento significativo	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H15-18 mm	10,17	1,38	0,99	1,27	0,52	0,30	1,00	1,03	Enriquecimiento significativo	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H18-21 mm	7,09	0,55	0,90	1,02	0,42	0,34	1,00	0,68	Enriquecimiento significativo	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H21-24 mm	8,47	0,56	0,89	1,14	0,47	0,29	1,00	0,36	Enriquecimiento significativo	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H24-27 mm	6,27	0,42	0,83	0,94	0,37	0,23	1,00	0,40	Enriquecimiento significativo	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H27-30 mm	30,68	9,56	1,53	0,79	1,39	0,54	1,00	0,49	Enriquecimiento muy elevado	Enriquecimiento significativo	Enriquecimiento deficiente					

											(mínimo)	(mínimo)	(mínimo)	(mínimo)	(mínimo)	(mínimo)
H30-33 mm	6,69	0,64	0,94	0,99	0,46	0,34	1,00	0,47	Enriquecimiento significativo	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H33-36 mm	6,25	0,66	1,03	1,08	0,46	0,36	1,00	0,28	Enriquecimiento significativo	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H36-39 mm	2,57	0,88	0,87	0,85	1,01	0,88	1,00	0,56	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
H39-42 mm	1,65	1,11	1,14	0,77	1,27	1,06	1,00	0,66	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
H42-45 mm	1,14	1,05	1,07	1,03	1,01	1,08	1,00	0,63	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
H45-48 mm	0,72	0,92	0,92	1,04	0,97	0,86	1,00	1,77	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
H48-51 mm	0,76	0,97	0,94	1,08	0,86	1,03	1,00	0,77	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Índice de carga contaminante Lago Hotel

LAGO HOTEL		
Muestra	PLI	Interpretación
H0-3 mm	1,59846342	Existencia de contaminación (contaminado)
H3-6 mm	1,53508059	Existencia de contaminación (contaminado)
H6-9 mm	1,53392901	Existencia de contaminación (contaminado)
H15-18 mm	1,4972306	Existencia de contaminación (contaminado)
H18-21 mm	1,41333689	Existencia de contaminación (contaminado)
H21-24 mm	1,42604051	Existencia de contaminación (contaminado)
H24-27 mm	1,39772931	Existencia de contaminación (contaminado)
H27-30 mm	1,78874293	Existencia de contaminación (contaminado)
H30-33 mm	1,39458805	Existencia de contaminación (contaminado)
H33-36 mm	1,34199264	Existencia de contaminación (contaminado)
H36-39 mm	1,33255063	Existencia de contaminación (contaminado)
H39-42 mm	1,25504411	Existencia de contaminación (contaminado)
H42-45 mm	1,29183608	Existencia de contaminación (contaminado)
H45-48 mm	1,32255313	Existencia de contaminación (contaminado)
H48-51 mm	1,31102327	Existencia de contaminación (contaminado)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los índices se muestran en la Tabla 17, 18 y 19.

La tabla 17, muestra los resultados del índice Igeo, donde se evidencio que todos los elementos analizados superan en alguna muestra el valor de 0, por lo que el índice muestra que existe contaminación de los metales analizados.

El arsénico se encuentra entre los parámetros medianamente contaminado y fuertemente contaminado, y es el elemento metálico que presenta mayores valores de Igeo (5,542712305; Igeo > 0; Extremadamente fuerte contaminado), siendo fuertemente peligroso para los seres vivos que habitan ahí tanto seres humanos como animales y organismos. El resultado con mayor valor de Igeo pertenece a la muestra 27-30 mm (2,7-3,0 cm), que corresponde al periodo de años 1730 – 1586 aproximadamente donde aún no existía presencia de las bases científicas, por lo cual no se puede afirmar que la actividad antrópica haya sido un factor de perturbación para este metal, sin embargo, no quita que pueden haber existido desplazamientos de sedimentos o dispersión atmosférica lo que haya producido una contaminación de los suelos.

Aunque el arsénico es un elemento muy común y fácil de encontrar en la atmósfera, en el agua, y especialmente en los suelos, es peligroso en altas concentraciones para el ser humano y los seres vivos que habitan el lugar.

El valor del índice de geoacumulación del As enseña un aumento a medida que se acerca a las muestras superficiales del núcleo de sedimento, con excepción del valor más alto obtenido del presente índice de la muestra 27-30 mm mencionado en el párrafo anterior. El enriquecimiento del As puede deberse a aguas de escorrentía, vientos que traigan partículas con fácil dispersión, pero mayormente a la instalación de las bases científicas y del aeródromo adyacente al Lago Hotel, debido a que la actividad volcánica existe de forma puntual.

El cadmio presenta valores de Igeo con clasificaciones No contaminado (Igeo ≤ 0) y no contaminado a moderadamente contaminado (0 ≤ Igeo ≤ 1) para la mayoría de las muestras, excluyendo a la muestra 27-30 mm que obtuvo un mayor valor de

Igeo (3,860893081; Igeo > 0; fuertemente contaminado). Esto puede deberse a derrames de petróleo, uso de pinturas, combustión de basuras o de combustibles al aire libre a nivel local, o por el transporte de estos elementos desde largas distancias (Asia, África o Sudamérica) (Motas et al., 2021; Muñoz, 2016). Otra posible fuente de contaminación es el uso de fertilizantes fosfatados. El Cd se presenta de manera natural en diversas concentraciones en la roca de fosfato que se extrae para ser utilizada como fertilizante (Mead 2011; Mero, 2019).

Los elementos analizados restantes (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg) muestran valores de Igeo no superiores a 0 o levemente superiores, con clasificación No contaminado y No contaminado a moderadamente contaminado. De los resultados del índice se infiere que la presencia de los metales (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg) no implica un riesgo para el ecosistema ni las personas que habitan la zona, sin embargo, es importante continuar monitoreando y analizando estos metales por posibles alzas. Además, se debe poner énfasis en la gestión de residuos, en el manejo de las aguas residuales, en elementos contaminantes como pilas y pinturas, debido a que se considera estos elementos podrían proceder de estos.

En lo que respecta a los factores de enriquecimiento (FE) de los metales pesados analizados en el Lago Hotel, solo el arsénico se encontró por arriba del valor de 10 y al cadmio con un valor muy cercano a 10 (FE=9,56369666) (Tabla 18). Esto indica, según Lawson y Winchester (1979), que el As se trata de un metal con un enriquecimiento muy elevado y el Cd un metal con enriquecimiento mínimo o deficiente en el suelo por fuentes antropogénicas. El resto de los metales mostró para un valor de factor de enriquecimiento (FE) menor a 10 en todas las muestras, por lo que la presencia de estos elementos (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg) tienen su origen en la roca madre.

Mientras que los índices mencionados (Igeo y FE) muestran los índices de contaminación por cada elemento, el índice de carga contaminante (PLI) muestra

la contaminación total de la muestra, incluyendo todos los elementos analizados en la muestra.

La tabla 19 presenta los resultados obtenidos de PLI para cada muestra englobando todos los metales analizados. Los resultados de PLI para el Lago Hotel muestran, para todas las muestras, existencia de contaminación.

La muestra 27-30 mm contiene el mayor valor de PLI, de lo que se concluye que por el conjunto de los metales analizados (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg) esta muestra presenta la mayor contaminación con respecto a las demás muestras, por lo que podría existir un peligro para el medio ambiente y para los habitantes de la zona.

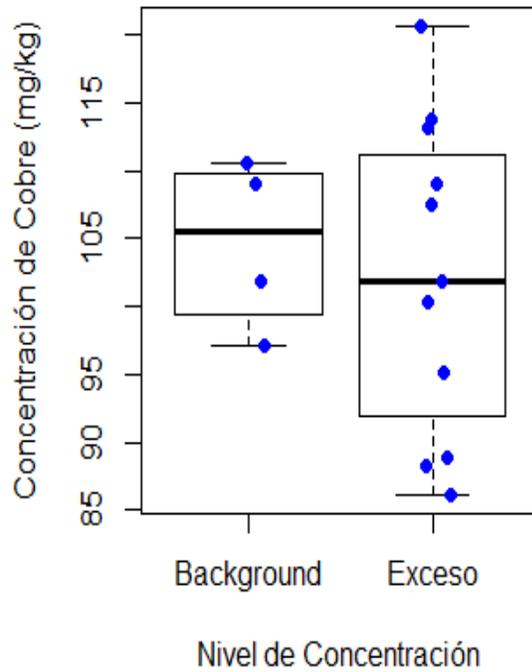
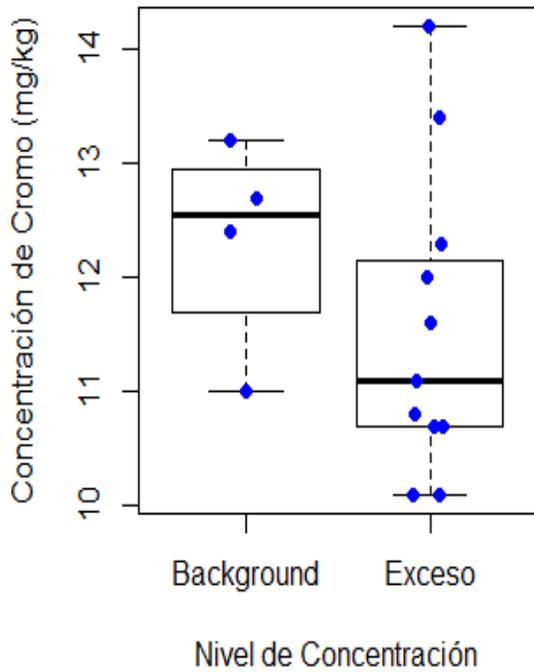
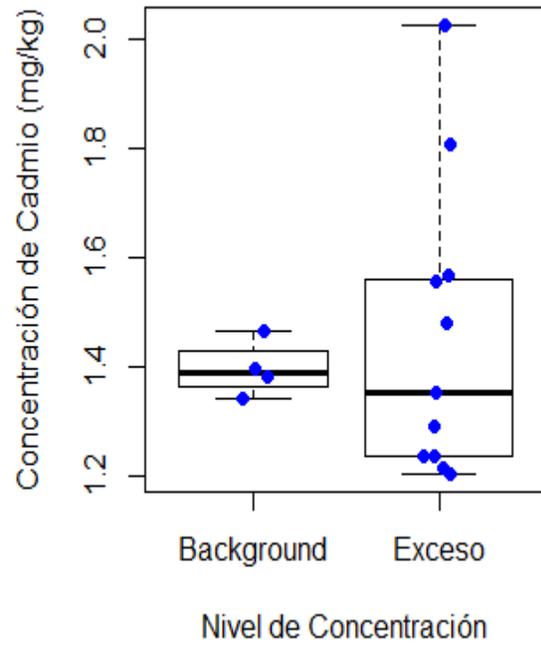
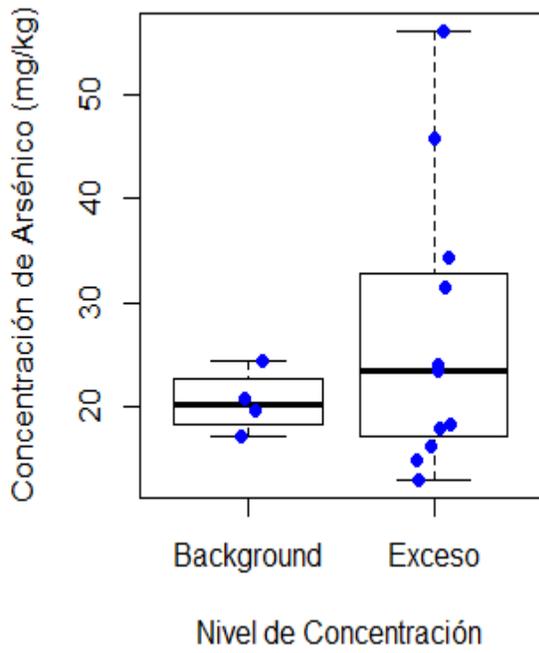
Lago Xihu

Los resultados de las concentraciones obtenidas y de las concentraciones basales establecidas del Lago Xihu se presentan en la figura 19, 20 y 21.

Con respecto al análisis estadístico y los diagramas de caja (figura 19), se observa el comportamiento de las concentraciones de los elementos analizados, De esto, el Pb y Hg presentan diferencias significativas ($p < 0,05$) con respecto a sus concentraciones basales (Anexo), mientras que el As, Cd, Cr, Cu, Ni y Zn muestran un valor de $p > 0,05$ lo que indica que la diferencia entre su concentración basal y sus concentraciones obtenidas no es estadísticamente significativa (Anexo), por lo tanto no existen grandes alteraciones entre estas. En el diagrama de caja se puede visualizar como se dispersan las concentraciones de cada metal analizado, viendo que, para el caso del As, Cd, Ni y Zn existe una tendencia de las concentraciones a estar más cercanas al límite inferior del diagrama exceso, por lo que no hay una gran variabilidad en ellas. Sin embargo, para el Ni, y Zn hay presencia de valores atípicos, que se escapan del comportamiento promedio de la mayoría de las concentraciones.

En la figura 19 se puede observar el valor atópico para el Ni y el Zn pertenece a la muestra 0-3 mm. Aunque no es un valor que difiere en gran magnitud de las concentraciones obtenidas de las demás muestras, sin embargo, si es la concentración más alta. Estas concentraciones se presentan en la muestra de la zona más superficial que corresponde al periodo actual, por lo cual su aumento es probable que sea por factores antrópicos más que naturales.

En la figura 20 y 21, se muestra que la variación de las concentraciones se produce en los grupos superficiales de sedimento, por lo que estos cambios pueden ser producto de las últimas actividades antrópicas como la creación de bases y el turismo, además de contaminantes que pueden adherirse al sedimento y a los cuerpos de agua por dispersión y deposición atmosférica, como también por deslizamientos de agua y suelo.



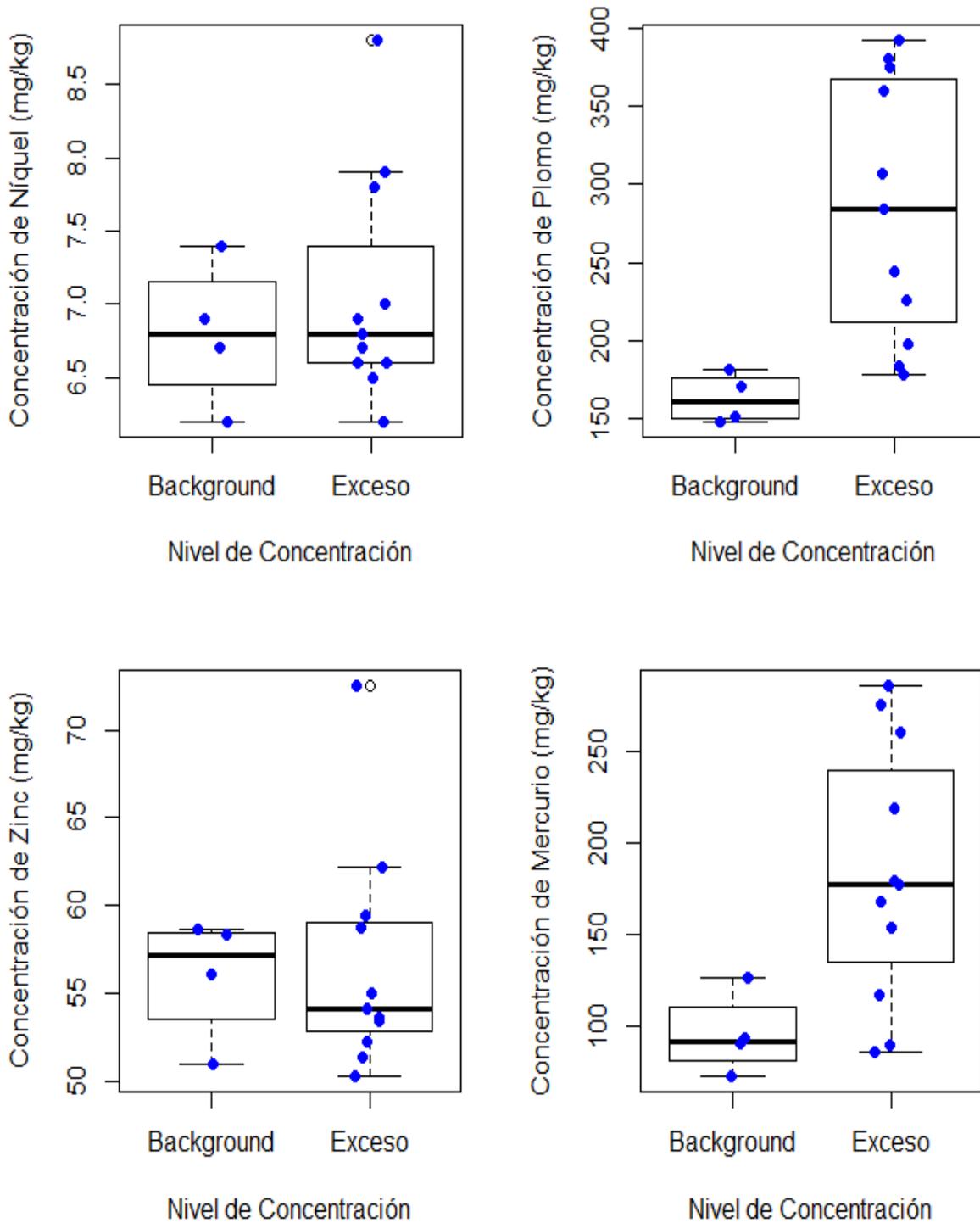


Figura 19. Diagrama de caja Lago Xihu

Fuente: Elaboración propia.

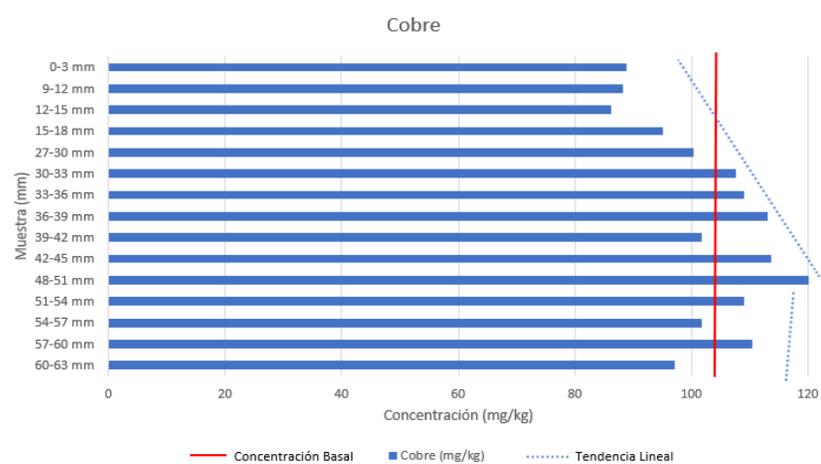
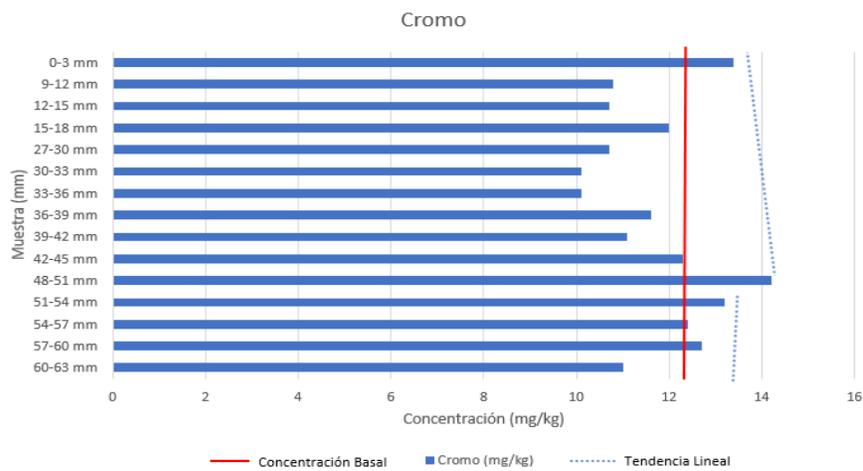
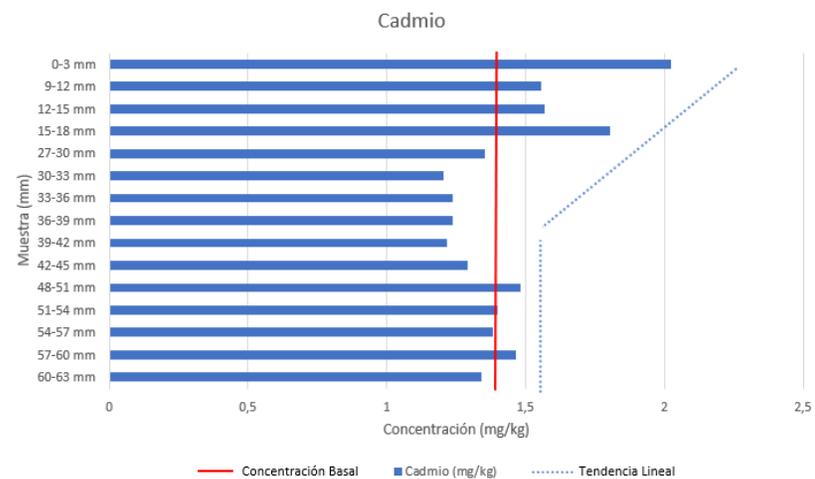
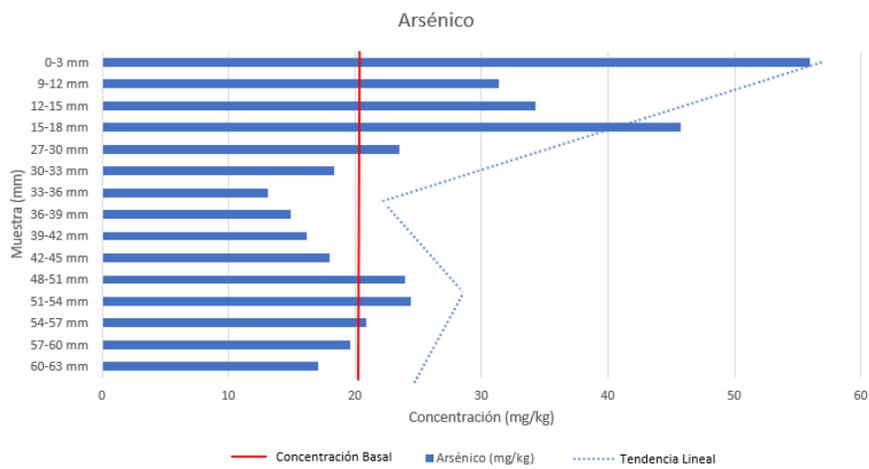


Figura 20. Comportamiento de los metales Lago Xihu

Fuente: Elaboración propia.

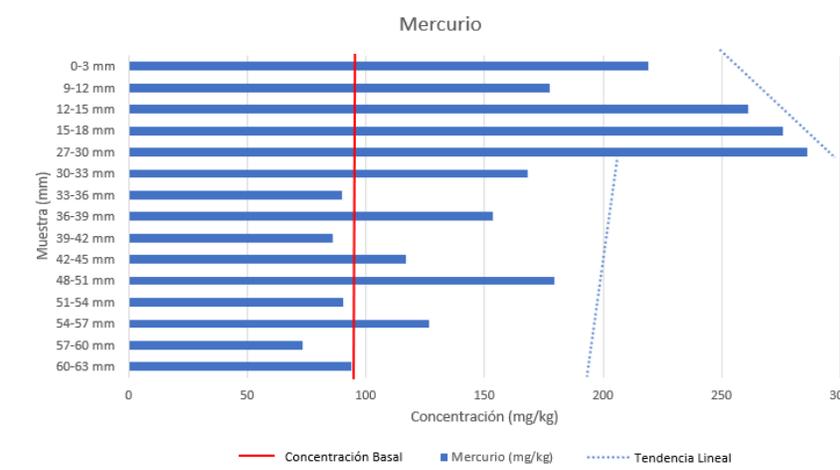
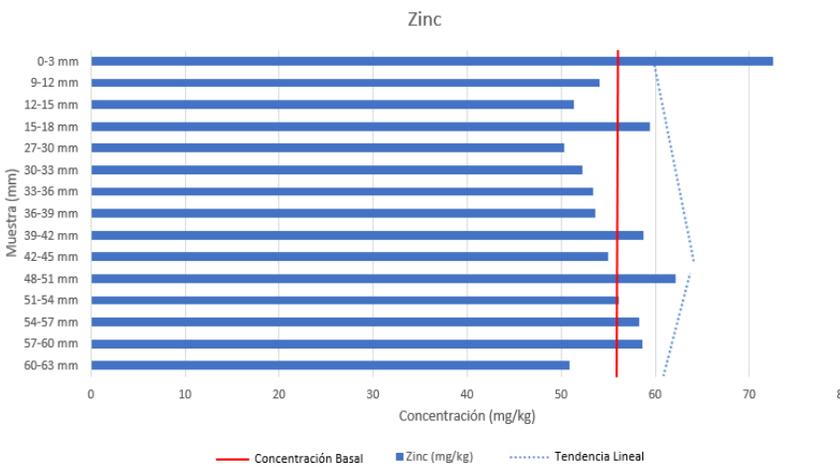
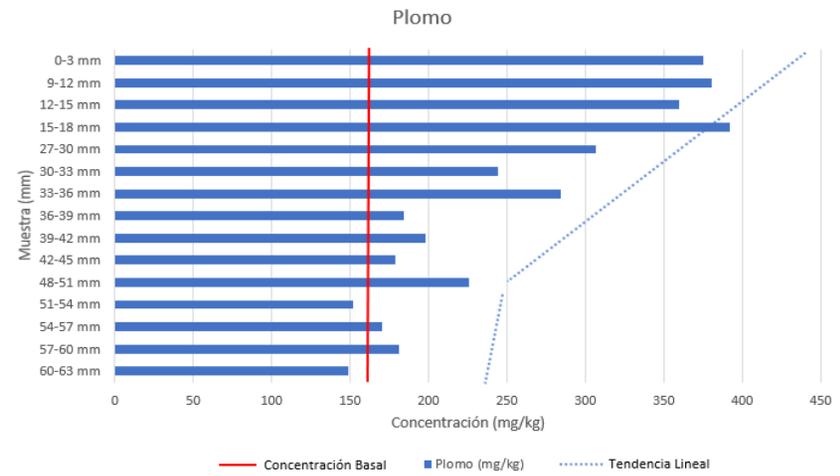
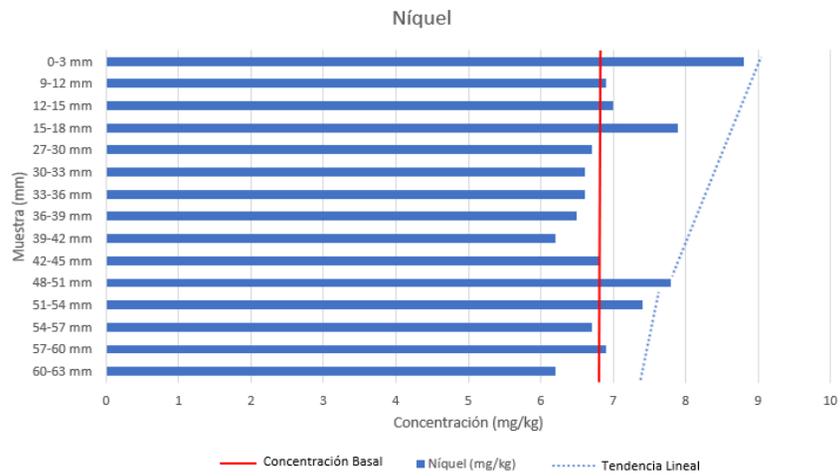


Figura 21. Comportamiento de los metales Lago Xihu

Fuente: Elaboración propia.

Los metales Pb y Hg que exhiben diferencias estadísticamente significativas (figura 19), muestran una tendencia al aumento en las concentraciones de los grupos del centro hacia las más superficiales de la columna de sedimento, en el caso del plomo. Y el mercurio presenta una tendencia a la disminución en las muestras superficiales, aunque con mayores concentraciones que en las muestras más profundas. Lo cual puede ser indicio de la actividad antrópica como el uso de artefactos electrónicos como microondas (As), los residuos de aguas, la combustión de petróleo y combustibles fósiles, la dispersión atmosférica de pesticidas y fertilizantes (Zn y Cu), y presencia de cenizas por actividad volcánica, entre otros.

Con respecto a la figura 20 y 21, se muestran las concentraciones obtenidas de cada metal analizado con su respectiva concentración basal. Donde se observa que el plomo es el elemento que posee las concentraciones más altas entre todos los metales analizados, especialmente en las muestras de los estratos superiores del núcleo analizado (de la muestra 33-36 mm a la muestra 0-3 mm), mostrando concentraciones de más del doble de su concentración basal (27-30 mm a 0-3 mm). Estas muestras (33-36 mm – 0-3 mm), corresponden aproximadamente al periodo de años de 1985 en adelante, coincidiendo con los años donde existía la actividad antrópica por el turismo y la construcción de las bases de investigación en la Península. Antes de esta fecha ya existía la construcción de una base aérea y las bases de Rusia, Chile y Uruguay, las cuales pueden haber incidido en el aumento del mercurio mediante dispersión de los contaminantes producto de la combustión de petróleo y combustibles fósiles para el uso de autos y la actividad del aeródromo, el uso de pinturas, la eliminación de desechos y residuos, los desechos de aguas residuales y el uso de pilas. En 1985 se inauguró la base de Brasil que luego fue desmontada y la base de China Gran Muralla que se encuentra ubicada cercana al Lago Xihu, y a lo largo de los años hasta la actualidad se continuaron construyendo bases científicas y refugios en la Península Fildes, lo que puede haber influido en las altas concentraciones en este

periodo con las actividades mencionadas anteriormente, además de la fabricación y utilización de pintura, el reciclaje de baterías, y entre otros.

De igual forma, existe registro de actividad volcánica en la Isla Decepción en 1970, 1992, 1999 y 2014-2015 (Pedrazzi et al., 2014), la cual por dispersión atmosférica pudo existir esparcimiento de cenizas, partículas o contaminantes que se liberó por las erupciones. Cabe mencionar que, durante el transcurso del tiempo, se han descubierto volcanes que pudieron afectar las concentraciones de las muestras en este rango de años.

El otro metal que muestra concentraciones altas es el Hg. Este posee un comportamiento variado debido a que, en general, las concentraciones de este metal van en incremento en relación con las muestras más superficiales y en las muestras más profundas se presentan concentraciones menores, sin embargo, presenta aumentos en ciertas muestras como la 36-39 mm, 42-45 mm, 48-51 mm y 54-57 mm (figura 21). Esto puede deberse a diversos factores, tanto actividad antrópica y/o volcánica, como también a la deposición atmosférica. En la profundidad de 27-30 milímetros se muestra el mayor aumento de sus concentraciones, correspondiente a los años 1991-1996 aprox., donde ya existía presencia antrópica por las bases científicas, especialmente la Base de China Gran Muralla que ocupa como fuente de agua potable al Lago Xihu, y el turismo activo de la Península, y también actividad volcánica antes mencionada. Las partículas liberadas pueden haber afectado la concentración de metales en los sedimentos del Lago Xihu, además de la dispersión y deposición atmosférica que se pudo haber producido a partir de este acontecimiento o por contaminación de otros lugares que llegaron a través de las diversas corrientes de aire, por dispersión de otros lados.

Las concentraciones obtenidas de las muestras con respecto al As presentan elevados valores en las muestras 0-3 mm, 9-12 mm, 12-15 mm y 15-18 mm, las cuales son las muestras más cercanas a la superficie y por consiguiente más

actuales con respecto a los años a los que pertenecen. Estas muestras superan su concentración basal, especialmente las muestras 0-3 mm y 15-18 mm donde se observa un aumento de su concentración basal en más del doble. El As se encuentra de forma natural, pero un aumento de su concentración a gran magnitud es preocupante. La liberación de As es provocada por volcanes, erosión de depósitos minerales y diversos procesos comerciales e industriales que por dispersión atmosférica pueden haber llegado a los sedimentos del Lago Xihu. Además de encontrarlo en microondas, pesticidas, aparatos electrónicos, entre otros. Sin embargo, como la aproximación del rango de años a los que corresponde las muestras equivalen al periodo de 2018-2003, también puede haber afectado la actividad de los volcanes a través de los episodios producidos por el volcán de la Isla Decepción en el año 2014-2015, en la Isla Ross en 2011. Aunque, se considera que una de las principales causas o un gran porcentaje de la razón del aumento de más del doble de su concentración basal es la acción antrópica proveniente de las bases científicas y del turismo que han tenido sus cifras más altas los últimos años y directa o indirectamente producen un incremento de los metales pesados en los lagos y sus sedimentos.

El resto de los metales analizados (Cd, Cr, Cu, Ni y Zn) muestran un leve aumento con respecto a sus concentraciones basales, sin embargo, es relevante continuar monitoreando las concentraciones de estos metales por cualquier cambio significativo en sus valores.

Tabla 20. Índice de Geoacumulación Lago Xihu

LAGO XIHU																
Igeo									INTERPRETACIÓN							
Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Igeo As	Igeo Cd	Igeo Cr	Igeo Cu	Igeo Ni	Igeo Pb	Igeo Zn	Igeo Hg
X0-3 mm	0,86	-0,05	-0,46	-0,82	-0,21	0,62	-0,21	0,60	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado				
X9-12 mm	0,03	-0,43	-0,78	-0,83	-0,56	0,64	-0,63	0,30	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado				
X12-15 mm	0,15	-0,42	-0,79	-0,86	-0,54	0,56	-0,71	0,86	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado				
X15-18 mm	0,57	-0,21	-0,62	-0,72	-0,37	0,68	-0,50	0,94	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado				
X27-30 mm	-0,39	-0,63	-0,79	-0,64	-0,61	0,32	-0,74	0,99	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
X30-33 mm	-0,75	-0,80	-0,87	-0,55	-0,63	0,00	-0,69	0,22	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
X33-36 mm	-1,24	-0,76	-0,87	-0,52	-0,63	0,22	-0,65	-0,68	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado

X36-39 mm	-1,04	-0,76	-0,67	-0,47	-0,65	-0,41	-0,65	0,09	No contaminado a moderadamente contaminado							
X39-42 mm	-0,93	-0,79	-0,74	-0,62	-0,72	-0,30	-0,52	-0,75	No contaminado							
X42-45 mm	-0,77	-0,70	-0,59	-0,46	-0,58	-0,46	-0,61	-0,30	No contaminado							
X48-51 mm	-0,36	-0,50	-0,38	-0,38	-0,39	-0,12	-0,43	0,32	No contaminado a moderadamente contaminado							
X51-54 mm	-0,33	-0,58	-0,49	-0,52	-0,46	-0,69	-0,58	-0,67	No contaminado							
X54-57 mm	-0,56	-0,60	-0,58	-0,62	-0,61	-0,52	-0,53	-0,18	No contaminado							
X57-60 mm	-0,65	-0,52	-0,54	-0,51	-0,56	-0,43	-0,52	-0,98	No contaminado							
X60-63 mm	-0,85	-0,64	-0,75	-0,69	-0,72	-0,72	-0,72	-0,62	No contaminado							

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Factor de Enriquecimiento Lago Xihu

LAGO XIHU																
FE									INTERPRETACIÓN							
Muestra	FE As	FE Cd	FE Cr	FE Cu	FE Ni	FE Pb	FE Zn	FE Hg	FE As	FE Cd	FE Cr	FE Cu	FE Ni	FE Pb	FE Zn	FE Hg
X0-3 mm	2,11	1,12	0,84	0,66	1,00	1,78	1,00	1,76	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
X9-12 mm	1,58	1,15	0,91	0,87	1,05	2,41	1,00	1,91	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)				
X12-15 mm	1,82	1,22	0,95	0,90	1,12	2,41	1,00	2,97	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado				
X15-18 mm	2,10	1,22	0,92	0,86	1,09	2,26	1,00	2,71	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado
X27-30 mm	1,28	1,08	0,97	1,07	1,10	2,09	1,00	3,31	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado				
X30-33 mm	0,96	0,93	0,88	1,10	1,04	1,61	1,00	1,88	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
X33-36 mm	0,67	0,93	0,86	1,09	1,02	1,83	1,00	0,98	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
X36-39 mm	0,76	0,92	0,98	1,13	1,00	1,18	1,00	1,67	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							

X39-42 mm	0,75	0,83	0,86	0,93	0,87	1,16	1,00	0,85	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
X42-45 mm	0,89	0,94	1,02	1,11	1,02	1,11	1,00	1,24	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
X48-51 mm	1,05	0,95	1,04	1,04	1,03	1,24	1,00	1,68	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
X51-54 mm	1,19	1,00	1,07	1,04	1,09	0,93	1,00	0,94	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
X54-57 mm	0,98	0,95	0,97	0,93	0,95	1,00	1,00	1,27	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
X57-60 mm	0,91	1,00	0,98	1,01	0,97	1,06	1,00	0,73	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
X60-63 mm	0,92	1,06	0,98	1,02	1,00	1,00	1,00	1,07	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Índice de carga contaminante Lago Xihu

LAGO XIHU		
Muestra	PLI	Interpretación
X0-3 mm	1,38172824	Existencia de contaminación (contaminado)
X9-12 mm	1,34209435	Existencia de contaminación (contaminado)
X12-15 mm	1,35483723	Existencia de contaminación (contaminado)
X15-18 mm	1,3767267	Existencia de contaminación (contaminado)
X27-30 mm	1,34459692	Existencia de contaminación (contaminado)
X30-33 mm	1,31155341	Existencia de contaminación (contaminado)
X33-36 mm	1,29658552	Existencia de contaminación (contaminado)
X36-39 mm	1,30241123	Existencia de contaminación (contaminado)
X39-42 mm	1,28859051	Existencia de contaminación (contaminado)
X42-45 mm	1,30046265	Existencia de contaminación (contaminado)
X48-51 mm	1,33428062	Existencia de contaminación (contaminado)
X51-54 mm	1,3021617	Existencia de contaminación (contaminado)
X54-57 mm	1,30438422	Existencia de contaminación (contaminado)
X57-60 mm	1,29741078	Existencia de contaminación (contaminado)
X60-63 mm	1,28263539	Existencia de contaminación (contaminado)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los índices se presentan en las tablas 20, 21 y 22. En la tabla 20 se muestra los resultados del índice de geoacumulación (Igeo), donde se observa que para todos los elementos que se analizaron, ninguno supera el valor de 0 o de forma muy leve, por lo tanto, el índice Igeo afirma que para las muestras estudiadas no existe contaminación por los metales Cd, Cr, Cu, Ni y Zn. Sin embargo, para los metales As, Pb y Hg las muestras obtuvieron la clasificación de no contaminado a moderadamente contaminado con valores entre $0 \leq Igeo \leq 1$, aún así los resultados no son un riesgo. De esta manera, se puede inferir que la concentración de los metales en las muestras del Lago Xihu no son un peligro para la salud del ecosistema ni de los habitantes.

El mercurio es el elemento que presenta un mayor valor del índice Igeo (0,989572605; $Igeo > 0$; No contaminado a moderadamente contaminado), sin embargo, sigue siendo un valor bajo por lo cual no presenta un peligro. Este se presenta en la muestra 27-30 mm, la cual corresponde a un periodo de años de 1996 a 1991 aproximadamente, donde no existe un registro de actividad volcánica, pero si hay presencia antrópica, por lo que esta variación puede deberse a ello.

Las regiones polares como la Antártida actúan como sumideros del mercurio procedente del medio natural y de las actividades humanas. Además, se generan emisiones de mercurio por la actividad volcánica y, reciben a través de la atmósfera el que se libera en otras partes del planeta de forma natural y mediante actividades como la industria o la quema de combustibles fósiles, poniendo en riesgo sus ecosistemas acuáticos y terrestres y la biodiversidad que albergan (Barbosa & Cuervo, 2021; Motas et al., 2021).

El plomo y arsénico también presentan valores levemente mayores a 0, con clasificación No contaminado a moderadamente contaminado ($0 \leq Igeo \leq 1$). El enriquecimiento de estos metales puede deberse a que el Pb se asocia a la combustión de compuestos derivados del petróleo que contienen tetrametilo o

tetraetilo de Pb (del Aguila Juárez, 2005), además de ser un componente en las baterías y pilas.

En cuanto a los resultados obtenidos del factor de enriquecimiento (FE) (tabla 21), el arsénico, plomo y mercurio obtuvieron valores con clasificación de enriquecimiento moderado ($2 \leq FE \leq 5$), mientras que el restante de los metales obtuvo un valor de FE correspondiente a un enriquecimiento mínimo ($FE \leq 2$). Todos los metales analizados en las muestras del Lago Xihu, mostraron un valor de FE menor que 10, por lo que el origen de su presencia en el suelo se debe a la roca madre (Lawson y Winchester, 1979).

Mediante el análisis de Igeo, se determinó que ninguno de los metales analizados supone un riesgo o contaminación para el Lago Xihu, sin embargo, por medio de los resultados obtenidos del índice FE, se muestra que por los elementos mercurio, plomo y arsénico existe enriquecimiento moderado, lo que representa riesgos para este lago.

La tabla 22 presenta los resultados de PLI para todos los metales en cada muestra del Lago Xihu, donde todas las muestras analizadas presentan evidencia de contaminación

El mayor valor de PLI ($PLI = 1,38172824$) se obtiene en la muestra más superficial, 0-3 mm, lo que denota que esta muestra que corresponde a un periodo de años de 2018 a 2014, es la con mayor contaminación de todos los metales analizados. Este factor es a tener en cuenta debido a que puede ser dañino para los habitantes de la zona que utilizan las aguas de este lago.

Lago Kitiesh

De acuerdo con cada muestra del Lago Kitiesh se obtuvo su concentración con respecto a cada elemento analizado y su concentración basal.

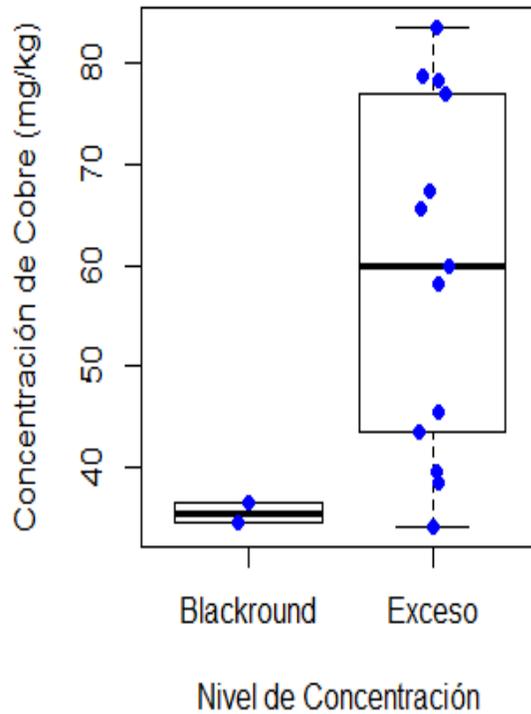
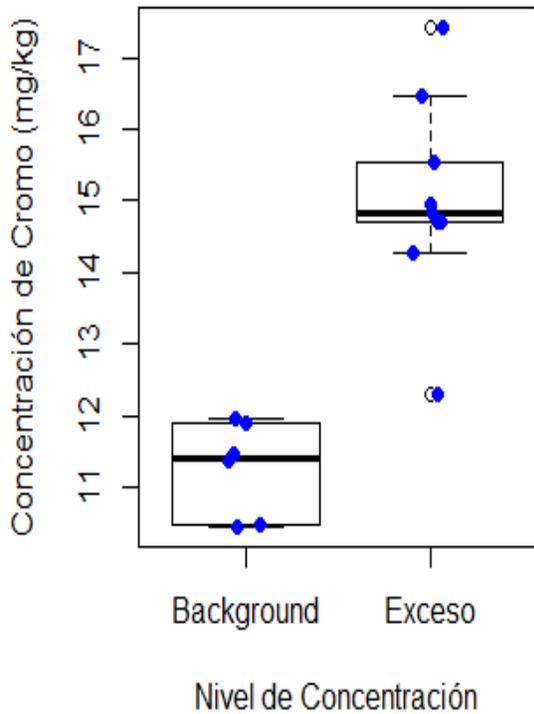
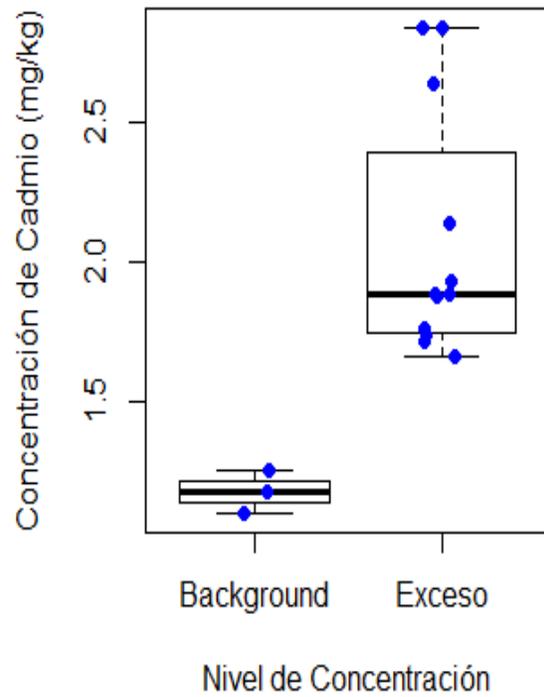
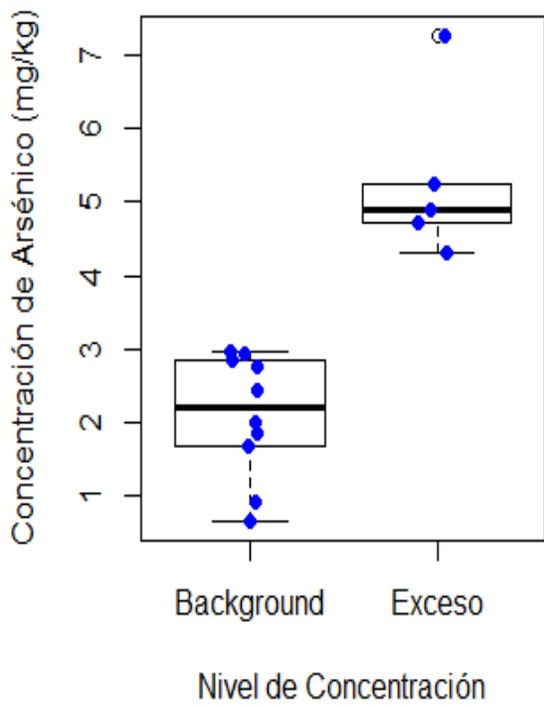
Con estos resultados se desarrollaron diagramas de caja (figura 22) y gráficos (figura 23 y 24) por cada metal con su concentración obtenida y su concentración basal respectivamente.

A través del análisis estadístico, se obtuvo que el Cd, Pb y Hg presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$) con respecto a sus concentraciones basales determinadas con una tendencia al aumento en las muestras más superficiales de la columna de sedimento, mientras que el As, Cr, Cu, Ni y Zn muestran que la diferencia entre su concentración basal y sus concentraciones obtenidas no es estadísticamente significativa ($p > 0,05$) (Anexo). De esta forma, en la figura 22 se pueden observar estos resultados de forma gráfica, mostrando la presencia de valores atípicos en los elementos As, Cr, Pb y Hg, lo que indica que existe un valor que se encuentra distante del comportamiento de las demás concentraciones.

Los valores atípicos encontrados en los metales corresponden a muestras diferentes. En el caso del As, el valor atípico pertenece a la muestra 99-102 mm; para el Cr y Pb, la muestra que obtuvo el valor atípico es la 57-60 mm; y para el Hg, corresponde a la muestra más cercana a la superficie, 0-3 mm.

El Cd, Cr, Ni y Pb tienen un comportamiento de datos donde la mediana se encuentra más cercana al primer cuartil, lo que indica que las concentraciones presentan un comportamiento no simétrico, con la mayoría de las concentraciones de las muestras bajo la mediana de la clasificación “exceso”, presentando mayor tendencia a valores más bajos y no tan alejados del nivel basal.

El diagrama de caja del cobre muestra un comportamiento de la clasificación “Exceso” simétrica, con los datos de las concentraciones distribuidas de forma uniforme con su mediana con un valor de 60 mg/kg.



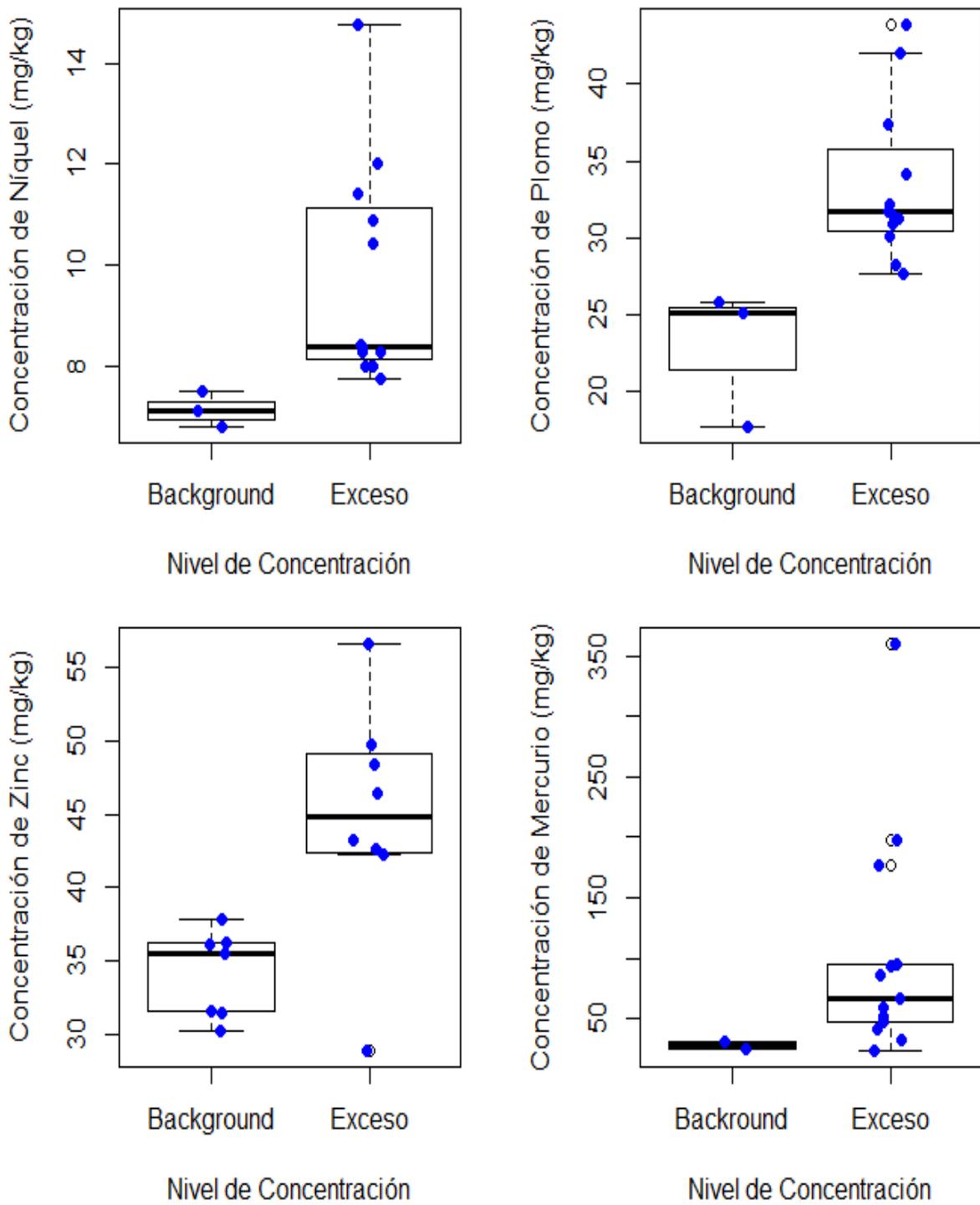


Figura 22. Diagrama de caja Lago Kitiash

Fuente: Elaboración propia.

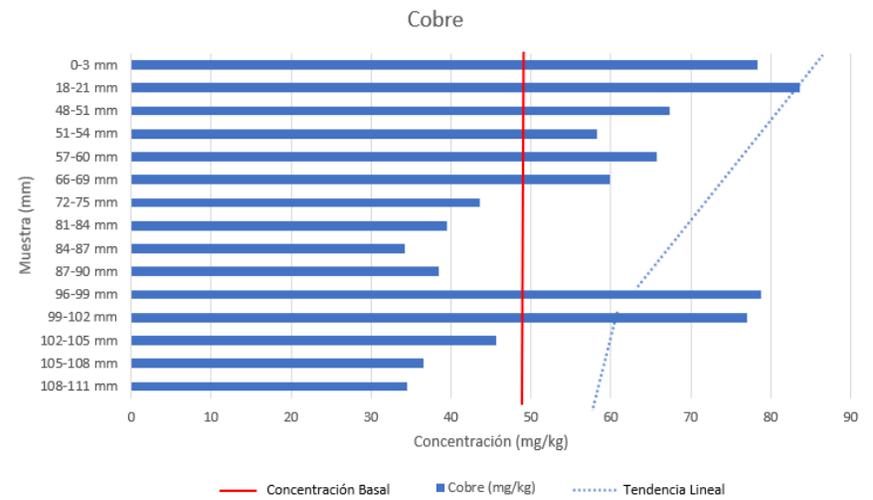
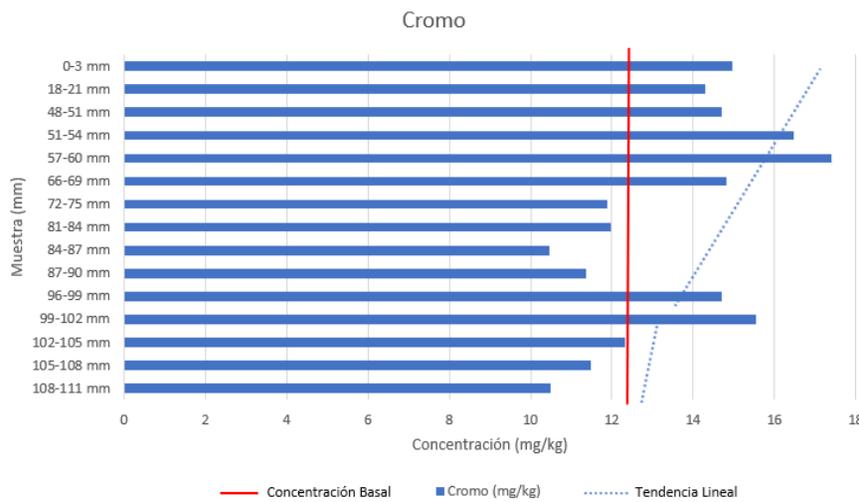
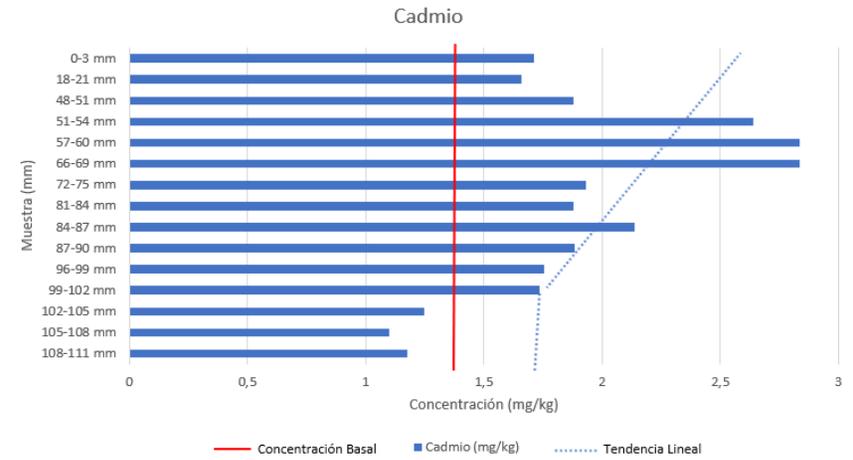
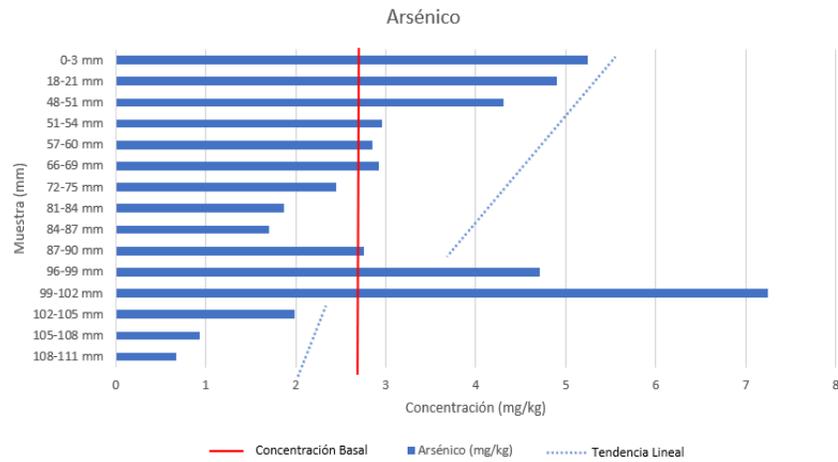


Figura 23. Comportamiento de los metales Lago Kitiesh

Fuente: Elaboración propia.

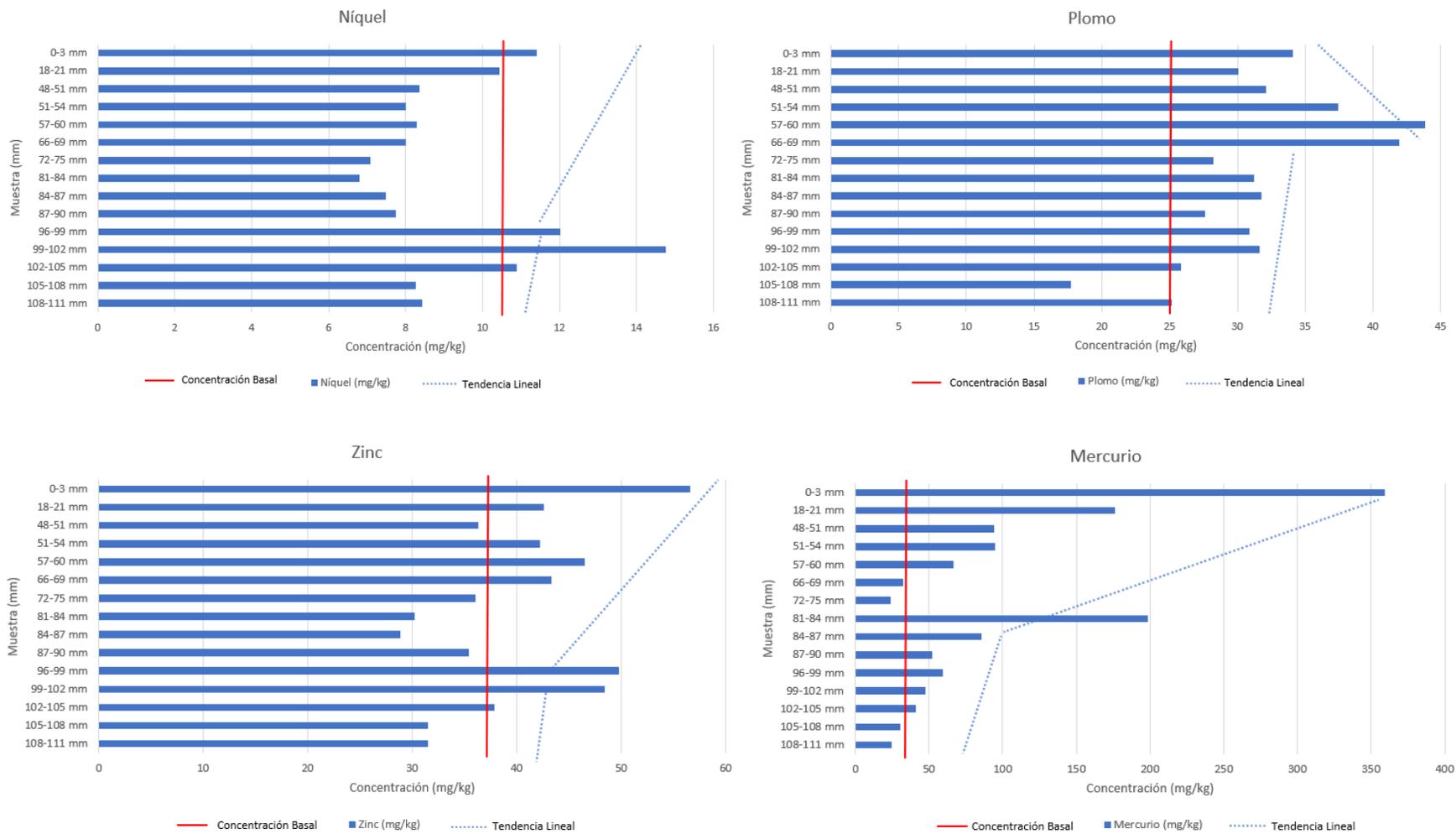


Figura 24. Comportamiento de los metales Lago Kitiesh

Fuente: Elaboración propia.

Respecto de la figura 23 y 24, se presentan los metales y sus concentraciones destacando al Hg, siendo el elemento que obtuvo las concentraciones más altas específicamente en el estrato superior, excediendo en más de siete veces su concentración basal. La muestra es 0-3 mm (0-0,3 cm.) correspondiente al periodo de 2018-2012 aproximadamente. En estos años, la actividad antrópica producida por la Iglesia de la Santísima Trinidad, al aeródromo Teniente Rodolfo Marsh Martin y el Hospital de la Fuerza aérea, además de las localidades Villa las Estrellas, bases Frei y Bellingshausen, pueden ser una razón del incremento de la concentración de la muestra, ya que el Lago Kitiash se encuentra cercano a estos lugares con presencia humana. Acciones como el uso de combustibles fósiles por la utilización de vehículos, uso de pinturas, pilas, eliminación de desechos y aguas residuales pueden producir el incremento de mercurio en los sedimentos. A esto se le adiciona el aumento exponencial de turistas que se ha generado en los últimos años. Y debido a que no se ha registrado gran actividad volcánica, se infiere que el mayor detonante de este aumento del nivel de mercurio sean las actividades antrópicas.

En la muestra de profundidad 81-84 milímetros se produce otro incremento en la concentración del Hg. En el caso de esta muestra, su equivalente aproximado en años es de 1879-1854, en el cual no había presencia antrópica y tampoco existe un registro de actividad volcánica en la Península Fildes en este rango de años, por lo que se asume alguna contaminación por dispersión atmosférica producida por industrias electrónicas, plásticas y de papel y celulosa.

El cobre, el zinc y el plomo son tres elementos que también exhiben concentraciones elevadas, aunque en magnitud menor que las del mercurio. Los tres metales muestran una tendencia al aumento de sus niveles en las muestras más superficiales de la columna de sedimento. A pesar de que estos metales superan sus concentraciones basales establecidas, el aumento se sitúa dentro de un rango más reducido, sin alcanzar el doble del valor de sus niveles basales. La

mayor concentración en el caso del cobre se presenta en la muestra superficial 18-21 perteneciente aproximadamente al año 1990, la cual su enriquecimiento por este metal puede deberse a actividad antrópica por parte de la base Bellingshausen que se encuentra cercana al lago Kitiash, mediante contaminación por petróleo y pinturas. De esta misma manera la dispersión atmosférica de contaminantes de la industria minera, metalúrgica y de acero, abonos de animales y fertilizantes (Smith, 1996) que terminan en el lago Kitiash, donde son absorbidos por los sedimentos, pueden afectar sus concentraciones.

Por parte del plomo, la muestra que exhibe la mayor concentración es también el valor atípico que se observa en el diagrama (figura 22), que es la muestra 57-60 mm, correspondiente aproximadamente al año 1931. El Pb se puede encontrar en baterías y en la combustión de compuestos derivador del petróleo, sin embargo, según los registros en el año correspondiente a la muestra no existía presencia antrópica, por lo cual este incremento de la concentración de la muestra puede deberse a alguna alteración natural como lixiviación del suelo, desplazamiento de sedimentos y/o derretimiento de glaciares. No obstante, el plomo rara vez se encuentra de forma elemental en el medio ambiente, más bien forma parte de minerales como la galena, la cerusita, el sulfuro de plomo, carbonato de plomo y la anglesita. De esta manera, en los años de la muestra puede haber alguno de estos minerales que la alteraron o partículas de pesticidas y fertilizantes traídas por medio de dispersión atmosférica que fueron absorbidas por los sedimentos produciendo un incremento de sus niveles.

En cuanto a los niveles de Zn cuantificados, presenta su mayor concentración en la muestra más superficial 0-3 mm correspondiente aproximadamente al periodo de 2018-2012 donde puede haber afectado la actividad antrópica de las bases antárticas Frei, Bellinghausen y al Aeródromo Teniente Rodolfo Marsh Martin que se encuentran cercanas al lago, además de la presencia de turismo de la

Península donde se puede encontrar este metal en baterías y pilas de consumo humano.

Respecto al resto de los metales analizados (As, Cd, Cr y Ni), se exhiben sus niveles superiores a sus concentraciones basales, pero levemente. El enriquecimiento de estos elementos puede estar influenciado por perturbaciones naturales ya que no se presenta grandes incrementos en sus niveles obtenidos. Con excepción del arsénico en la muestra 99-102 mm perteneciente a años anteriores a 1830, por lo que no es posible determinar con certeza la causa de esta alteración que difiere del comportamiento de este metal ya que no hay presencia antrópica ni registro de actividad volcánica, por lo tanto, se consideran variaciones producto de la naturaleza como la lixiviación del suelo, la erosión de suelos y rocas, la dispersión atmosférica en particular, o algún acontecimiento volcánico sucedido alrededor de el periodo donde por dispersión puede haber afectado a los sedimentos del lago Kitiash.

Cabe recalcar que las fechas que se utilizan de referencia de las concentraciones obtenidas, son aproximaciones y no son totalmente certeras. Es por esto por lo cual se infiere que el acontecimiento que produjo el incremento de los niveles de la muestra 99-102 mm en los metales arsénico, cobre, cromo, níquel y zinc, puede tener relación con lo ocurrido en el lago Hotel en la muestra 27-30 mm para la mayoría de los metales.

Tabla 23. Índice de Geoacumulación Lago Kitiash

LAGO KITIESH																
Igeo									INTERPRETACIÓN							
Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Igeo As	Igeo Cd	Igeo Cr	Igeo Cu	Igeo Ni	Igeo Pb	Igeo Zn	Igeo Hg
K0-3 mm	0,37	-0,21	-0,32	0,11	-0,48	-0,14	0,02	2,74	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	Moderado a fuertemente contaminado
K18-21 mm	0,27	-0,25	-0,39	0,20	-0,61	-0,32	-0,39	1,72	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	Moderadamente contaminado
K48-51 mm	0,09	-0,07	-0,34	-0,11	-0,92	-0,23	-0,63	0,80	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
K51-54 mm	-0,46	0,42	-0,18	-0,32	-0,99	-0,01	-0,41	0,82	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
K57-60 mm	-0,51	0,52	-0,10	-0,14	-0,94	0,22	-0,27	0,30	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
K66-69 mm	-0,48	0,53	-0,33	-0,28	-0,99	0,16	-0,37	-0,72	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado
K72-75 mm	-0,73	-0,03	-0,65	-0,74	-1,16	-0,41	-0,63	-1,16	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado

K81-84 mm	-1,12	-0,07	-0,64	-0,88	-1,22	-0,27	-0,89	1,88	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	Moderadamente contaminado
K84-87 mm	-1,26	0,12	-0,84	-1,09	-1,08	-0,25	-0,95	0,67	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
K87-90 mm	-0,56	-0,06	-0,72	-0,92	-1,03	-0,45	-0,66	-0,05	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
K96-99 mm	0,21	-0,17	-0,35	0,12	-0,40	-0,28	-0,17	0,14	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
K99-102 mm	0,83	-0,18	-0,27	0,08	-0,11	-0,25	-0,21	-0,17	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
K102-105 mm	-1,03	-0,66	-0,60	-0,67	-0,54	-0,54	-0,56	-0,40	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
K105-108 mm	-2,12	-0,84	-0,70	-0,99	-0,94	-1,08	-0,83	-0,83	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
K108-111 mm	-2,59	-0,75	-0,83	-1,07	-0,91	-0,58	-0,83	-1,12	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Factor de Enriquecimiento Lago Kitiesh

LAGO KITIESH																
FE								INTERPRETACIÓN								
Muestra	FE As	FE Cd	FE Cr	FE Cu	FE Ni	FE Pb	FE Zn	FE Hg	FE As	FE Cd	FE Cr	FE Cu	FE Ni	FE Pb	FE Zn	FE Hg
K0-3 mm	1,27	0,86	0,79	1,07	0,71	0,90	1,00	6,62	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento significativo						
K18-21 mm	1,58	1,11	1,00	1,51	0,86	1,05	1,00	4,31	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado						
K48-51 mm	1,64	1,47	1,21	1,43	0,81	1,32	1,00	2,70	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado						
K51-54 mm	0,96	1,77	1,17	1,06	0,67	1,32	1,00	2,34	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado						
K57-60 mm	0,84	1,73	1,12	1,09	0,63	1,40	1,00	1,49	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado						
K66-69 mm	0,93	1,86	1,03	1,07	0,65	1,44	1,00	0,79	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
K72-75 mm	0,93	1,52	0,99	0,93	0,69	1,16	1,00	0,69	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
K81-84 mm	0,85	1,76	1,19	1,01	0,79	1,54	1,00	6,83	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento significativo						

K84-87 mm	0,81	2,10	1,09	0,91	0,91	1,64	1,00	3,09	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado				
K87-90 mm	1,07	1,51	0,96	0,84	0,77	1,16	1,00	1,53	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
K96-99 mm	1,30	1,00	0,88	1,22	0,85	0,92	1,00	1,24	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
K99-102 mm	2,06	1,02	0,96	1,23	1,08	0,97	1,00	1,03	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)						
K102-105 mm	0,72	0,94	0,97	0,93	1,01	1,02	1,00	1,12	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
K105-108 mm	0,41	0,99	1,09	0,89	0,92	0,84	1,00	1,00	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
K108-111 mm	0,30	1,06	1,00	0,84	0,94	1,19	1,00	0,82	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Índice de carga contaminante Lago Kitiesh

LAGO KITIESH		
Muestra	PLI	Interpretación
K0-3 mm	1,45468721	Existencia de contaminación (contaminado)
K18-21 mm	1,39323226	Existencia de contaminación (contaminado)
K48-51 mm	1,35343807	Existencia de contaminación (contaminado)
K51-54 mm	1,35916477	Existencia de contaminación (contaminado)
K57-60 mm	1,35839518	Existencia de contaminación (contaminado)
K66-69 mm	1,33623139	Existencia de contaminación (contaminado)
K72-75 mm	1,28983019	Existencia de contaminación (contaminado)
K81-84 mm	1,36613875	Existencia de contaminación (contaminado)
K84-87 mm	1,31500302	Existencia de contaminación (contaminado)
K87-90 mm	1,30469538	Existencia de contaminación (contaminado)
K96-99 mm	1,35315458	Existencia de contaminación (contaminado)
K99-102 mm	1,36583053	Existencia de contaminación (contaminado)
K102-105 mm	1,29327466	Existencia de contaminación (contaminado)
K105-108 mm	1,25188776	Existencia de contaminación (contaminado)
K108-111 mm	1,25182763	Existencia de contaminación (contaminado)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los índices se presentan en las tablas 23, 24 y 25.

En la tabla 23 se presenta los resultados del índice Igeo de los metales para cada muestra. Su comportamiento se agrupa según la clasificación: moderado a fuertemente contaminado con el elemento Hg, No contaminado a moderadamente contaminado con el As, Cd, Cu, Pb y Hg, Moderadamente contaminado con Hg, y No contaminado con muestras de todos los metales (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg).

El cromo, níquel y zinc son los únicos elementos que no presentan valores de Igeo superiores a 0, con una clasificación en todas sus muestras de No contaminado ($I_{geo} \leq 0$). Los metales restantes muestran valores superiores a 0, aunque de forma leve.

El elemento que mayores valores de Igeo presenta es el mercurio ($2,743671627; 2 \leq I_{geo} \leq 3$; moderado a fuertemente contaminado), lo que puede llegar a ser peligroso para el hábitat. Este resultado pertenece a la muestra más superficial de 0-3 mm (0-0,3 cm), correspondiente al periodo de 2018 – 2012 aproximadamente. Cercano a estos años, en 2011, el monte Erebus tuvo su última erupción registrada (García, 2021). Adicionalmente, en 2017 se descubrieron más de 100 volcanes distribuidos en las profundas cuencas de la Antártida Occidental (COTECNO, 2017). Estos acontecimientos pudieron influir en la concentración de Hg en los sedimentos del Lago Kitiash. También la presencia antrópica pudo ser un factor en el alto valor del índice con el uso de pinturas, combustión de basuras o de combustibles al aire libre.

En lo que respecta a los resultados de los factores de enriquecimiento (FE) de los metales pesados en cada muestra del Lago Kitiash (tabla 24), todos los elementos mostraron para FE un valor menor a 10, por lo que su presencia en el suelo se debe a la roca madre (Lawson y Winchester, 1979).

Los elementos con los resultados más altos de FE son el arsénico, cadmio y mercurio, con clasificación de Enriquecimiento moderado ($2 \leq FE \leq 5$) para el As,

Cd y Hg, y con Enriquecimiento significativo ($5 \leq FE \leq 20$) para el Hg, mostrando los valores más altos de FE en las muestras 0-3 mm (0-0,3 cm) con $FE = 6,622838775$ y 81-84 mm (8,1-8,4 cm) con $FE = 6,833203312$.

El resultado del mercurio de enriquecimiento significativo se debe tener en cuenta ya que, si bien no supera en valor de 10 para indicar una fuente de enriquecimiento antrópica, sigue siendo alto y un riesgo para el hábitat, especialmente debido a que las muestras que arrojaron estos resultados, una de ellas es la más superficial (0-0,3 cm) y corresponde a los años 2018-2012 donde, se menciona anteriormente, existieron algunas actividades volcánicas que pudieron incidir en las concentraciones obtenidas de este metal. Para la muestra 8,1-8,4 cm que corresponde al periodo de 1879-1854 aproximadamente, no hay existencia en esos años de actividad antrópica y según los resultados del índice tampoco tiene un enriquecimiento por esta actividad, solamente por la roca madre (naturalmente), por lo cual se infiere que hubo dispersión y deposición atmosférica de contaminantes que pueden haber influido en la concentración del mercurio, ya que en este periodo de años no hay registro de actividad volcánica.

En cuanto a la tabla 25, se presentan los resultados del índice PLI donde se muestra la existencia de contaminación de todo el conjunto de metales analizados para todas las muestras.

Al igual que en el Lago Xihu, el mayor valor de PLI ($PLI = 1,38172824$) para el Lago Kitiesh se obtiene en la muestra más superficial de 0-3 mm. Esto indica que para la muestra, la cual corresponde a 2018 – 2014 aproximadamente, es la con mayor contaminación de todos los metales analizados. Este es un factor a tener en cuenta ya que podría existir peligro para el medio ambiente y los habitantes de la zona que ocupan sus aguas.

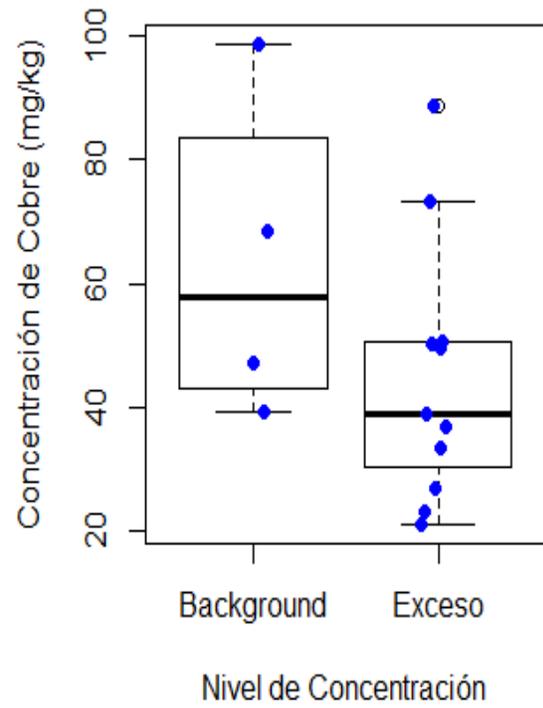
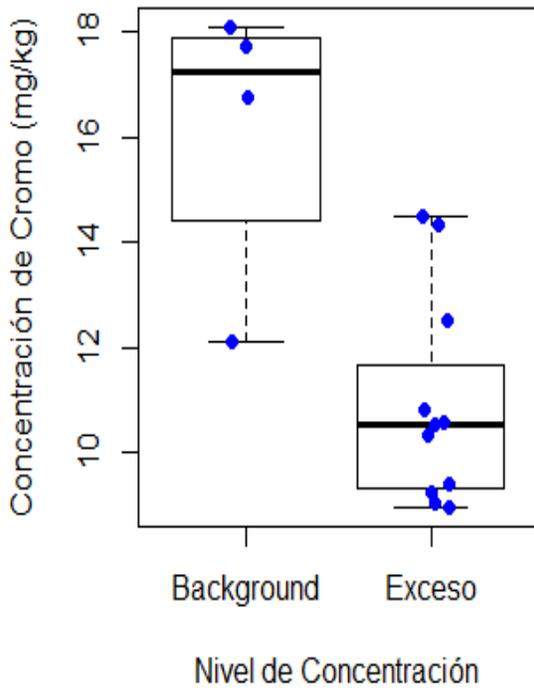
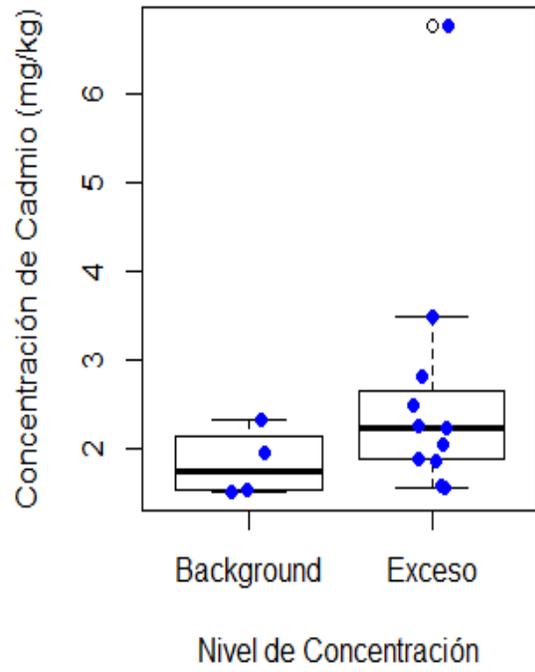
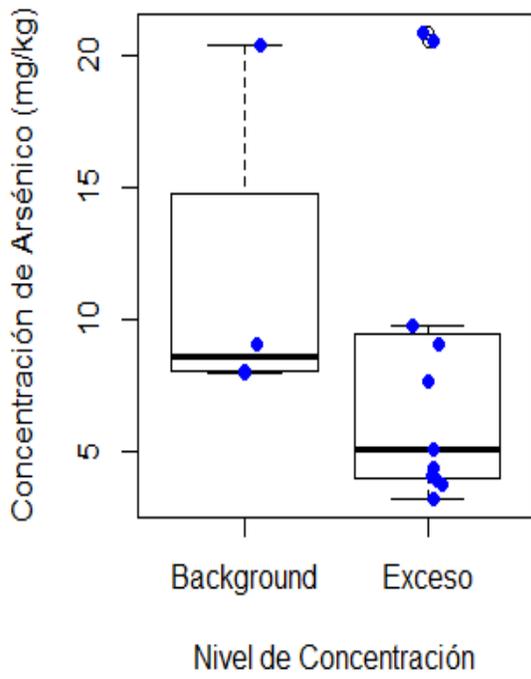
Lago Uruguay

Las concentraciones obtenidas con respecto a los metales analizados en las muestras del Lago Kitiesh y sus concentraciones basales respectivas se presentan a continuación mediante diagramas de caja (figura 25) y gráficos de cada metal (figura 26 y 27).

El análisis estadístico realizado en las concentraciones rebeló que la mayoría de los elementos no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$), con la excepción de los metales Cr y Ni que si exhiben diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sus concentraciones obtenidas para cada muestra y su nivel basal determinado (Anexo), con una tendencia al aumento en sus niveles de las muestras más profundas en la columna de sedimento.

Por medio de los diagramas de caja de la figura 25, es posible tener una imagen gráfica de estas diferencias mencionadas entre las concentraciones de cada metal y su concentración basal respectiva. Se muestra que los elementos As, Cd, Cu, Pb y Hg obtuvieron valores atípicos en sus concentraciones. Estos se presentan en las muestras (figura 26 y 27): el arsénico (As) en las muestras superficiales de 0-3 mm y 6-9 mm; el cadmio (Cd) en la muestra de 27-30 mm; el cobre (Cu) mostró un valor atípico en la muestra de 75-78 mm; el plomo (Pb) se encuentra presente en la muestra superficial de 6-9 mm; mientras que el mercurio (Hg) se destaca en la muestra de 27-30 mm. Estos valores pueden ser por perturbaciones naturales y/o antrópicas. Sobre las muestras cercanas a la superficie con altas valores se infiere que es por interferencias humanas, ya sea de turismo o por las bases presentes.

En el caso de los metales Cr, Ni y Zn, se observa un comportamiento en sus concentraciones no muy distante y/o superior de sus concentraciones basales, por lo cual no presentan grandes perturbaciones. Los elementos Ni y Zn exhiben una tendencia de las concentraciones a estar más cercanas al límite inferior del diagrama de caja en la clasificación de "Exceso", y el Cr, muestra una mediana normal, lo que indica que sus valores poseen una distribución simétrica.



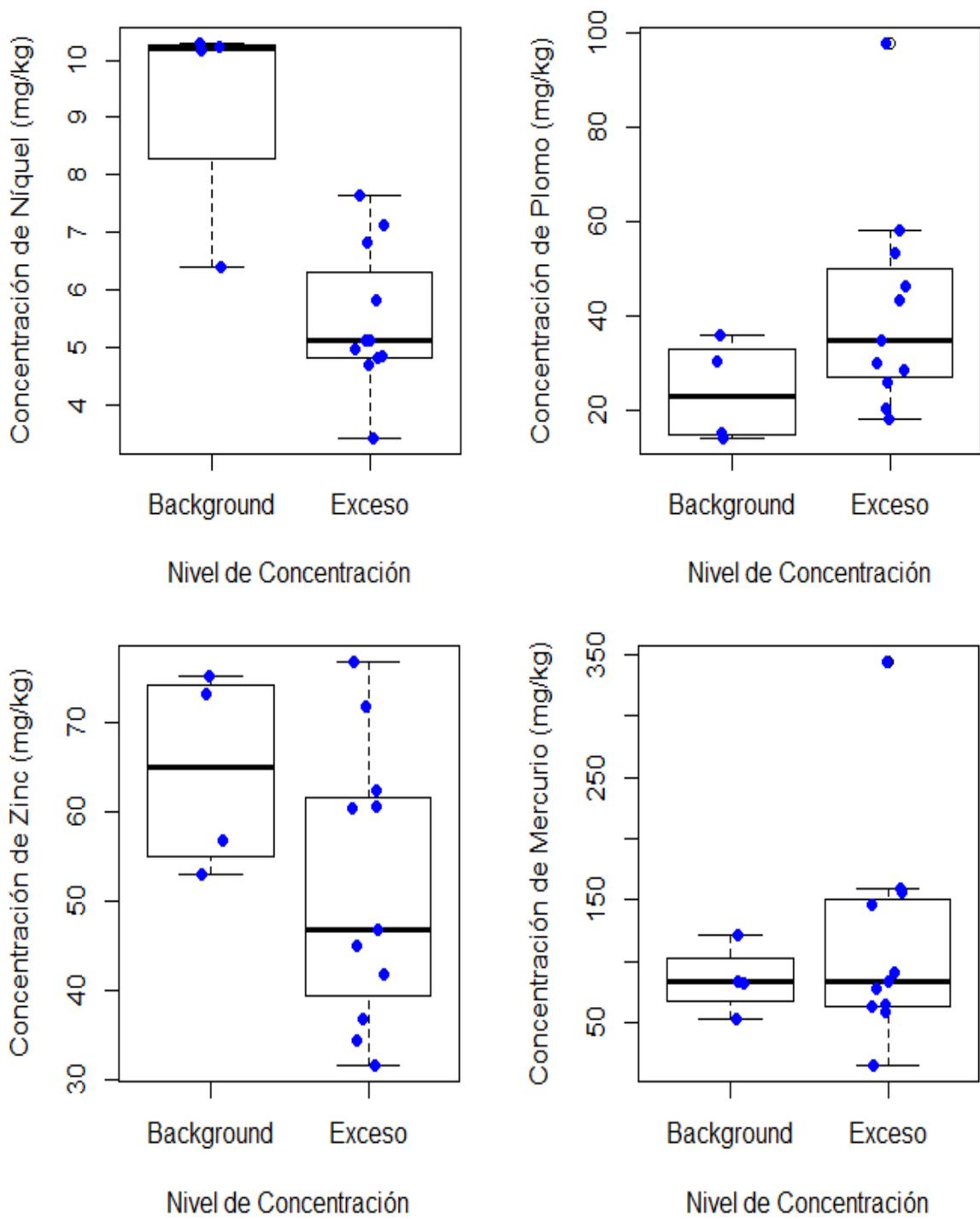


Figura 25. Diagrama de caja Lago Uruguay

Fuente: Elaboración propia.

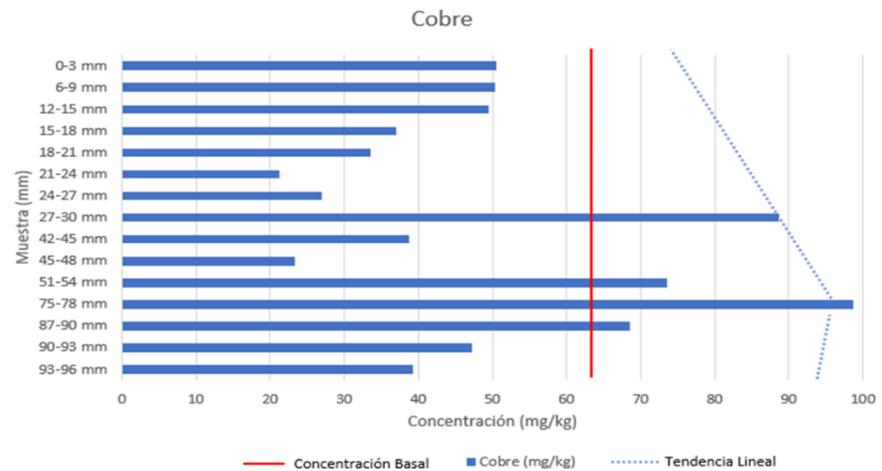
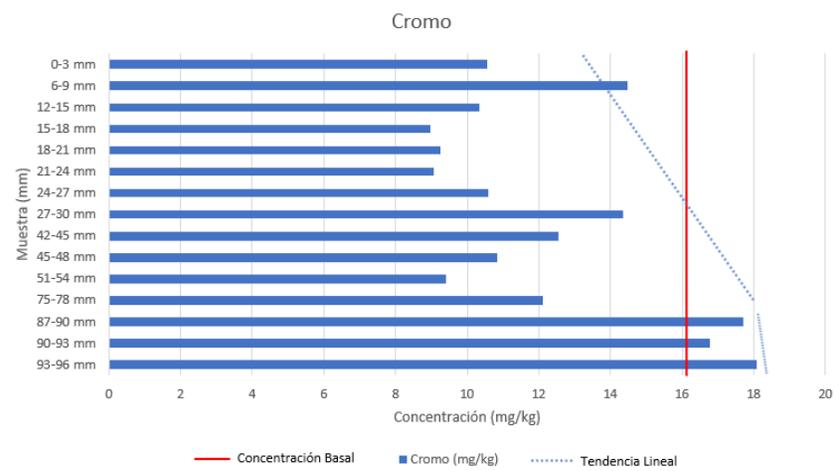
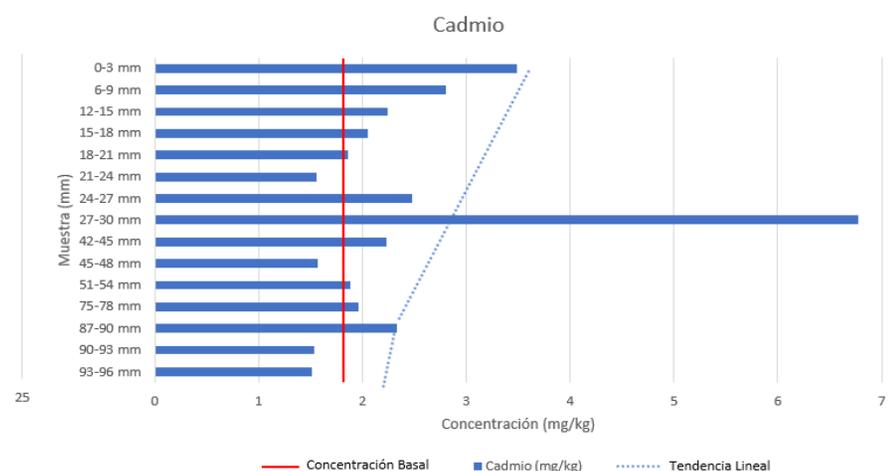
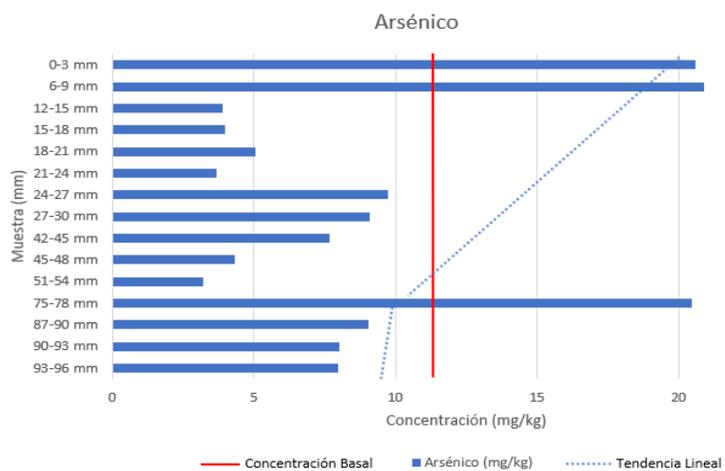


Figura 26. Comportamiento de los metales Lago Uruguay

Fuente: Elaboración propia.

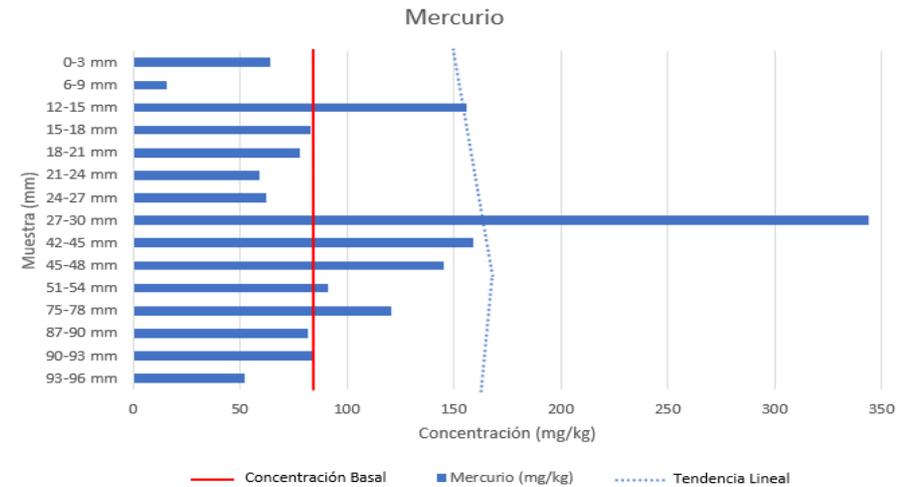
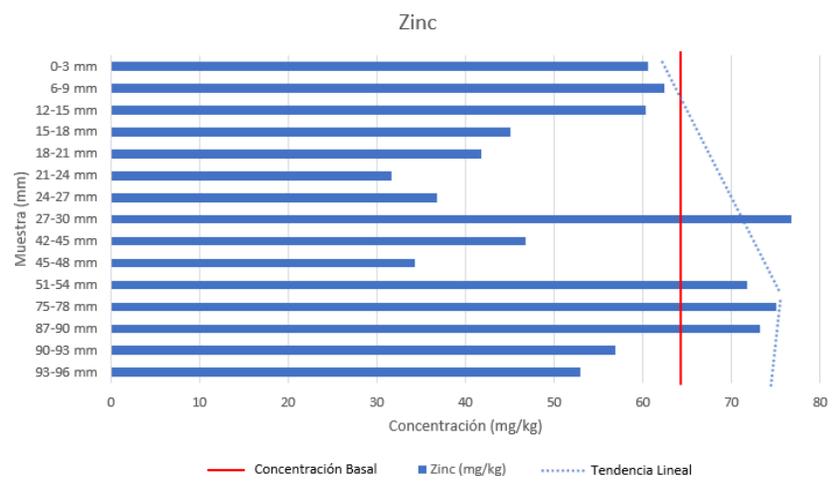
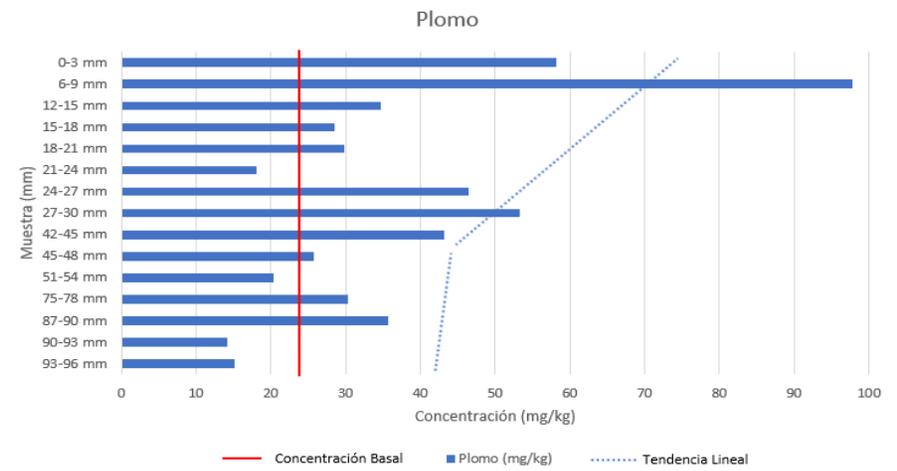
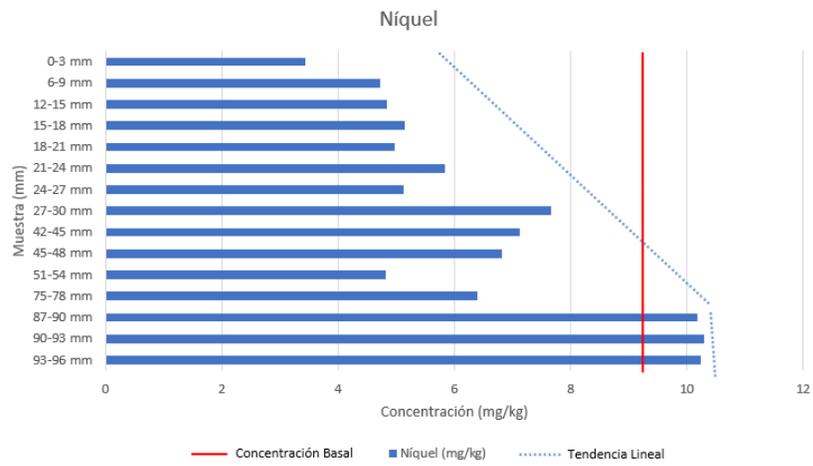


Figura 27. Comportamiento de los metales Lago Uruguay

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el Lago Kitiash, el mercurio del Lago Uruguay es el elemento con la concentración máxima excepcionalmente alta (343.99 mg/kg) en comparación con el resto de los metales y con el resto de las muestras, lo que sugiere la posible influencia de fuentes de mercurio significativas en la zona. La muestra que posee esta concentración es la 27-30 mm que corresponde a un periodo aproximado de 1972, siendo de más del triple de su concentración basal. No obstante, como estos años son aproximaciones, las razones de este aumento de la concentración de mercurio pueden ser: por el lado de las causas antrópicas, la construcción de las bases científicas, en especial la Base Artigas, y refugios en 1968 y el turismo activo en la zona, que puede ser un factor que propició el aumento de la concentración de este metal. Por el lado de las causantes naturales se encuentra la dispersión y deposición atmosférica, movimientos volcánicos ocurridos en periodos cercano como la erupción del volcán de la Isla Decepción en 1967, 1969 y 1970, y la erosión de las rocas, siendo esta última una de las principales causas debido al uso de calefacción, cocinas, incineración de residuos, entre otros.

Cabe resaltar que este metal es conocido por su toxicidad, y su presencia en concentraciones tan elevadas es motivo de preocupación, ya que puede tener efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.

En cuanto al plomo, las concentraciones en las muestras superficiales del sedimento (0-3 mm y 6-9 mm) son relativamente altas y podrían indicar la influencia de fuentes de contaminación pasadas o presentes en el rango de años de 2018 a 2011. La muestra que posee la concentración más alta de Pb (97.827 mg/kg) es notable y supera significativamente las demás muestras, siendo casi cinco veces más altas que su concentración basal.

Durante el período de años en el que se registran las muestras con niveles más elevados de plomo (Pb) en el sedimento, se tiene documentación de actividad volcánica en ciertas islas cercanas. Por lo que existe la posibilidad de que las cenizas y partículas liberadas por estos eventos volcánicos hayan alcanzado al

lago Uruguay y se hayan depositado en su sedimento, contribuyendo así a las concentraciones de plomo observadas en las muestras. Sin embargo, la principal fuente de perturbación del ambiente proviene de la actividad antrópica generada por las bases científicas presentes en la zona, en particular, la Base Artigas que se encuentra más próxima al lago y la que depende de él para abastecerse de agua potable. Las prácticas que involucran el uso de baterías y pilas, pinturas, las emisiones de vehículos y la combustión de compuestos derivados del petróleo que contienen tetraetilo de plomo (Pb), contribuyen significativamente al aumento de los niveles de plomo en los sedimentos del lago. Asimismo, la dispersión atmosférica por parte de pesticidas y fertilizantes de zonas distantes de la Antártica, producen una alteración en las concentraciones de este metal.

El cobre, es otro metal que muestra concentraciones elevadas superando su concentración basal, aunque no alcanza a ser el doble de esta, igual son niveles altos para tener en cuenta. El Cu exhibe un rango amplio de concentraciones, donde la muestra (75-78 mm) con la concentración más alta de cobre (98.625 mg/kg) destaca por su valor atípico y podría estar relacionada con actividades industriales, ya que el cobre es un metal comúnmente utilizado en aplicaciones industriales y tecnológicas. Partículas de actividades industriales y tecnológicas, industrias mineras, metalúrgicas y de acero, fertilizantes y plaguicidas transportadas mediante dispersión atmosférica pueden contribuir en el aumento de los niveles de cobre.

Tanto el arsénico como el cadmio tienen rangos de concentración más bajos, con concentraciones máximas que son significativamente menores que las de otros metales. Sin embargo, ambos poseen muestras que superan su concentración basal; en el caso del As, las muestras superficiales 0-3 mm y 6-9 mm, y la muestra profunda 75-78 mm superan significativamente a las demás, siendo aproximadamente el doble de su concentración basal. Aunque las concentraciones son menores que las del arsénico, la muestra con el valor más alto de Cd (6.771 mg/kg) es notable, siendo más del triple de su concentración basal.

Estas concentraciones podrían originarse tanto por fuentes naturales como por actividades humanas de menor intensidad en comparación con otros elementos, pero, a pesar de su menor presencia, siguen teniendo un impacto significativo en la composición de los sedimentos.

Los metales cromo, níquel y zinc muestran un comportamiento moderado, sin superar en gran medida la concentración basal respectiva

Las concentraciones de cromo son relativamente altas y podrían sugerir la influencia de actividades industriales o de procesos geológicos naturales en la región. No obstante, como los mayores niveles de Cr se presentan en las muestras profundas del sedimento, se puede inferir que se deben a procesos naturales en particular, ya que las concentraciones de cromo en general son bastante consistentes en comparación con otros metales pesados.

Aunque el rango en las concentraciones de zinc es menor en comparación con algunos otros metales, estas son significativas y podrían estar relacionadas con actividades industriales o liberación natural de zinc en el entorno. Las concentraciones de zinc son relativamente homogéneas.

En general, las concentraciones de metales pesados en el Lago Uruguay muestran variaciones significativas y altas concentraciones de algunos metales. La identificación de valores atípicos en ciertas muestras, especialmente en el caso del mercurio, plomo y cobre, sugieren la posible influencia de fuentes de contaminación. Estos resultados son importantes para la evaluación y el monitoreo de la calidad ambiental en la región y pueden indicar la necesidad de medidas de mitigación y control de la contaminación.

Tabla 26. Índice de Geoacumulación Lago Uruguay

LAGO URUGUAY																
Igeo									INTERPRETACIÓN							
Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Igeo As	Igeo Cd	Igeo Cr	Igeo Cu	Igeo Ni	Igeo Pb	Igeo Zn	Igeo Hg
U0-3 mm	0,27	0,34	-1,20	-0,91	-2,01	0,71	-0,68	-0,99	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado
U6-9 mm	0,29	0,03	-0,74	-0,92	-1,56	1,45	-0,63	-3,03	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	Moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado
U12-15 mm	-2,13	-0,29	-1,23	-0,94	-1,52	-0,04	-0,68	0,29	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
U15-18 mm	-2,09	-0,43	-1,43	-1,36	-1,44	-0,33	-1,10	-0,61	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
U18-21 mm	-1,75	-0,57	-1,39	-1,50	-1,48	-0,26	-1,21	-0,70	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
U21-24 mm	-2,21	-0,82	-1,42	-2,16	-1,25	-0,99	-1,61	-1,10	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
U24-27 mm	-0,81	-0,15	-1,20	-1,82	-1,44	0,38	-1,39	-1,03	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado
U27-30 mm	-0,91	1,30	-0,76	-0,10	-0,86	0,58	-0,34	1,43	No contaminado	Moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	Moderadamente contaminado

U42-45 mm	-1,16	-0,30	-0,95	-1,29	-0,97	0,27	-1,05	0,32	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
U45-48 mm	-1,98	-0,81	-1,16	-2,03	-1,03	-0,47	-1,50	0,19	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado
U51-54 mm	-2,41	-0,55	-1,36	-0,37	-1,53	-0,81	-0,43	-0,48	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
U75-78 mm	0,26	-0,49	-1,00	0,05	-1,12	-0,24	-0,37	-0,07	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
U87-90 mm	-0,91	-0,24	-0,45	-0,47	-0,45	0,00	-0,40	-0,63	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
U90-93 mm	-1,09	-0,84	-0,53	-1,01	-0,44	-1,34	-0,77	-0,60	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado
U93-96 mm	-1,10	-0,86	-0,42	-1,28	-0,44	-1,24	-0,87	-1,28	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado	No contaminado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Factor de Enriquecimiento Lago Uruguay

LAGO URUGUAY																
FE									INTERPRETACIÓN							
Muestra	FE As	FE Cd	FE Cr	FE Cu	FE Ni	FE Pb	FE Zn	FE Hg	FE As	FE Cd	FE Cr	FE Cu	FE Ni	FE Pb	FE Zn	FE Hg
U0-3 mm	1,93	2,02	0,70	0,85	0,40	2,61	1,00	0,80	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)
U6-9 mm	1,90	1,58	0,93	0,82	0,53	4,25	1,00	0,19	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)				
U12-15 mm	0,37	1,31	0,68	0,84	0,56	1,56	1,00	1,97	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
U15-18 mm	0,50	1,60	0,80	0,84	0,79	1,71	1,00	1,41	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
U18-21 mm	0,69	1,56	0,88	0,82	0,83	1,93	1,00	1,42	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
U21-24 mm	0,66	1,73	1,14	0,68	1,28	1,54	1,00	1,42	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
U24-27 mm	1,50	2,37	1,15	0,74	0,97	3,42	1,00	1,29	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento deficiente (mínimo)
U27-30 mm	0,67	3,10	0,75	1,18	0,70	1,89	1,00	3,41	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado				

U42-45 mm	0,93	1,68	1,07	0,84	1,06	2,50	1,00	2,58	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado				
U45-48 mm	0,71	1,61	1,26	0,69	1,38	2,03	1,00	3,22	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado	Enriquecimiento deficiente (mínimo)	Enriquecimiento moderado				
U51-54 mm	0,25	0,92	0,52	1,04	0,47	0,77	1,00	0,97	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
U75-78 mm	1,54	0,92	0,64	1,34	0,59	1,09	1,00	1,22	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
U87-90 mm	0,70	1,12	0,97	0,95	0,97	1,32	1,00	0,85	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
U90-93 mm	0,80	0,95	1,18	0,84	1,26	0,67	1,00	1,12	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							
U93-96 mm	0,85	1,01	1,36	0,76	1,34	0,77	1,00	0,75	Enriquecimiento deficiente (mínimo)							

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Índice de carga contaminante Lago Uruguay

LAGO URUGUAY		
Muestra	PLI	Interpretación
U0-3 mm	1,32790859	Existencia de contaminación (contaminado)
U6-9 mm	1,34680363	Existencia de contaminación (contaminado)
U12-15 mm	1,29153316	Existencia de contaminación (contaminado)
U15-18 mm	1,25199224	Existencia de contaminación (contaminado)
U18-21 mm	1,24893211	Existencia de contaminación (contaminado)
U21-24 mm	1,21173542	Existencia de contaminación (contaminado)
U24-27 mm	1,27750128	Existencia de contaminación (contaminado)
U27-30 mm	1,40377805	Existencia de contaminación (contaminado)
U42-45 mm	1,30588986	Existencia de contaminación (contaminado)
U45-48 mm	1,25961726	Existencia de contaminación (contaminado)
U51-54 mm	1,26633797	Existencia de contaminación (contaminado)
U75-78 mm	1,32881806	Existencia de contaminación (contaminado)
U87-90 mm	1,31500389	Existencia de contaminación (contaminado)
U90-93 mm	1,27295217	Existencia de contaminación (contaminado)
U93-96 mm	1,26221491	Existencia de contaminación (contaminado)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los índices Igeo, FE y PLI se presentan en las Tablas 26, 27 y 28 respectivamente. En las que la tabla 26 muestra los resultados del índice Igeo, donde se evidencio que todos los elementos analizados superan en alguna muestra el valor de 0, con excepción del Cr, Ni y Zn, por lo que el índice muestra que existe contaminación de los metales As, Cd, Cu, Pb y Hg.

Los elementos que muestran valores más altos de Igeo son el Cd (1,297447522; $1 \leq \text{Igeo} \leq 2$; moderadamente contaminado), Pb (1,45473301; $1 \leq \text{Igeo} \leq 2$; moderadamente contaminado) y Hg (1,43387357; $1 \leq \text{Igeo} \leq 2$; Moderadamente contaminado). El resultado con mayor valor de Igeo para el cadmio y mercurio pertenece a la muestra 27-30 mm, lo que corresponde a 1972 aproximadamente. Y para el plomo, la muestra con mayor valor de Igeo es la 6-9 mm, correspondiente al año 2011.

En los años aproximados correspondientes a las muestras y años cercanos se registró actividad volcánica que pudo haber influido en el aumento de las concentraciones de estos elementos. En 1970 se registró una erupción en el volcán de la Isla Decepción (Universitat Autònoma de Barcelona, s/f). En el año 2010, se detectaron dos eventos sísmicos en una región de la Antártida Occidental. Y en el año 2011 se registró una erupción del volcán Erebus en la Isla Ross, liberando cenizas, gases y vapores (Lavin & Antonio, 2016), los cuales podrían haber llegado por disposición atmosférica a la zona del lago Uruguay.

El enriquecimiento de los niveles de cadmio, plomo y mercurio, como se menciona anteriormente, puede ser debido al uso de pinturas, a la combustión de basuras o de combustibles al aire libre a nivel local, a la deposición y dispersión atmosférica de contaminantes, a los derrames de petróleo, la actividad volcánica, etc.

Ninguna de los metales Cr, Ni y Zn en las muestras superan el valor de 0, por lo tanto, el índice señala que no existe contaminación en las muestras por estos metales y por consiguiente implica que no son un riesgo para la salud del hábitat y de las personas.

Los elementos analizados restantes (As y Cu) y algunas muestras de Cd, Pb y Hg, presentan valores de Igeo no superiores o levemente superiores a 0, con clasificación No contaminado ($I_{geo} \leq 0$) y No contaminado a moderadamente contaminado ($0 \leq I_{geo} \leq 1$). El enriquecimiento de estos metales puede deberse a abonos de origen animal (Smith, 1996), a la combustión de compuestos derivados del petróleo, residuos, aguas residuales, pilas, baterías y pinturas (Del Aguila Juárez, 2005). De los resultados del índice se infiere que la presencia de los metales (As, Cd, Cu, Pb y Hg) no implica un peligro, sin embargo, se debe monitoreando por posibles alzas.

Con respecto a los resultados del factor de enriquecimiento (FE) de los elementos analizados para cada muestra del Lago Uruguay, ninguno de los metales mostró un valor superior de 10 (tabla 27); lo que señala que se trata de metales con un enriquecimiento mínimo y un enriquecimiento moderado y que su presencia en el suelo se debe a la roca madre (Lawson y Winchester, 1979).

El Cd, Pb y Hg presentan valores altos de FE con clasificación de enriquecimiento moderado ($2 \leq I_{geo} \leq 5$). Estos resultados altos coinciden con los valores altos obtenidos por el índice Igeo en las mismas muestras, por lo tanto, indica que se encuentra contaminado y enriquecido moderadamente, con valores que pueden suponer un riesgo o peligro para la zona y los habitantes de ella que utilizan sus recursos.

El índice de carga contaminante (PLI) se muestra en la tabla 28, con la contaminación total de la muestra, incluyendo todos los elementos analizados en la muestra. Los resultados del PLI para el Lago Uruguay presentan la existencia de contaminación para todas las muestras analizadas.

La muestra que señala el mayor valor de PLI ($PLI = 1,40377805$) es la 27-30 mm (2,7-3,0 cm). De esto se denota que por conjunto de metales analizados esta muestra es la de mayor contaminación.

NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL DE SEDIMENTOS

- Estados Unidos

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Burton, 2002) / Valores ERL y ERM de SQG (Long et al., 1995)

- Chile

Proyecto de ley sobre normas de calidad de sedimentos marinos y lacustres en el cual se proponen concentraciones de metales correspondientes a ERL y ERM (UPLA, 2002).

Tabla 29. Comparación de concentraciones del Lago Hotel con dos normativas con valores ERL y ERM

Metal	Estados Unidos		Chile		Concentraciones obtenidas Lago Hotel		
	ERL (mg/kg)	ERM (mg/kg)	ERL (mg/kg)	ERM (mg/kg)	Media (mg/kg)	Mínima (mg/kg)	Máxima (mg/kg)
Arsénico	8,2	70	-	-	25,50	1,64	138,97
Cadmio	1,2	9,6	1	6	2,06	0,477	17,822
Cromo	81	370	-	-	12,17	6,9	29,7
Cobre	34	270	22,7	200	67,69	22,2	175,7
Níquel	20,9	51,6	22,7	218	6,4	2,8	20,4
Plomo	46,7	218	31,8	200	151,98	56,34	406,59
Zinc	150	410	70,7	350	59,61	26,5	138,6
Mercurio	0,15	0,71	-	-	297,64	60,914	1123,75

Fuente: Elaboración propia con datos propios y datos extraídos de Long et al. (1995) y UPLA (2002).

Tabla 30. Comparación de concentraciones del Lago Xihu con dos normativas con valores ERL y ERM

Metal	Estados Unidos		Chile		Concentraciones obtenidas Lago Xihu		
	ERL (mg/kg)	ERM (mg/kg)	ERL (mg/kg)	ERM (mg/kg)	Media (mg/kg)	Mínima (mg/kg)	Máxima (mg/kg)
Arsénico	8,2	70	-	-	25,16	13,06	55,98
Cadmio	1,2	9,6	1	6	1,44	1,206	2,024
Cromo	81	370	-	-	11,75	10,1	14,2
Cobre	34	270	22,7	200	102,87	86,2	120,6
Níquel	20,9	51,6	22,7	218	7,0	6,2	8,8
Plomo	46,7	218	31,8	200	252,01	148,79	391,77
Zinc	150	410	70,7	350	56,44	50,9	72,5
Mercurio	0,15	0,71	-	-	159,78	73,182	285,984

Fuente: Elaboración propia con datos propios y datos extraídos de Long et al. (1995) y UPLA (2002).

Tabla 31. Comparación de concentraciones del Lago Kitiesh con dos normativas con valores ERL y ERM

Metal	Estados Unidos		Chile		Concentraciones obtenidas Lago Kitiesh		
	ERL (mg/kg)	ERM (mg/kg)	ERL (mg/kg)	ERM (mg/kg)	Media (mg/kg)	Mínima (mg/kg)	Máxima (mg/kg)
Arsénico	8,2	70	-	-	3,17	0,6757	7,2435
Cadmio	1,2	9,6	1	6	1,89	1,099	2,838
Cromo	81	370	-	-	13,53	10,469	17,411
Cobre	34	270	22,7	200	56,07	34,209	83,55
Níquel	20,9	51,6	22,7	218	9,20	6,808	14,76
Plomo	46,7	218	31,8	200	31,31	17,745	43,843
Zinc	150	410	70,7	350	39,81	28,889	56,613
Mercurio	0,15	0,71	-	-	92,39	24,73	359,678

Fuente: Elaboración propia con datos propios y datos extraídos de Long et al. (1995) y UPLA (2002).

Tabla 32. Comparación de concentraciones del Lago Uruguay con dos normativas con valores ERL y ERM

Metal	Estados Unidos		Chile		Concentraciones obtenidas Lago Uruguay		
	ERL (mg/kg)	ERM (mg/kg)	ERL (mg/kg)	ERM (mg/kg)	Media (mg/kg)	Mínima (mg/kg)	Máxima (mg/kg)
Arsénico	8,2	70	-	-	9,17	3,1993	20,8689
Cadmio	1,2	9,6	1	6	2,42	1,517	6,771
Cromo	81	370	-	-	12,34	8,987	18,079
Cobre	34	270	22,7	200	49,79	21,269	98,625
Níquel	20,9	51,6	22,7	218	6,504	3,442	10,283
Plomo	46,7	218	31,8	200	36,75	14,107	97,827
Zinc	150	410	70,7	350	55,087	31,672	76,695
Mercurio	0,15	0,71	-	-	106,54	15,556	343,99

Fuente: Elaboración propia con datos propios y datos extraídos de Long et al. (1995) y UPLA (2002).

Los valores de referencia de las SQG, las normas de calidad de sedimentos marinos y lacustres, y las concentraciones medidas en este estudio de los lagos Hotel, Xihu, Kitish y Uruguay se indican en la Tabla 29, 30, 31 y 32 respectivamente. La tabla 29 presenta los rangos de ERL (Efecto de Rango Bajo) y ERM (Efecto de Rango Medio) definidos por la SQG (Long et al., 1995) y por la normativa preliminar chilena (UPLA, 2002).

En el caso de las muestras de los cuatro lagos estudiados, los metales Cr, Cu, Ni y Zn no sobrepasaron el valor de ERM definido en ambas normativas utilizadas, lo que sugiere que las concentraciones registradas no generan efectos adversos frecuentes. El Hg es el único metal que coincide en todos los lagos superando el valor de ERM definido para la normativa SQG. Valores superiores a los niveles ERM de una o ambas normativas pueden indicar efectos adversos evidentes.

Respecto del valor de ERL, las concentraciones medias de Cd y Cu sobrepasaron el valor de ERL en los cuatro lagos, y en ambas normativas utilizadas, lo que indica que podrían existir efectos adversos ocasionales.

En particular, en el Lago Hotel, los metales As, Cd, Pb, Hg (SQG) sobrepasaron el valor de ERM definido para la normativa SQG, mientras que respecto a la normativa nacional el Cd y Pb sobrepasaron el valor del ERM. En relación con el valor de ERL de la normativa SQR de Estados Unidos, los metales As, Cd, Cu, Pb, Hg superaron los niveles establecidos, en tanto, de acuerdo con el proyecto de ley de la normativa nacional (UPLA, 2002) el As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg sobrepasaron los niveles de ERL definidos.

En el caso del Lago Xihu, los metales Pb, Hg sobrepasaron los niveles de ERM establecido por la normativa SQG, asimismo el Pb superó los niveles de ERM de la normativa propuesta nacional (UPLA,2002), mostrando posibles efectos adversos evidentes. De acuerdo con los valores de ERM de ambas normativas, las concentraciones medias del Cd, Cu y Pb sobrepasaron estos niveles en el Lago Xihu, lo que podría indicar posibles efectos adversos ocasionales. Adicionalmente, el As y el Hg también superaron los niveles de ERL en la normativa SQG.

Respecto al Lago Kitiesh, solamente el Hg presenta valores superiores al nivel de ERM de la normativa SQG (Long et al., 1995), lo que podría presentar efectos adversos evidentes. En relación con los niveles de ERM, los metales Cd y Cu sobrepasaron los niveles de ERL de ambas normativas, indicando que podrían existir efectos adversos ocasionales. Las concentraciones medias del Hg también son superiores al valor de ERL de la normativa SQG.

Referente al Lago Uruguay, el Hg obtuvo valores superiores al nivel de ERM definido por la normativa SQG, mientras que de acuerdo con la normativa nacional propuesta (UPLA, 2002), el Cd está levemente sobre los valores de ERM establecidos. Sobre los niveles de ERL, el As, Cd, Cu y Hg tienen valores superiores a los establecidos por la normativa SQG, en tanto, el Cd, Cu y Pb

sobrepasan los valores definidos en la normativa nacional (UPLA), indicando posibles efectos adversos ocasionales.

5. APORTE A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

El presente informe sobre la Presencia de Metales Pesados en la Península Antártica por Acción Antrópica se vincula a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en:

El ODS 3 de Salud y Bienestar, sobre el objetivo 3 de Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades, específicamente la meta 3.9 sobre reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo, debido a que se busca la reducción de la contaminación por actividad antrópica del suelo y de las aguas con el fin de evitar posibles enfermedades.

También el ODS 6 de Agua y Saneamiento, sobre el objetivo 6 de Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos, específicamente la meta 6.3 que habla de mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial. Adicionalmente la meta 6.6 sobre proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos. Esto debido a que se busca tener la mejor calidad de agua y por consiguiente de sus sedimentos con la finalidad de eliminar o disminuir la contaminación de estos.

6. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de esta investigación, se llevó a cabo un análisis de laboratorio mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP) y una revisión bibliográfica exhaustiva. Con esto se obtuvieron y analizaron las concentraciones de los metales pesados As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Hg de las muestras de sedimento procedentes de los lagos Hotel, Xihu, Kitiesh y Uruguay.

- I. De todos los metales analizados, el cobre, el plomo y el mercurio destacan por presentar las concentraciones más elevadas en todos los lagos, y en general, sus niveles tienden a aumentar en las muestras superficiales. En el caso del lago Kitiesh, también se observan concentraciones elevadas de zinc.

En los lagos Hotel, Kitiesh y Uruguay, el elemento que mostró las más altas concentraciones es el Hg. Y el lago que se encuentra con mayores concentraciones de los metales es el Lago Hotel, mostrando una acumulación de metales que ha sido persistente a lo largo de los años y ha llevado a que el lago no sea apto como fuente de agua potable.

- II. Sobre los índices de contaminación aplicados se obtuvo que, de acuerdo con el PLI, existe presencia de contaminación por parte de todos los lagos estudiados, con mayores valores para el Lago Hotel, siendo el que presenta mayores concentraciones de los metales analizados en comparación con los demás lagos. Respecto al FE sólo el arsénico y el cadmio del Lago Hotel obtuvieron enriquecimiento en el suelo por fuentes antropogénicas. El resto de los metales de los lagos restantes mostraron un enriquecimiento con origen en la roca madre.
- III. El hallazgo de las concentraciones basales fue fundamental para tener una referencia inicial sobre la presencia natural de estos metales en los lagos antes de considerar la influencia de fuentes de contaminación que pudieron alterar sus niveles, permitiendo identificar la existencia de variaciones significativas en la presencia de estos metales.

- IV. El Lago Hotel, presenta diferencias significativas en las concentraciones de los metales As, Cr, Cu y Zn en comparación con las concentraciones basales. En el Lago Xihu, se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de Pb y Hg con respecto con sus concentraciones basales. Para el Lago Kitiesh, se detectaron diferencias significativas en las concentraciones de Cd, Cu y Hg en contraste con las concentraciones basales de estos metales. Y, por último, en el Lago Uruguay, se encontró que los metales Cr y Ni muestran diferencias significativas en sus concentraciones en comparación con sus concentraciones basales.
- Estas diferencias sugieren que ha existido un cambio en la cantidad de metales en los sedimentos de los lagos a lo largo del tiempo y pueden tener implicancias importantes para la calidad del agua y el ecosistema del lago.
- V. El análisis histórico permitió evaluar las causas de las concentraciones elevadas de metales en los lagos, lo que ayudó a determinar si las bases científicas en la Península Fildes, la actividad turística o factores naturales, como erupciones volcánicas, tuvieron un impacto significativo en los niveles de metales pesados analizados.

Se concluye que existen elevadas concentraciones de plomo, mercurio y cobre en las muestras más superficiales, las cuales coinciden con el periodo de la llegada de las bases científicas y el comienzo de la actividad antrópica. Por lo cual se infiere que existe una relación entre las concentraciones de los metales pesados analizados con la influencia de las bases antárticas. Sin embargo, mediante los índices de contaminación se devela que los elevados niveles de metales pesados son de origen de la roca madre, con excepción del arsénico y cadmio del Lago Hotel, que presentan un origen antrópico.

Por lo que, si bien no se puede afirmar con certeza que los aumentos de las concentraciones de los metales analizados sean completamente por acción antrópica, es importante destacar que se observa un aumento de los niveles de los metales, en general, en las muestras más superficiales de la columna de

sedimento. En especial, de los elementos Pb, Hg, Cu y Cd, desde el comienzo de la actividad antrópica y la instalación de las bases científicas. Esto sugiere perturbaciones recientes en el último periodo de años en estos entornos, atribuible en gran parte a la actividad humana, y las actividades relacionadas como eliminación de aguas residuales, desechos, utilización de pilas y baterías, generadores, uso de combustibles fósiles, entre otros. Sin embargo, no se descarta la influencia de factores naturales, como la actividad volcánica, la lixiviación del suelo y la erosión de rocas y suelos, pero en menor medida.

Estos resultados subrayan la complejidad de los cambios ambientales y cómo las intervenciones humanas pueden influir significativamente en la composición y características de los sedimentos en cuerpos de agua. Es crucial mantener un monitoreo continuo de los niveles de metales en los lagos, especialmente en aquellos utilizados como fuentes de agua potable, para comprender y gestionar mejor los recursos hídricos y los impactos de las actividades humanas en los ecosistemas naturales. La gestión adecuada de residuos, la implementación de prácticas de construcción sostenible y la adopción de tecnologías más limpias en el transporte son algunas de las medidas clave para reducir la contaminación por metales pesados relacionada con el turismo en la Antártica.

Es importante mencionar que en Chile no existe una normativa que regule la concentración de metales pesados en los sedimentos acuáticos, lo que es preocupante. Hay un Proyecto de Normas de Calidad de Sedimentos Acuáticos para Chile realizado por la Universidad de Playa Ancha (2002), que no tiene vigencia legal, no obstante, es el único documento que revisa y propone de manera preliminar concentraciones límites.

Es esencial tomar medidas efectivas de conservación y protección de estos ecosistemas, así como garantizar la seguridad de las personas que dependen de ellos. Además de preservar la integridad de este ecosistema único y protegerlo de los impactos negativos de la actividad humana.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alam, I. and Sadiq, M. 1993. Metal concentrations in Antarctic sediment samples collected during the Trans-Antarctica 1990 expedition. *Marine Pollution Bulletin* 26(9), 523-527.
- Ali, H. and Khan, E. 2018. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term "heavy metals"-proposal of a comprehensive definition. *Toxicological and Environmental Chemistry* 100(1), 6-19.
- Amaro, E., Padeiro, A., de Ferro, A.M., Mota, A.M., Leppe, M., Verkulich, S., Hughes, K.A., Peter, H.-U. and Canário, J. 2015. Assessing trace element contamination in Fildes peninsula (king George Island) and Ardley Island, Antarctic. *Marine Pollution Bulletin* 97(1-2), 523-527.
- Ancora, S., Volpi, V., Olmastroni, S., Focardi, S. and Leonzio, C. 2002. Assumption and elimination of trace elements in Adélie penguins from Antarctica: a preliminary study. *Marine Environmental Research* 54(3-5), 341-344.
- Antártida, el difícil continente aislado. (2014, May 21). IMEDIA. <https://imediapr.es/antartida-el-dificil-continente-aislado>
- ArcGIS Web Application. (s. f.). <https://antarctictreaty.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=0a2a8ea1a16340f5a06ccf598e6d42f7>
- ArcGIS Web Application. (s. f.-b.). <https://ucnz.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8663617ffa264e45aa3804d0d08fcdf8>
- Barakat, M. 2011. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian journal of chemistry* 4(4), 361-377.

- Barbieri, M. (2016). «The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index(Igeo) to Evaluate the Soil Contamination». *Geology & Geophysics*, 5(1), 1-4. doi:10.4172/2381- 8719.1000237.
- Barbosa, A., & Cuervo, J. (2021, 22 noviembre). Hallan altas concentraciones de mercurio en las plumas de los pingüinos de la Antártida | Museo Nacional de Ciencias Naturales. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. <https://www.mncn.csic.es/es/Comunicaci%C3%B3n/hallan-altas-concentraciones-de-mercurio-en-las-plumas-de-los-pinguinos-de-la#:~:text=Las%20regiones%20polares%20como%20la,inmunol%C3%B3gicas%20y%20fisiol%C3%B3gicas%2C%20entre%20otras.>
- Bargagli, R. 2008. Environmental contamination in Antarctic ecosystems. *Sci. Total Environ.* 400(1-3), 212-226.
- Bargagli, R., Monaci, F. and Agnorelli, C. 2003. Oak leaves as accumulators of airborne elements in an area with geochemical and geothermal anomalies. *Environ. Pollut.* 124(2), 321-329.
- Barker, P. and Thomas, E. 2004. Origin, signature and palaeoclimatic influence of the Antarctic Circumpolar Current. *Earth-Science Reviews* 66(1-2), 143-162.
- Barton CM (1965) The geology of the South Shetland Islands: III. The stratigraphy of King George Island. British Antarctic Survey
- Bengtsson, H., Alvenäs, G., Nilsson, S., Hultman, B. and Öborn, I. 2006. Cadmium, copper and zinc leaching and surface run-off losses at the Öjebyn farm in Northern Sweden—Temporal and spatial variation. *Agriculture, ecosystems & environment* 113(1-4), 120-138.
- Blais, J.M., Macdonald, R.W., Mackay, D., Webster, E., Harvey, C. and Smol, J.P. 2007. Biologically mediated transport of contaminants to aquatic systems. *Environmental Science & Technology* 41(4), 1075-1084.
- Boersma, P.D. 2008. Penguins as marine sentinels. *Bioscience* 58(7), 597-607.
- Braun C, Mustafa O, Nordt A, et al (2012) Environmental monitoring and management proposals for the Fildes Region, King George Island, Antarctica. *Polar Res* 31:18206. <https://doi.org/10.3402/polar.v31i0.18206>

- Burton GA Jr. 2002. Sediment quality criteria in use around the world. *Limnology* 3:65–75.
- Campbell, I., Claridge, G. and Balks, M. 1998. Short-and long-term impacts of human disturbances on snow-free surfaces in Antarctica. *Polar Record* 34(188), 15-24.
- Castillo, F. (2005) *Biotecnología ambiental*, Editorial Tebar.
- Catalá, M. (2017, June 16). Investigadores españoles describen el impacto humano en la Península Antártica a partir de la presencia de contaminantes emergentes. *Ecotoxsan*.
<https://ecotoxsan.wordpress.com/2017/06/16/investigadores-espanoles-describen-el-impacto-humano-en-la-peninsula-antartica-a-partir-de-la-presencia-de-contaminantes-emergentes/>
- Celis, J., Jara, S., Gonzalez-Acuna, D., Barra, R. and Espejo, W. 2012. A preliminary study of trace metals and porphyrins in excreta of Gentoo penguins (*Pygoscelis papua*) at two locations of the Antarctic Peninsula. *Arch. Med. Vet.* 44(3), 311-316.
- Cesca, S., Sukan, M., Rudzinski, Ł. et al. Massive earthquake swarm driven by magmatic intrusion at the Bransfield Strait, Antarctica. *Commun Earth Environ* 3, 89 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00418-5>
- Chong, C.W., Pearce, D.A., Convey, P., Tan, G.A., Wong, R.C. and Tan, I.K. 2010. High levels of spatial heterogeneity in the biodiversity of soil prokaryotes on Signy Island, Antarctica. *Soil Biology and Biochemistry* 42(4), 601-610.
- Chu, W.-L., Dang, N.-L., Kok, Y.-Y., Yap, K.-S.I., Phang, S.-M. and Convey, P. 2019. Heavy metal pollution in Antarctica and its potential impacts on algae. *Polar Science* 20, 75-83.
- Chwedorzewska, K.J. and Korczak, M. 2010. Human impact upon the environment in the vicinity of Arctowski Station, King George Island, Antarctica. *Polish Polar Research*, 45-60-45-60.
- COMNAP (2018) Antarctic facilities list

- Delille, D., Pelletier, E. and Coulon, F. 2007. The influence of temperature on bacterial assemblages during bioremediation of a diesel fuel contaminated subAntarctic soil. *Cold Regions Science and Technology* 48(2), 74-83.
- del Aguila Juárez, P., Lugo de la Fuente, J., & Vaca Paulín, R. (2005). Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 12(2), 155-161.
- del Valle, J. (2018, March 6). ¿Está contaminado el aire de la Antártida? *Heraldo de Aragón*. <https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2018/03/06/esta-contaminado-aire-antartida-1228431-310.html>
- Descubren un volcán activo bajo la Antártida. (2017, noviembre 9). *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/descubren-un-volcan-activo-bajo-la-antartida>
- Emol. (22 de Julio de 2023). Récord de turistas viaja a la Antártica, pero preocupa el impacto al medio ambiente. *Emol*. <https://www.emol.com/noticias/Tecnologia/2023/07/22/1101769/record-turistas-antartica-impacto-medioambiente.html>
- Erupciones volcánicas. (n.d.). *Paho.org*. Retrieved August 18, 2023, from <https://www.paho.org/es/temas/erupciones-volcanicas>
- Espinoza, R.T. (2011) Evaluación de la calidad del aire en la península Fildes Isla Rey Jorge Antártica biomonitorio de líquenes como herramienta de gestión, Master Thesis, Universidad de Chile Santiago de Chile, Chile [www.mgpa](http://www.mgpa....)
- Estación Científica Antártica Ruperto Elichiribehety. (s. f.). *Mapcarta*. <https://mapcarta.com/es/N5316768835>
- Fan, A. 1996. An introduction to monitoring and environmental and human risk assessment of metal. Magos L, Suzuki T. *Toxicology of Metals*, Lewis Publishers, Boca Raton, 5-9.
- Ferguson, S.H., Powell, S.M., Snape, I., Gibson, J.A. and Franzmann, P.D. 2008. Effect of temperature on the microbial ecology of a hydrocarbon-

- contaminated Antarctic soil: Implications for high temperature remediation. *Cold regions science and technology* 53(1), 115-129.
- Fergusson, J.E. (1990) *The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects* Jack E. Fergusson.
- Fernández, J. (2019, June 17). *Tribuna Complutense* :: UCM. Ucm.es. <https://www.ucm.es/tribunacomplutense/249/art3756.php>
- García, D. (2021, October 20). La química de los gases tóxicos que produce el volcán. *LaSexta*. https://www.lasexta.com/el-muro/deborah-garcia/quimica-gases-toxicos-que-produce-volcan_20211020616fd54f95a4560001b12631.html
- García, P. (2021, enero 27). *Ciencia: En la Antártida hay muchos volcanes ocultos. Aquí te contamos sobre ellos.* FayerWayer. <https://www.fayerwayer.com/2021/01/ciencia-antartida-volcanes-ocultos/>
- Harris, C.M. 1991. Environmental effects of human activities on King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Polar Record* 27(162), 193-204.
- Harte, J., Holdren, C., Schneider, R. and Shirley, C. (1991) *Toxics A to Z: A guide to everyday pollution hazards*, Univ of California Press.
- Hou, X. and Jones, B.T. 2000. Inductively coupled plasma/optical emission spectrometry. *Encyclopedia of analytical chemistry* 11, 9468-9485.
- Hughes, K.A., Bridge, P. and Clark, M.S. 2007. Tolerance of Antarctic soil fungi to hydrocarbons. *Sci. Total Environ.* 372(2-3), 539-548.
- IAATO. (2020, 25 agosto). *Information & Resources*. <https://iaato.org/information-resources/>
- International Association of Antarctica Tour Operators. (2019). *IAATO Antarctic visitor figures 2019-2020*. iaato.org. <https://iaato.org/wp-content/uploads/2020/07/IAATO-on-Antarctic-visitor-figures-2019-20-FINAL.pdf>
- Kodavanti, P., Royland, J. and Rao, K.S. 2014. *Toxicology of Persistent Organic Pollutants*.

- La Antártica no es un continente aislado - INACH. (n.d.). Inach.cl. Retrieved August 18, 2023, from <https://www.inach.cl/inach/?p=809>
- Lamberti, M. C. (s/f). Volcanes activos en Antártida: una expedición a las fumarolas perdidas – parte 1/2 – Idean. Idean.gl. Recuperado el 16 de agosto de 2023, de <http://www.idean.gl/2022/06/10/volcanes-activos-en-antartida-una-expedicion-a-las-fumarolas-perdidas-parte-1-2/>
- Lavin, L., & Antonio, F. (2016). Monte Erebus. <http://antarticarepositorio.umag.cl/handle/20.500.11894/1021?locale-attribute=en>
- Lawson, D. R. y J. W. Winchester (1979). “A Standar Crustal Aerosol as a Reference for Elemental Enrichment Factors”, *Atmospheric Environment*. 10: 925-930.
- LIGGETT D., MCINTOSH A., THOMPSON A., GILBERT N., STOREY B. 2010. From frozen continent to tourism hotspot? Five decades of Antarctic tourism development and management, and a glimpse into the future. *Tourism Management* 30: 1-10.
- Liggett, D., McIntosh, A., Thompson, A., Gilbert, N. and Storey, B. 2011. From frozen continent to tourism hotspot? Five decades of Antarctic tourism development and management, and a glimpse into the future. *Tourism Management* 32(2), 357-366.
- Long, E., D. Macdonald, S. Smith & F. Calder. 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environ. Manage.*, 19: 81-97.
- Lu, Z., Cai, M., Wang, J., Yang, H. and He, J. 2012. Baseline values for metals in soils on Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica: the extent of anthropogenic pollution. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(11), 7013-7021.
- Mead N. (2011). Confusión por el cadmio: ¿Los consumidores necesitan protección? *Salud Pública México* 53 (2), 178-186. DOI: 10.1590/S0036-36342011000200011

- MedlinePlus. 2020. Prueba de sangre de metales pesados. U.S. National Library of Medicine. <https://medlineplus.gov/spanish/pruebas-de-laboratorio/prueba-de-sangre-de-metales-pesados/>. Acceso 30 de octubre de 2021.
- Mero, M., Pernía, B., Ramírez-Prado, N., Bravo, K., Ramírez, L., Larreta, E., & Egas, F. (2019). Concentración de Cadmio en agua, sedimentos, *Eichhornia crassipes* y *Pomacea canaliculata* en el Río Guayas (Ecuador) y sus afluentes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(3), 623-640.
- Miller, J., Hudson-Edwards, K., Lechler, P., Preston, D. and Macklin, M. 2004. Heavy metal contamination of water, soil and produce within riverine communities of the Rio Pilcomayo basin, Bolivia. *Sci. Total Environ.* 320(2-3), 189-209.
- Motas, M., Jerez, S., Esteban, M., Valera, F., Cuervo, J. J., & Barbosa, A. (2021). Mercury Levels in Feathers of Penguins from the Antarctic Peninsula Area: Geographical and Inter-Specific Differences. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9918. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph18189918>
- Muñoz, M. Á. (2016, 17 junio). Los contaminantes emergentes acechan a la Antártida. *La Verdad*. <https://www.laverdad.es/nuestra-tierra/medio-ambiente/201312/03/los-contaminantes-emergentes-acechan-a-la-antartida.html>
- Muyulema-Allaica, J. C., Canga-Castillo, S. M., Pucha-Medina, P. M., & Espinosa-Ruiz, C. G. (2019). Evaluation of contamination by heavy metals in soils of the Cayapas Mataje Mangrove Reserve (REMACAM)-Ecuador. *RIIT. Revista internacional de investigación e innovación tecnológica*, 7(41), 40-61.
- Nathaly, J., Andrea, G., Préndez, D. M. M., Bolívar, Duk, P. R., & Allamand, F. H. (n.d.). UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ORGÁNICA Y FÍSICOQUÍMICA LABORATORIO DE QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA

EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA ANTÁRTICA POR MATERIAL PARTICULADO: BIOMONITOREO DE LÍQUENES. Memoria para optar al Título Profesional de Químico. Uchile.Cl. Retrieved August 22, 2023, from <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/175115/Evolucion-de-la-contaminacion-atmosferica-antartica-por-material-particulado.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

- Newman MC, Unger MA (2003) Bioaccumulation from food and trophic transfer. In *Fundamentals of Ecotoxicology*, 2nd edn, Lewis Publishers, Boca Raton, FL., pp. 95-110.
- Olech, M. 1991. Preliminary observations on the content of heavy metals in thalli of *Usnea antarctica* Du Rietz (Lichenes) in the vicinity of the " H. Arctowski" Polish Antarctic Station. *Polish Polar Research*, 129—131-129—131.
- Ouyang, T., Zhu, Z., Kuang, Y., Huang, N., Tan, J., Guo, G., Gu, L. and Sun, B. 2006. Dissolved trace elements in river water: spatial distribution and the influencing factor, a study for the Pearl River Delta Economic Zone, China. *Environmental geology* 49(5), 733-742.
- Peter, H.-U., Braun, C. and Janowski, S. 2013/03: The current environmental situation and proposals for the management of the Fildes Peninsula Region. *Texte*.
- Pedrazzi, D., Aguirre-Díaz, G., Bartolini, S., Martí, J., & Geyer, A. (2014). The 1970 eruption on Deception Island (Antarctica): eruptive dynamics and implications for volcanic hazards. *Journal of the Geological Society*, 171(6), 765–778. <https://doi.org/10.1144/jgs2014-015>
- Phillips, D.J. 1980. Quantitative aquatic biological indicators: their use to monitor trace metal and organochlorine pollution.
- Piacente, P. J. (2022, April 29). Un volcán dormido abrió los ojos y generó un enjambre de terremotos en la Antártida. *Levante-EMV*. <https://www.levante-emv.com/tendencias21/2022/04/29/volcan-dormido-abrio-ojos-genero-65543657.html>

- Portal, A. E. (2019, April 15). Fuentes, dispersión e impactos de aguas residuales en la Antártida. Antarctic Environments Portal. <https://environments.aq/publications/fuentes-dispersion-e-impactos-de-aguas-residuales-en-la-antartida/?lang=es>
- Préndez, M., Muñoz, V., Villanueva, V., Montero, J.C. and Godoy, J. 1996. Estudio químico de las aguas continentales de península Fildes, isla Rey Jorge, Antártica.
- Problemas pulmonares y esmog volcánico. (n.d.). Medlineplus.gov. Retrieved August 18, 2023, from <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/007468.htm>
- Quesada, A., Vincent, W., Kaup, E., Hobbie, J., Laurion, I., Pienitz, R., López-Martínez, J. and Durán, J.-J. 2006. Landscape control of high latitude lakes in a changing climate. Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems, 221-252.
- Quevedo, J., & Meneses, L. (2014). Determinación de factores de enriquecimiento e índices de geoacumulación de plomo, cadmio y níquel en suelos agrícolas del sector San Alfonso en Machachi. infoANALÍTICA, 2(1), 41-55.
- Riffenburgh, B. 1998. Impacts on the Antarctic environment: tourism vs government programmes. Polar Record 34(190), 193-196.
- Romero, S. (2017, agosto 16). Hallan la región volcánica más grande del mundo en la Antártida. Muy Interesante. <https://www.muyinteresante.es/naturaleza/22445.html>
- Scouller, R., Stark, J., Snape, I., Riddle, M. and Gore, D. 2000 Contaminants in the Antarctic environment V. Accumulation in marine sediments, pp. 136-139.
- Secretaría del Tratado Antártico. (s. f.). https://www.ats.aq/index_s.html
- SINCA. (n.d.). Glosario de términos - Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. Gob.Cl. Retrieved August 24, 2023, from <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/glosario>

- Sismos en Antártica: seguidilla de movimientos se perciben desde el fin de semana pasado - INACH. (s/f). Inach.cl. Recuperado el 16 de agosto de 2023, de <https://www.inach.cl/inach/?p=28936>
- Smith S.R. (1996) Agricultural recycling of sewage sludge and the environment. CABT, Reino Unido.
- Smol JP. 2008. Pollution of lakes and rivers: A paleoenvironmental perspective, 2nd Edition. Oxford: Blackwell.
- Sobre La Antártida. (s/f). Gob.ar. Recuperado el 17 de agosto de 2023, de <https://cancilleria.gob.ar/es/iniciativas/dna/divulgacion/sobre-la-antartida>
- Stark, J.S., Riddle, M.J., Snape, I. and Scouller, R.C. 2003. Human impacts in Antarctic marine soft-sediment assemblages: correlations between multivariate biological patterns and environmental variables at Casey Station. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56(3-4), 717-734.
- Tahri, M., Benyaich, F., Bounakhla, M., Bilal, E., Gruffat, J.-J., Moutte, J. and Garcia, D. 2005. Multivariate analysis of heavy metal contents in soils, sediments and water in the region of Meknes (central Morocco). *Environmental monitoring and assessment* 102(1), 405-417.
- Tessier, A. and Campbell, P. (1990) Metal speciation in the environment, pp. 545-569, Springer.
- Tin, T., Fleming, Z.L., Hughes, K.A., Ainley, D., Convey, P., Moreno, C., Pfeiffer, S., Scott, J. and Snape, I. 2009. Impacts of local human activities on the Antarctic environment. *Antarctic Science* 21(1), 3-33.
- Tristán, R. M. (2020, julio 9). La amenaza de los turistas en la Antártida, en el punto de mira. Ediciones EL PAÍS S.L. https://elpais.com/elpais/2020/07/01/somos_antartida/1593602228_731837.html
- Turismo antártico. (s/f). Gob.ar. Recuperado el 15 de agosto de 2023, de <https://cancilleria.gob.ar/es/iniciativas/dna/proteccion-del-medio-ambiente/turismo-antartico>

- Turismo y Actividades no Gubernamentales. (s/f). Ats.aq. Recuperado el 15 de agosto de 2023, de <https://www.ats.aq/s/tourism.html>
- Universidad de Playa Ancha (UPLA). 2002. Antecedentes técnico-científicos para la generación de la norma de calidad secundaria de sedimentos marinos y lacustres. Proyecto Programa Priorizado de Normas, Comisión Nacional de Medioambiente, Chile, Informe Final, 156 pp.
- Universitat Autònoma de Barcelona. (s/f). El Misterio de la Isla de Decepción resuelto. La mayor erupción en los últimos milenios que ha sacudido la Antártida. UABDivulga Barcelona Investigación e Innovación. Recuperado el 17 de agosto de 2023, de <https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/el-misterio-de-la-isla-de-decepcion-resuelto-la-mayor-erupcion-en-los-ultimos-milenios-que-ha-sacudido-la-antartida-1345680342040.html?noticiaid=1345782036412>
- Usán, M. (2020, April 26). La contaminación atmosférica está llegando a la Antártida. Heraldo de Aragón. <https://www.heraldo.es/noticias/aragon/2020/04/26/la-contaminacion-atmosferica-esta-llegando-a-la-antartida-1371361.html>
- Valdés, J., & Castillo, A. (2014). Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos marinos en el sistema de bahías de Caldera (27 S), Chile. *Latin american journal of aquatic research*, 42(3), 497-513.
- Vázquez, G., Ortega, B., Davies, S.J. and Aston, B.J. 2010. Registro sedimentario de los últimos ca. 17000 años del lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 62(3), 325-343.
- Vieira, R., Marotta, H., da Rosa, K.K., Jaña, R., Simões, C.L., de Souza Júnior, E., Ferreira, F., Santos, L.R., dos Santos, J.V. and Perroni, M.A. 2015. Análisis sedimentológico y geomorfológico de áreas lacustres en la Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica Marítima. *Investigaciones Geográficas* (49), ág. 3-30.

- Vincent, W.F., Hobbie, J.E. and Laybourn-Parry, J. 2008. Introduction to the limnology of high-latitude lake and river ecosystems. Polar lakes and rivers: limnology of Arctic and Antarctic aquatic ecosystems, 1-24.
- Vlček, V., Juříčka, D. and Míková, J. 2017. Heavy metal concentration in selected soils and sediments of Livingston Island, Deception Island, King George Island, James Ross Island (Antarctica). Czech Polar Reports 7(1), 18-33.
- Volcanes En La Antártida: Científicos Descubren Más De 100 Bajo El Hielo » COTECNO. (2017). COTECNO | Equipamiento Científico | Prospecciones, Auscultación, Geofísica, Ingeniería; Cotecno. <https://www.cotecno.cl/volcanes-en-la-antartida-cientificos-100-hielo/>
- Volcanian, P. (2017, September 5). Isla Buckle. Volcanian. <https://volcanianoficial.com/isla-buckle/>
- Watcham, E., Bentley, M., Hodgson, D., Roberts, S.J., Fretwell, P., Lloyd, J., Larter, R., Whitehouse, P., Leng, M. and Monien, P. 2011. A new Holocene relative sea level curve for the South Shetland Islands, Antarctica. Quaternary Science Reviews 30(21-22), 3152-3170.
- Yergeau, S. (2021). Reconstitution paléolimnologique des effets des activités anthropiques de la péninsule de Fildes, Îles Shetland du Sud, Antarctique (Doctoral dissertation, Université Laval).
- Zhao, B., Maeda, M., Zhang, J., Zhu, A. and Ozaki, Y. 2006. Accumulation and chemical fractionation of heavy metals in andisols after a different, 6-year fertilization management. Environmental science and pollution research international 13(2), 90-97.

8. ANEXOS

Resultados Prueba Estadística

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

Lago Hotel $p > 0,05$ Normal

Arsénico $W = 0.64961$, $p\text{-value} = 7.55e-05$ No normal

Cadmio $W = 0.36432$, $p\text{-value} = 3.391e-07$ No normal

Cromo $W = 0.73274$, $p\text{-value} = 0.0005693$ No normal

Cobre $W = 0.79458$, $p\text{-value} = 0.003135$ No normal

Níquel $W = 0.64186$, $p\text{-value} = 6.338e-05$ No normal

Plomo $W = 0.86507$, $p\text{-value} = 0.02859$ No normal

Zinc $W = 0.78605$, $p\text{-value} = 0.002448$ No normal

Mercurio $W = 0.75164$, $p\text{-value} = 0.0009394$ No normal

Lago Xihu $p > 0,05$ Normal

Arsénico $W = 0.82335$, $p\text{-value} = 0.007447$ No normal

Cadmio $W = 0.86065$, $p\text{-value} = 0.02466$ No normal

Cromo $W = 0.94685$, $p\text{-value} = 0.4763$ Normal

Cobre $W = 0.95843$, $p\text{-value} = 0.6652$ Normal

Níquel $W = 0.86912$, $p\text{-value} = 0.03275$ No normal

Plomo $W = 0.87183$, $p\text{-value} = 0.0359$ No normal

Zinc $W = 0.8534$, $p\text{-value} = 0.01941$ No normal

Mercurio $W = 0.90042$, $p\text{-value} = 0.09659$ Normal

Lago Kitiash $p > 0,05$

Arsénico $W = 0.94202$, $p\text{-value} = 0.4085$ Normal

Cadmio $W = 0.90952$, $p\text{-value} = 0.1331$ Normal

Cromo $W = 0.92659$, $p\text{-value} = 0.2425$ Normal

Cobre $W = 0.88835$, $p\text{-value} = 0.06332$ Normal

Niquel $W = 0.84825$, $p\text{-value} = 0.0164$ No normal

Plomo $W = 0.95553$, $p\text{-value} = 0.6154$ Normal

Zinc $W = 0.95231$, $p\text{-value} = 0.5615$ Normal

Mercurio $W = 0.7317$, $p\text{-value} = 0.0005542$ No normal

Lago Uruguay $p > 0,05$ Normal

Arsénico $W = 0.77944$, $p\text{-value} = 0.002027$ No normal

Cadmio $W = 0.63894$, $p\text{-value} = 5.935e-05$ No normal

Cromo $W = 0.87152$, $p\text{-value} = 0.03552$ No normal

Cobre $W = 0.91572$, $p\text{-value} = 0.1657$ Normal

Niquel $W = 0.87066$, $p\text{-value} = 0.03451$ No normal

Plomo $W = 0.85051$, $p\text{-value} = 0.01766$ No normal

Zinc $W = 0.93884$, $p\text{-value} = 0.368$ Normal

Mercurio $W = 0.76977$, $p\text{-value} = 0.001544$ No normal

DISTRIBUCIÓN NORMAL

Test de Levene $p > 0,05$ varianza homogénea

Lago Xihu

Cromo Pr(>F) 0.4648

Cobre Pr(>F) 0.1761

Mercurio Pr(>F) 0.0809

Lago Kitiesh

Arsénico Pr(>) 0.2808

Cadmio Pr(>F) 0.5044

Cromo Pr(>F) 0.8265

Cobre Pr(>F) 0.7991

Plomo Pr(>F) 0.9585

Zinc Pr(>F) 0.8136

Lago Uruguay

Cobre Pr(>F) 0.5927

Zinc Pr(>F) 0.4913

Test T-Student $P > 0,05$ pruebas estadísticas significativas

Lago Xihu

Cromo p-value = 0.3047

Cobre p-value = 0.7064

Mercurio p-value = 0.03455

Lago Kitiesh

Arsénico p-value = 0.5708

Cadmio p-value = 0.006403

Cromo p-value = 0.2753

Cobre p-value = 0.3925

Plomo p-value = 0.01887

Zinc p-value = 0.5

Lago Uruguay

Cobre p-value = 0.2694

Zinc p-value = 0.1187

LIBRE DISTRIBUCIÓN

U-Mann Whitney Wilcoxon

$p \leq \alpha$: La diferencia entre las medianas es estadísticamente significativa

$p > \alpha$: La diferencia entre las medianas no es estadísticamente significativa

Lago Hotel

Arsénico p-value = 0.001465

Cadmio p-value = 1

Cromo p-value = 0.04282

Cobre p-value = 0.03956

Níquel p-value = 0.433

Plomo p-value = 0.4117

Zinc p-value = 0.01758

Mercurio p-value = 0.9495

Lago Xihu

Arsénico p-value = 0.8513

Cadmio p-value = 0.9495

Niquel p-value = 0.7933

Plomo p-value = 0.00293

Zinc p-value = 1

Lago Kitiesh

Niquel p-value = 0.1377

Mercurio p-value = 0.03956

Lago Uruguay

Arsénico p-value = 0.3429

Cadmio p-value = 0.1773

Cromo p-value = 0.01026

Níquel p-value = 0.01026

Plomo p-value = 0.1773

Mercurio p-value = 0.7531