

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental



Facultad de Biología

Facultad de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería Química

**Evaluación de la calidad del agua y sedimentos,
presencia de elementos traza y microplásticos en el
lago de Zirahuén, Michoacán**

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL

Presenta

Q.F.B. Adabella Ruiz Vigil

Directores de Tesis:

Dr. Raúl Cortés Martínez

Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva

Morelia Michoacán Febrero 2023

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con todo mi amor a:

La memoria de mi madre Luz María Vigil Cortés †. A mi padre Tiburcio Ruiz Tena, que son uno de los motores que me impulsan a salir adelante.

A la familia Chávez Tinoco, en especial a Carlos Alberto Chávez por apoyarme en el transcurso de mi desarrollo como profesionista.

Mis profesores, compañeros y amigos del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental.

Gracias por siempre estar ...

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo en el Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, bajo la dirección y colaboración del Dr. Raúl Cortés Martínez y la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva.

Agradezco en primer lugar a mis padres, por su gran apoyo, su amor y la confianza que han tenido en mí.

A la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva y al Dr. Raúl Cortés Martínez por su gran amistad, su valioso apoyo y enseñanza para poder llevar a cabo este trabajo de investigación, las cuales contribuyeron a mi formación académica y personal.

Agradezco a las autoridades de las instituciones involucradas las facilidades brindadas para la elaboración de esta tesis.

Al Ing. Octavio Muñoz Torres y al Laboratorio de Calidad del Agua de la COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA por su apoyo y facilidades brindadas en las determinaciones fisicoquímicas y bacteriológicas.

A mis sinodales, el Dr. Otoniel Buenrostro Delgado, Dr. Roberto Guerra González y M.C. Eduardo González Valdez por todos sus aportes y observaciones para mejora de este trabajo.

Al laboratorio de Edafología de la Facultad de Biología; Dr. Juan Carlos González Cortés por su apoyo en las determinaciones de textura y color de sedimentos para este trabajo.

A mi tesista de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Gustavo Álvarez Gómez por el apoyo y tiempo compartido en la realización de este trabajo.

A la Dra. Ofelia Morton Bermea y a la M.C. Elizabeth Hernández Álvarez por su apoyo en la determinación de elementos traza en agua por ICP-MS.

A mi amiga Bárbara Rodríguez Villalobos por siempre estar apoyándome y la confianza que ha tenido en mí.

Al laboratorio de metalurgia por su apoyo en el análisis mediante FRX para elementos traza en sedimentos.

A Carlos Miguel Muñoz Ramírez por estar conmigo durante mi desarrollo tanto profesional como laboral.

Contenido

I. RESUMEN GENERAL	8
II. ABSTRACT	9
III. INTRODUCCIÓN GENERAL	10
III. HIPÓTESIS	14
V. OBJETIVOS	15
V.1. General	15
V.2. Particulares	15
VI.1. CAPÍTULO 1	17
PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS, ELEMENTOS TRAZA Y MICROPLÁSTICOS EN EL AGUA DEL LAGO DE ZIRAHUÉN, MICHOACÁN	17
RESUMEN	17
ABSTRACT	18
VI.1.1. INTRODUCCIÓN	19
VI.1.2. MATERIALES Y MÉTODOS	22
VI.1.2.1. Área de estudio	22
VI.1.2.2. Plan de muestreo	22
VI.1.2.2.1. Selección de los sitios de muestreo	22
Figura 1. Localización de los sitios de muestreo	24
VI.1.2.3. Toma de muestras para parámetros fisicoquímicos y componentes mayores	24
VI.1.2.4. Toma de muestras para elementos traza en agua	25
VI.1.2.5. Toma de muestra para coliformes fecales	25
VI.1.2.6. Toma de muestra para microplásticos en agua	26
VI.1.2.7. Procedimiento general para el análisis de agua	26
VI.1.2.8. Determinación de elementos traza	26
VI.1.2.9. Determinación de microplásticos	27
VI.1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
VI.1.3.1. Parámetros fisicoquímicos en agua	27
Figura 2. Valores de temperatura (°C) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	28
Figura 3. Valores de pH de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	29
Figura 4. Valores de conductividad eléctrica (µS/cm) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	30

Figura 5. Valores de oxígeno disuelto (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	31
Figura 6. Valores de DBO ₅ (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén	32
.....	32
Figura 7. Valores de DQO (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén	32
.....	34
Figura 9. Valores de turbiedad (UNT) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	34
Figura 10. Valores de dureza (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	35
Figura 11. Valores de alcalinidad total (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	35
.....	35
Figura 12. Valores de nitrógeno de nitratos (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	36
Figura 13. Valores de nitrógeno amoniacal (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	37
Figura 14. Valores de fosfatos (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	38
Figura 15. Valores de sulfatos (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.....	39
VI.1.3.1.2. Diagramas de Piper y Schöeller	39
Figura 16. Diagrama de Piper correspondiente al muestreo del mes de julio 2021 para los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.....	39
Figura 17. Diagrama de Schöeller correspondiente al muestreo del mes de julio 2021 para los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	40
VI.1.3.2. Elementos traza.....	41
Figura 18. Concentraciones de Fe (mg/L) determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.	42
.....	42
Figura 19. Concentraciones de Zn en mg/L determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.	43
.....	43
Figura 20. Concentraciones de Cu (mg/L) determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.	43
.....	43
Figura 21. Concentraciones de Pb (mg/L) determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.	44
.....	44
Figura 22. Concentraciones de Cr en mg/L determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.	45
.....	45
Figura 23. Concentraciones de Ni (mg/L) determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.	46
.....	46
VI.1.3.3. Microplásticos	46
Figura 24. Concentraciones de microplásticos (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	47
.....	47
Figura 25. Imagen a 40x de los microplásticos en las muestras del lago de Zirahuén.....	48

VI.1.4. CONCLUSIONES	49
VI.1.5. BIBLIOGRAFIA	50
VI.2. CAPÍTULO 2	55
ELEMENTOS TRAZA EN SEDIMENTO DEL LAGO DE ZIRAHUÉN, MICHOACÁN....	55
RESUMEN.....	55
II. ABSTRACT	56
VI.2.1. INTRODUCCIÓN	58
VI.2.2. MATERIALES Y MÉTODOS	59
VI.2.2.1. Área de estudio.....	59
VI.2.2.2. Plan de muestreo.....	60
VI.2.2.2.1. Selección de los sitios de muestreo.....	60
Figura 2. Localización de los sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	60
VI.2.2.3. Parámetros	61
VI.2.2.4. Toma de muestras de sedimento.....	61
VI.2.2.5. Procedimiento general para la determinación de características físicas en sedimentos.....	62
VI.2.2.6. Determinación de elementos traza	62
VI.2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
VI.2.3.1. Descripción de la muestra y parámetros fisicoquímicos	63
Figura 3. Valores de pH para sedimento en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	66
VI.2.3.2. Concentración de elementos traza.....	66
Figura 4. Valores de He en % para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.....	67
Figura 5. Valores de Cu (mg/kg) para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	68
Figura 6. Valores de Zn (mg/kg) para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	69
Figura 7. Valores de Cr (mg/kg) para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de.....	70
Figura 8. Valores de Ni (mg/kg) para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	71
VI.2.3.3. Modelación de la especiación química	71
Figura 9. Especiación química del He en temporada de precipitación pluvial.....	72
Figura 10. Especiación química del He . Temporada de estiaje.....	73
Figura 11. Especiación química del Ni en la temporada de precipitación pluvial.	73
Figura 12. Especiación química del Ni en la temporada de estiaje.	74

Figura 13. Especiación química del Zn en la temporada de precipitación pluvial.....	75
Figura 14. Especiación química del Zn en la temporada de estiaje.....	75
VI.2.4. CONCLUSIONES	76
VI.2.5 BIBLIOGRAFÍA	77
VII. DISCUSIÓN GENERAL	79
VIII. RECOMENDACIONES	80
ANEXO A: TABLAS DE RESULTADOS AGUA.....	81
Tabla 1. Resultados de los parámetros de campo en los sitios de estudio.....	81
Tabla 2. Escala de clasificación de calidad de agua superficial con base en la demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO5) y la demanda química de oxígeno	82
Tabla 3. Resultados de parámetros fisicoquímicos y coliformes fecales.	84
Tabla 4. Resultados de iones mayoritarios.....	85
Figura 1. Diagrama de Piper correspondiente al muestreo del mes de octubre 2021 para los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	87
Figura 2. Diagrama de Piper correspondiente al muestreo del mes de marzo 2022 para los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.	88
Figura 3. Diagrama de Schöeller correspondiente al muestreo del mes de octubre 2021 para los 10 sitios en el lago de Zirahuén.....	89
Figura 4. Diagrama de Schöeller correspondiente al muestreo del mes de marzo 2022 para los 10 sitios.	90
Tabla 5. Resultados de elementos traza en agua determinados por ICP-MS para los sitios de estudio.	91
ANEXO B: TABLAS DE RESULTADOS DE SEDIMENTO	93
Tabla 6. Resultados de elementos traza en sedimento determinados por fluorescencia de rayos X para los sitios de estudio en ppm.....	93
Tabla 7. Concentraciones de metales pesados en sedimentos (mg/kg base seca) de acuerdo a las tablas de referencia (NOOA, 2008).....	95
Tabla 8. Concentraciones de referencia de metales pesados en agua para consumo humano (mg/L) de acuerdo a las guías en el mundo (Öztürk et al., 2009)).	96

I. RESUMEN GENERAL

El deterioro de los recursos hídricos es un problema a nivel mundial, las actividades antropogénicas son la principal causa ya que generan contaminación por vertidos de aguas residuales (contaminación puntual), por escorrentías dentro de las cuencas debido al cambio de cobertura vegetal natural (contaminación difusa) para otorgar otros usos al suelo. El objetivo principal de este trabajo es conocer cómo ha cambiado la calidad del agua del lago. Existen pocos estudios de este tipo en el lago de Zirahuén y es escasa la información de elementos traza en agua y sedimento en la zona de estudio, así como nula información sobre microplásticos. Los resultados obtenidos y analizados se deduce que el agua presenta un pH alcalino, en cuanto la alcalinidad presenta mayor concentración de HCO_3 , en la dureza hay una mayor concentración de Ca. La concentración de elementos traza en agua en la mayoría de los sitios se reportan concentraciones inferiores al límite de detección del equipo. A las muestras de sedimentos se les realizó una caracterización física de color, se determinaron los elementos traza por fluorescencia de rayos X (FRX), así como también la determinación de pH y textura. Los sedimentos resultaron de color café la mayoría y con textura franco arenosa, en la mayoría el pH es neutro. Las concentraciones de elementos traza se compararon con los criterios de protección para sedimentos en agua dulce, como los niveles de bajo efecto (LEL) y efecto severo (SEL), las concentraciones de Fe, Zn, Cu, Ni y Cr en todos los sitios rebasaron el nivel de bajo efecto y el nivel de efecto severo en los tres muestreos realizados, notándose un incremento de estos elementos en la temporada de estiaje, respecto a los microplásticos fue posible su identificación, cuantificación y observación en el microscopio a 40x.

Palabras clave: elementos traza, microplásticos, afluente.

II. ABSTRACT

The deterioration of water resources is a problem worldwide, anthropogenic activities are the main cause, since they generate pollution due to wastewater discharges (point pollution), runoff within the basins due to the change in natural vegetation cover (diffuse pollution).) to grant other uses to the land. On a global scale, land use change is considered the main factor in the deterioration of surface water bodies. There are studies on water quality parameters that were carried out by the National Water Commission in bodies of water in the country. The main objective of this work is to know how the water quality of Lake Zirahuén has changed, with the support of the historical record of the lake. The importance of analyzing trace elements and microplastics is that they are harmful to health and the ecosystem due to their persistence and toxicity. It is important to emphasize that there are few studies of this type in Lake Zirahuén and there is little information on trace elements in water and sediment in the study area, as well as no information on microplastics. Based on the results obtained and analyzed, it can be deduced that the water has an alkaline pH, while alkalinity has a higher concentration of HCO_3 , in hardness there is a higher concentration of Ca, followed by Mg and to a lesser extent Na. The concentration of trace elements in water in most of the sites reported concentrations below the detection limit of the equipment. The sediment samples underwent a physical characterization of color, the trace elements were determined by X-ray fluorescence (XRF), as well as the determination of pH and texture. The sediments were mostly brown in color and with a sandy loam texture, in most the pH is neutral. Trace element concentrations were compared to protection criteria for freshwater sediments, such as low effect levels (LEL) and severe effect levels (SEL), Fe, Zn, Cu, Ni, and Cr concentrations at all sites. they exceeded the level of low effect and the level of severe effect both in the sampling of pluvial precipitation and in the dry season, noting an increase of these elements in the dry season. This work briefly presents the degree of contamination in Lake Zirahuén, where the highest concentrations of trace elements occurred at site 5, which is the main tributary to said body of water, regarding microplastics it was possible to identify them, quantification and observation in the microscope at 40x.

III. INTRODUCCIÓN GENERAL

La calidad del agua se define como el conjunto de características del agua que pueden afectar su adaptabilidad a un uso específico, la relación entre esta calidad del agua y las necesidades del usuario. También la calidad del agua se puede definir por sus contenidos de sólidos y gases, ya sea que estén presentes en suspensión o en disolución (Mendoza, 1976). La evaluación de la calidad del agua es un proceso de enfoque múltiple que estudia la naturaleza física, química y biológica del agua con relación a la calidad natural, efectos humanos y acuáticos relacionados con la salud (FAO, 1996).

La calidad del agua en las corrientes superficiales está determinada por la presencia de condiciones físicas, elementos y compuestos químicos, organismos vivos y por el aprovechamiento a que se encuentran sujetas. Los fenómenos naturales y las actividades humanas se encargan de alterar estas condiciones. Las modificaciones al ciclo hidrológico afectan la introducción y distribución del recurso dentro de una cuenca hidrográfica. De igual forma, la influencia antropogénica como el cambio en el uso de suelo, se encarga de acumular diferentes contaminantes que representan un riesgo para la calidad del agua superficial y subterránea (Herrera, 2007).

A partir de la Revolución Industrial el tema de la contaminación en todos los ambientes dio un giro importante, al existir un incremento de materias primas útiles en los procesos industriales y el uso de nuevas fuentes de energía aumentaron la escala de impactos ambientales. La introducción de componentes de mayor o menor toxicidad en el medio natural supera la capacidad de “autolimpieza” de los ecosistemas dando como resultado la acumulación de contaminantes perjudiciales como son los metales pesados (Martin 2008).

En México los lagos son escasos, el Estado de Michoacán posee tres lagos que son parte de los cuerpos de agua dulce más importantes del país: Pátzcuaro, Cuitzeo y Zirahuén. Por su parte el lago de Zirahuén es de los más profundos y jóvenes del país, lo caracteriza su

transparencia y belleza no sólo del lago sino también de los densos bosques que lo rodean (Ortiz-Paniagua et al, 2010).

Contaminación por elementos traza

Los elementos traza o metales pesados pertenecen a los contaminantes prioritarios más peligrosos, pueden entrar en los depósitos de agua y participar en reacciones de hidrólisis, adsorción, desorción, formación de complejos y precipitación. En estas reacciones la especiación de metales puede cambiar (Sedykh *et al*, 2000). La descarga de metales pesados en el medio acuático es de gran preocupación en todo el mundo. Bajo ciertas condiciones ambientales, los metales pesados pueden acumularse a una concentración tóxica y causar daños ecológicos (Ömer *et al*, 2008). En la Tabla 1 se presenta un resumen de los elementos traza que sean encontrado en aguas naturales.

Tabla 1. Resumen de elementos traza importantes encontrados en aguas naturales (Manahan, 2007).

Elemento	Fuentes	Efectos e importancia
Arsénico	Subproductos mineros, residuales químicos.	Tóxico, posiblemente carcinogénico.
Berilio	Carbón, residuos industriales.	Tóxico.
Boro	Carbón, detergentes, residuos líquidos.	Tóxico.
Cobre	Recubrimientos metálicos, minería, residuos industriales.	Elemento traza esencial, tóxico en niveles altos.
Cromo	Recubrimientos metálicos.	Esencial como Cr (III), tóxico como Cr (VI).
Flúor	Fuentes geológicas naturales.	Previene caída de dientes, y caries dental (mg/L). Tóxico a niveles superiores.
Hierro	Residuos industriales, corrosión, agua ácida de minas, acción microbiana.	Nutriente esencial.
Manganeso	Residuos industriales, drenajes o aguas ácidas de las minas, acción microbiana.	Tóxico a las plantas.
Mercurio	Residuos industriales, minería y carbón.	Tóxico, se moviliza como compuestos metilados de mercurio por bacterias anaerobias.

Plomo	Residuos industriales, minería y combustibles.	Tóxico, daña a la fauna.
Zinc	Residuos industriales, recubrimiento de metales.	Elemento esencial, tóxico para las plantas a altos niveles.

Contaminación por microplásticos y elementos traza

Los plásticos son polímeros procedentes del petróleo combinados con otras sustancias, diferentes aditivos, que son los que le confieren las propiedades deseadas en cuanto a su textura, resistencia a la temperatura, maleabilidad, estabilidad, brillo, etc. (Bilbao Villena, 2015).

Bajo ciertas condiciones ambientales, los microplásticos pueden acumularse a una concentración tóxica y causar daños ecológicos (Ömer *et al*, 2008).

Entre los plásticos de consumo más utilizados encontramos el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el policloruro de vinilo (PVC) y el polietilentereftalato (PET). Dentro de la categoría de plásticos también podemos incluir las fibras, los recubrimientos y las gomas.

Cada tipo de plástico puede a su vez contener una serie de aditivos para modificar sus propiedades que también pueden terminar afectando al medioambiente. (Toledo Martínez, 2019). La Tabla 2 muestra algunos ejemplos de plásticos ampliamente utilizados en la actualidad.

Tabla 2. Plásticos (nombres completos, acrónimos y productos de plásticos característicos) (Rojo-Nieto et al, 2017).

NOMBRE COMPLETO	ACRÓNIMO	PRODUCTOS
Polietileno tereftalato	PET	Botellas plásticas
Poliéster	PES	Ropa de poliéster
Polietileno de baja densidad	LDPE ó PEBD	Bolsas de plástico
Polietileno de alta densidad	HDPE ó PEAD	Botellas de detergente
Policloruro de vinilo	PVC	Tuberías
Polipropileno	PP	Tapas de botellas
Poliamida	PA	Cepillos de dientes

Poliestireno	PS	Envases de comida para llevar
--------------	----	-------------------------------

Cuando el tamaño de partícula se encuentra entre 1 y 5 μm se conocen como microplásticos (Gigault et al., 2018). Su difícil reciclaje y su baja capacidad de degradación tienen como consecuencia una acumulación de éstos en el medio ambiente, lo que ha sido reconocido como un problema medioambiental emergente.

La introducción de los microplásticos a las fuentes superficiales como los lagos, ríos, estanques, presas y océanos se da principalmente por dos circunstancias:

1. Los microplásticos primarios son partículas diseñadas en esos tamaños de partícula de manera intencional con el fin de fabricar artículos de limpieza, plástico pulverizado, en la industria farmacéutica, prendas textiles sintéticas, entre otras. Estas micropartículas suponen un grave problema ambiental al incorporarse tras su uso a la red de alcantarillado, sorteando los sistemas de saneamiento y desembocando en los mares y océanos (Rojo-Nieto et al, 2017).
2. Los microplásticos secundarios resultan de la desintegración de plásticos más grandes que, por la interacción de los rayos UV del sol y la fricción a la que son sometidos por el oleaje forman moléculas igual de resistentes que el desintegrado.

El lago de Zirahuén recibe la desembocadura de su principal afluente, río El Silencio, que trae consigo aguas residuales domésticas e industriales debido a los trabajos de alfarería que realizan poblaciones cercanas a Zirahuén, afectando al ecosistema acuático y provocando un riesgo para la salud de la población, debido al uso y consumo que hacen de dicha agua. Por ello, es necesario realizar estudios sobre el contenido de elementos traza y microplásticos tanto en el lago como en el río. Esto ayudará a reconocer cuáles de estos contaminantes están presentes, su especiación química y posiblemente su control o el uso de tecnologías para su remoción o remediación.

Métodos de análisis

La cuantificación o análisis cuantitativo de diferentes elementos o compuestos se puede llevar a cabo utilizando métodos espectroscópicos de absorción y emisión. Los de absorción atómica se basan en la cantidad de energía que absorbe el analito al pasar de un estado de menor energía a otro de mayor energía. En los casos de espectroscopía de emisión, donde se incluye la fluorescencia de rayos X, se cuantifica la energía liberada en forma de fluorescencia cuando el electrón pasa de un orbital de mayor energía a otro de menor energía. En este caso específico se requiere de una radiación de rayos X para producir fluorescencia en determinados materiales; la cual se utiliza con fines de identificación y de cuantificación. Entre las técnicas de espectroscopia atómica utilizadas convencionalmente para el análisis elemental están las de absorción atómica y la de inducción de plasma acoplado, las dos son destructivas, lo que se traduce en la pérdida de muestra. Estas técnicas se han aplicado en la industria para determinar el contenido y la composición elemental con el fin de optimizar su explotación comercial o bien para control de calidad. Además es muy utilizada en diversas áreas como la farmacéutica, geología, materiales, forense, arqueología y análisis ambientales, entre otros (Meléndez y Camacho, 2009).

III. HIPÓTESIS

La presencia de elementos traza y microplásticos está afectando la calidad del agua y sedimentos en el lago de Zirahuén.

V. OBJETIVOS

V.1. General

- Evaluar la calidad del agua y sedimentos con especial atención en elementos traza y microplásticos.

V.2. Particulares

- Realizar una caracterización fisicoquímica, bacteriológica y de elementos traza en el agua del lago en las temporadas de precipitación pluvial y estiaje.
- Identificar la presencia de microplásticos en el agua del lago en las temporadas de precipitación pluvial y estiaje.
- Determinar el contenido de elementos traza en sedimentos del lago en las temporadas de precipitación pluvial y estiaje.
- Establecer el diagnóstico de la calidad actual del agua y sedimentos.
- Realizar una modelación de la especiación química del agua y sedimentos.

CAPÍTULO 1

VI.1. CAPÍTULO 1

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, ELEMENTOS TRAZA Y MICROPLÁSTICOS EN EL AGUA DEL LAGO DE ZIRAHUÉN, MICHOACÁN.

RESUMEN

El lago de Zirahuén se localiza en la porción Centro Norte del Estado de Michoacán, dentro de la región hidrológica del Balsas, entre las coordenadas 19°21'14" y 19°29'32" de latitud Norte y 101°30'33" y 101°46'15" de longitud Oeste. El cuerpo lacustre se ubica en la región Oeste de la cuenca a 2,075 msnm y posee una superficie de 10.48 km² ; es un lago monomítico, con estratificación en verano y mezcla en oligotrófico, de tipo endorreico y posee una profundidad máxima de 43 m.

El afluente principal es el río La Palma o El Silencio, clasificado como de cuarto orden y de tipo perenne. Existen otras corrientes intermitentes de segundo y tercer orden en zonas de pendientes poco pronunciadas.

La variación de los parámetros fisicoquímicos analizados *in situ* no representa diferencias significativas en las características del agua de los sitios estudiados y existen similitudes entre sitios en ambas temporadas de muestreo.

En cuanto a los resultados fisicoquímicos se incrementa la concentración en el sitio 5, cabe mencionar que en el sitio 6 y 7 es donde se encuentran los sembradíos de aguacates, que podrían estar aportando contaminantes provenientes de fertilizantes, plaguicidas. En temporada de estiaje se incrementaron los nitratos por el tiempo de retención y el oxígeno, por lo que pasa de nitrógeno amoniacal a nitratos que es su forma oxidada, al igual los fosfatos incrementaron en esta temporada al no haber lluvia no existe su dilución y por ende incrementa su concentración.

En sólidos en estiaje disminuyeron corroborándose con el color y turbiedad, como ya es bien sabido que la lluvia arrastra muchas partículas se incrementan y de manera conjunta incrementa el color y la turbiedad del cuerpo de agua que se está analizando.

Respecto a los elementos traza en algunos sitios se encontró Fe, Zn, Cr pero la mayoría fueron inferiores al límite de detección reportado por el método (ICP-MS), lo cual se concluye que entra muy poca cantidad de estos elementos al lago. Se observó la presencia de microplásticos en todos los sitios estudiados, en concentraciones desde 0.036 mg/L correspondiente al sitio 5 en el muestreo de octubre, hasta 0.0311mg/L en el sitio 3 de para el muestreo de julio. El muestreo del mes de marzo se mantuvo de manera constante en cada uno de los sitios no mostrando variaciones significativas.

ABSTRACT

Zirahuén Lake is located in the North Central portion of the State of Michoacán, within the Balsas hydrological region, between the coordinates 19°21'14" and 19°29'32" North latitude and 101°30'33" and 101°46'15" West longitude. The lake body is located in the western region of the basin at 2,075 masl and has an area of 10.48 km²; It is a monomictic lake, with summer stratification and oligotrophic mixing, endorheic type and has a maximum depth of 43 m.

The main tributary is the La Palma or El Silencio river, classified as fourth order and perennial. There are other intermittent second and third order currents in areas with little steep slopes.

The variation of the physicochemical parameters analyzed in situ does not represent significant differences in the water characteristics of the studied sites and there are similarities between sites in both sampling seasons.

Regarding the physicochemical results, the concentration in site 5 increases, it is worth mentioning that in sites 6 and 7 is where the avocado fields are located, which could be contributing contaminants from fertilizers, pesticides. In the dry season, nitrates increased due to the retention time and oxygen, which is why it goes from ammoniacal nitrogen to nitrates, which is its oxidized form, just as phosphates increased in this season since there was no rain, there is no dilution and therefore So it increases your concentration.

In dry season solids decreased, corroborating with color and turbidity, as it is well known that rain carries many particles, they increase and jointly increase the color and turbidity of the body of water being analyzed.

Regarding the trace elements, Fe, Zn, Cr were found in some sites, but most of them were lower than the detection limit reported by the method (ICP-MS), which concludes that very little amount of these elements enters the lake. observed the presence of microplastics in all the studied sites, in concentrations from 0.036 mg/L corresponding to site 5 in the October sampling, up to 0.0311mg/L in site 3 for the July sampling. The sampling of the month of March was maintained in a constant manner in each one of the sites, showing no significant variations.

VI.1.1. INTRODUCCIÓN

Los cuerpos de agua no son solamente agua, son un conjunto de ecosistemas formados por una gran variedad de especies animales y vegetales, y un elemento indispensable para mantener el equilibrio climático del planeta (Bates et al., 2008). Así que el aprovechamiento racional de los recursos hídricos como parte de un plan de desarrollo sustentable es fundamental para la preservación del agua, de ecosistemas saludables, equilibrio climático y como consecuencia, preservación de los asentamientos humanos, las culturas y actividades socioeconómicas (Sophocleous, 2000).

La contaminación de un cuerpo de agua se define como una alteración en su integración ambiental que ocasiona un daño y es ocasionada por factores antropogénicos o naturales. Esta alteración incluye la afectación inicial de cualquiera de sus elementos físicos, químicos o biológicos (Novotny, 2003), de la que se van derivando otros cambios en el resto del ecosistema acuático. La alteración limita su uso y en algunos casos es fuente de enfermedad para el hombre (Gleick,1993; Chapman et al., 1996).

La contaminación procede de fuentes puntuales y fuentes no puntuales o difusas. La contaminación puntual corresponde a efluentes de agua residual fácilmente identificables, éstas son principalmente las descargas de tuberías o canales, comprende a los afluentes de agua residual municipal e industrial y existe una estructura que permite su identificación y

caracterización (Novotny, 1994; Novotny 2003). En contraste, la cuantificación, evaluación y control de la contaminación difusa o no puntual es mucho más compleja. La contaminación difusa involucra el transporte y transformación de desechos que puede ser a través de diversos medios, como el suelo, el aire y el agua (Novotny, 2003; Alfaro y Salazar, 2005). Sin embargo, el principal mecanismo mediante el cual se inicia el transporte de contaminantes a los cuerpos de agua provenientes de fuentes no puntuales, es la lluvia. El agua de lluvia promueve el escurrimiento y arrastra hacia los cuerpos de agua lo que se encuentra a su paso (Cisneros et al., 2010).

Las características más relevantes de la contaminación difusa son las siguientes: resultan de actividades ligadas al uso de suelo de las que se generan escurrimientos como son las zonas urbanas, tierras agrícolas, actividades pecuarias, mal manejo de contenedores de basura; estas fuentes de contaminación están fuertemente influenciadas por los patrones de lluvia como son la intensidad, volumen total, frecuencia. Los desechos de contaminación difusa más importantes y sujetos al manejo y control son: sólidos suspendidos, microorganismos fecales, compuestos tóxicos, nutrientes principalmente fósforo y nitrógeno (Novotny, 2003).

De acuerdo con las directrices de calidad del agua las concentraciones de metales traza son uno de los parámetros en los criterios de evaluación del estado ecológico de cuerpos de agua naturales. La característica fundamental de los metales traza es su persistencia (no biodegradables), una vez que entran en un sistema acuático, los metales traza se redistribuyen en la columna de agua (en forma de partícula o disuelta), posteriormente se depositan y acumulan en los sedimentos y en parte son consumidos por los seres vivos (Cukrov et al., 2008). Los sedimentos acuáticos son depósitos de metales traza, sin embargo, a través de procesos biogeoquímicos puede ocurrir la removilización a la columna de agua (Ouyang et al., 2006), lo que puede aumentar significativamente su concentración a niveles tóxicos para los organismos acuáticos. Los metales pueden encontrarse en el agua formando diferentes especies químicas, cuya formación depende del pH, del potencial redox y de la presencia y concentración de otras sustancias orgánicas e inorgánicas en el agua, así como de la capacidad del metal para enlazarse, por lo que se considera importante la comprensión y

predicción del comportamiento y el impacto que éste pueda tener en cualquier sistema ambiental (Tipping et al. 1998).

Los plásticos son polímeros procedentes del petróleo combinados con otras sustancias, diferentes aditivos, que son los que le confieren las propiedades deseadas en cuanto a su textura, resistencia a la temperatura, maleabilidad, estabilidad, brillo, etc. (Bilbao Villena, 2015). Bajo ciertas condiciones ambientales, los microplásticos pueden acumularse a una concentración tóxica y causar daños ecológicos (Ömer *et al.* 2008). Entre los plásticos de consumo más utilizados encontramos el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el policloruro de vinilo (PVC) y el polietilentereftalato (PET). Dentro de la categoría de plásticos también podemos incluir las fibras, los recubrimientos y las gomas. El objetivo principal de este trabajo es analizar la calidad del agua haciendo énfasis en los elementos traza y microplásticos ya que éstos resultan dañinos a la salud y al ecosistema debido a su persistencia y toxicidad. Es importante recalcar que existen pocos estudios de este tipo en el lago de Zirahuén y es escasa la información de elementos traza en agua y sedimento en la zona de estudio, así como nula información sobre microplásticos.

VI.1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

VI.1.2.1. Área de estudio

Zirahuén (en purépecha “lugar de aguas profundas”) se localiza a 21 kilómetros de la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán. Se puede admirar su lago del mismo nombre.

El lago de Zirahuén se localiza en la porción centro norte del Estado de Michoacán, dentro de la región hidrológica del Balsas, entre las coordenadas 19°21'14" y 19°29'32" de latitud Norte y 101°30'33" y 101°46'15" de longitud Oeste. El cuerpo lacustre se ubica en la región Oeste de la cuenca a 2,075 msnm y posee una superficie de 10.48 km²; es un lago monomítico, con estratificación en verano y mezcla en oligotrófico, de tipo endorreico y posee una profundidad máxima de 43 m.

El afluente principal es el río La Palma o El Silencio, clasificado como de cuarto orden y de tipo perenne. Existen otras corrientes intermitentes de segundo y tercer orden en zonas de pendientes poco pronunciadas.

El clima es de tipo Cw (w₂)(w)_i, templado con lluvias en verano, con proporción de precipitación invernal inferior a 5%; la temperatura media anual es de 15.7°C y el promedio de precipitación anual de 1182.6 mm.

VI.1.2.2. Plan de muestreo

VI.1.2.2.1. Selección de los sitios de muestreo

Se seleccionaron 10 sitios de muestreo representativos del área de estudio en mención y se llevaron a cabo tres muestreos en los meses de julio, octubre de 2021 y marzo de 2022. Siguiendo las indicaciones establecidas en la Norma Mexicana para colecta de muestras en cuerpos receptores (NMX-AA-014-1980) y lo indicado en el manual (AWWA 2005) para cada uno de los parámetros. La Figura 2 y la Tabla 3 muestran la ubicación de la zona de estudio.

Tabla 3. Localización de los sitios de muestreo

SITIO	NOMBRE	COORDENADAS
P-01	Lago Zirahuén 01	19° 26' 56" N 101° 43' 54" W
P-02	Lago Zirahuén 02	19° 26' 23" N 101° 43' 26" W
P-03	Lago Zirahuén 03	19° 26' 8" N 101° 43' 12" W
P-04	Lago Zirahuén 04	19° 25' 53" N 101° 43' 23" W
P-05	Desembocadura del rio El Silencio al lago de Zirahuén 05	19° 25' 41" N 101° 43' 32" W
P-06	Lago Zirahuén 06	19° 25' 36" N 101° 43' 38" W
P-07	Lago Zirahuén 07	19° 25' 36.6996" N 101° 45' 21.0168" W
P-08	Lago Zirahuén 08	19° 26' 10.5177" N 101° 45' 38.376" W
P-09	Lago Zirahuén 09	19° 26' 34.0194" N 101° 44' 57.395" W
P-10	Lago Zirahuén 10	19° 27' 14.9282" N 101° 44' 33.5308" W



Figura 1. Localización de los sitios de muestreo.

VI.1.2.3. Toma de muestras para parámetros fisicoquímicos y componentes mayores

La colecta se realizó en botellas de polietileno de alta densidad (HDPE) de 2 L y 1L, se llenaron tratando de minimizar la presencia de aire con el objeto de evitar cambios químicos. En cada sitio se tomaron 3 L de muestra. 2L para los parámetros fisicoquímicos, y 1L exclusivamente para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y determinación de Nitrógeno amoniacal los cuales se depositaron en una hielera para mantener una temperatura de 4°C durante su traslado al laboratorio. La temperatura, la conductividad eléctrica, el pH y el oxígeno disuelto se midieron in situ utilizando un multímetro (Thermo Scientific Orion Star

serie A320) (AWWA, 2005). Se marcaron los recipientes con la fecha y el sitio de muestreo y se seguirá el procedimiento indicado en la normatividad mexicana (DOF 2002).

VI.1.2.4. Toma de muestras para elementos traza en agua

Para la colecta se utilizaron recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE) de 125 mL previamente descontaminados de la siguiente manera: cada frasco con su tapa y contratapa se introdujeron en una solución de HNO_3 al 10% durante una semana. Posteriormente se cambiaron a una solución de HNO_3 al 1% durante una semana. Después se enjuagaron tres veces y se llenaron con agua desionizada. En el lugar de muestreo se utilizó una de estas botellas como control, vaciándola y volviéndola a llenar in situ con agua desionizada esto con el objeto de obtener datos referentes a posibles contaminantes locales adquiridos en el manejo de las muestras, otra botella se vació también in situ y se llenó con la muestra. Todas las botellas se marcaron con la fecha y el sitio de muestreo, indicando correctamente el blanco, se colocaron en una hielera y se mantuvieron a 4°C durante su traslado al laboratorio, después de la colecta las muestras fueron almacenadas en un refrigerador a 4°C para su posterior análisis. En la toma, transporte y conservación de cada muestra se tomaron en consideración los criterios establecidos para cada parámetro tanto del manual (Alfaro *et al.*, 2010; AWWA, 2005) (Tabla 6), como de la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1980^a).

VI.1.2.5. Toma de muestra para coliformes fecales

Se tomaron 100 mL de muestra de cada uno de los sitios, en bolsas microbiológicas estériles con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ con el fin de inhibir la acción del cloro que pudiera estar presente en la muestra. Estas bolsas se manejaron con precaución para evitar cualquier tipo de contaminación que pudiera afectar los resultados, se tomaron las precauciones debidas para mantener al máximo las condiciones de asepsia. Todas las bolsas se marcarán con la fecha y el sitio de muestreo, se conservaron en una hielera a 4°C, el examen de las muestras se realizó lo más pronto posible dentro de las 24h para evitar proliferación o muerte de las bacterias (DOF, 2006).

VI.1.2.6. Toma de muestra para microplásticos en agua

Se tomó 1L de muestra en botellas de vidrio para cada uno de los sitios de muestreo, las muestras se marcaron con fecha y sitio de muestreo. Se colocaron en una hielera y se mantuvieron a 4°C durante su traslado al laboratorio, después de la colecta las muestras fueron almacenadas en un refrigerador a 4°C para su posterior análisis (González-Saldía, 2019).

VI.1.2.7. Procedimiento general para el análisis de agua

Se realizó la descripción física de las muestras de agua, tomando en cuenta las siguientes características: apariencia, olor, color. Los parámetros temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto (OD) de la muestras se determinaron in situ (AWWA, 2005), como el análisis los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos se realizaron en el laboratorio, de igual manera para la determinación de dureza y alcalinidad total, DBO₅, DQO, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, F⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻, metales pesados por fluorescencia de rayos X. El análisis de coliformes se llevó a cabo mediante la técnica de cuenta en placa, establecida en (DOF, 2006). Las técnicas de análisis que se utilizaron están basadas en la Normatividad Mexicana.

VI.1.2.8. Determinación de elementos traza

Las determinaciones de los elementos traza se realizaron por espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (por sus siglas en ingles ICP-MS), modelo ICAP Qc de la marca thermo Scientific, en el laboratorio ICP-MS del instituto de Geofísica de la UNAM. El instrumento fue optimizado previamente al análisis de las muestras, se realizó una curva de calibración con 14 puntos con la solución multielemental certificada de la marca High Purity Standards (QCS-26, 100 mg/L).

VI.1.2.9. Determinación de microplásticos

El método consiste en la filtración de sólidos obtenidos a través de tamices de 5.6 mm y/o 0.3 mm para aislar el material sólido del tamaño apropiado (menor a 5 micras). El material tamizado se seca para determinar la masa de sólidos en la muestra. Los sólidos se someten a oxidación húmeda con peróxido (WPO) en presencia de un catalizador de Fe (II) para digerir materia orgánica lábil. Los plásticos permanecen inalterables. La mezcla de WPO se somete a separación por densidad en NaCl_{aq} 5M ($d = 1.15\text{g/mL}$) para aislar los residuos plásticos por flotación. Los sólidos flotantes se separan de los más densos sin digerir en un separador de densidad. Los plásticos flotantes se recogen en el separador de densidad utilizando un filtro personalizado de 0.3 mm, secado a 40 °C, posteriormente se inspeccionan visualmente en un microscopio a 40x (NOAA, 2015).

VI.1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VI.1.3.1. Parámetros fisicoquímicos en agua

El primer parámetro de campo medido fue la temperatura, va en función de las condiciones climáticas o temperaturas ambiente de la zona, la temperatura más alta fue la del punto 10 en las tres colectas, esto se debe a la hora en que se realizó la colecta, corroborándose que en el primer sitio se registran temperaturas bajas y conforme va pasando las horas, el sol comienza a salir por ende van aumentando las temperaturas de manera gradual, también se observan temperaturas más altas en la última colecta del mes de abril que es considerada temporada de estiaje a diferencia de la temporada de precipitación pluvial en donde la temperatura de la zona era más fría.

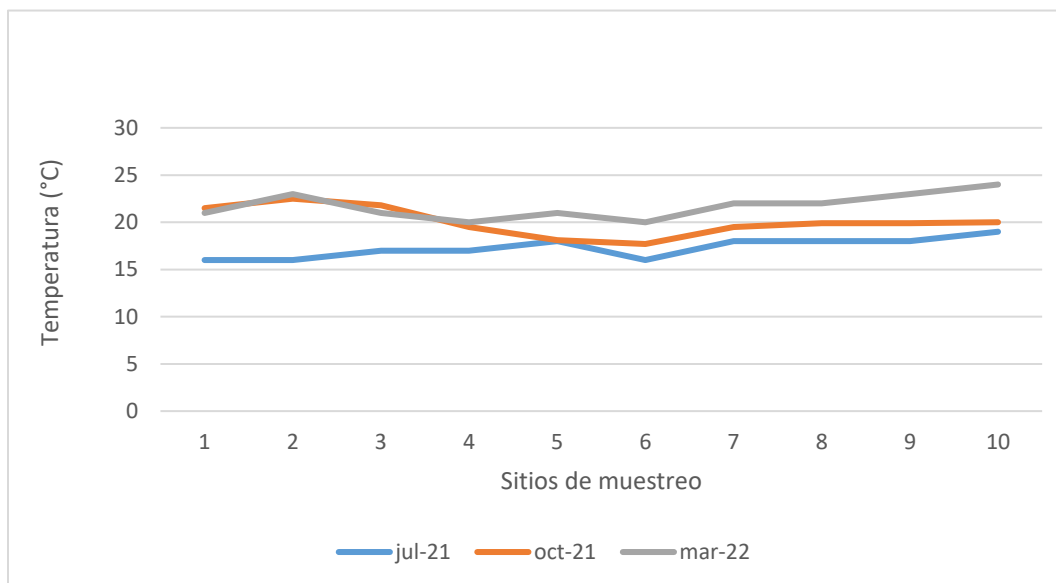


Figura 2. Valores de temperatura (°C) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

El siguiente parámetro medido fue el pH, el cual juega un papel muy importante en diversos procesos químicos y biológicos de las aguas superficiales. Se encuentra relacionado con la mineralización elevada del agua, favoreciendo la presencia de los iones bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, la ausencia del ácido carbónico y el incremento de la alcalinidad del agua. En la Figura 3 se muestran los pH de los sitios en las tres colectas, se observa que en las colectas de precipitación pluvial es ligeramente alcalino por lo que sobrepasaron el intervalo (6.5 a 8.5), solo en el punto 5 se ubica dentro del rango, esto puede deberse a que como es temporada de precipitación pluvial el desgaste de rocas con la lluvia es acarreados los carbonatos y bicarbonatos al agua del lago y así alcalinizar el pH. Sin embargo, en la temporada de estiaje aún sigue siendo alcalino, pero ya no sobre pasa el intervalo a excepción del punto 8. Notándose en las tres colectas que del punto 7 en adelante se incrementan más los pH ya que en esta zona se encuentran los plantíos de aguacate, y por el uso de fertilizantes y plaguicidas hacen que se incremente un poco el pH a diferencias de los primeros puntos de muestreo.

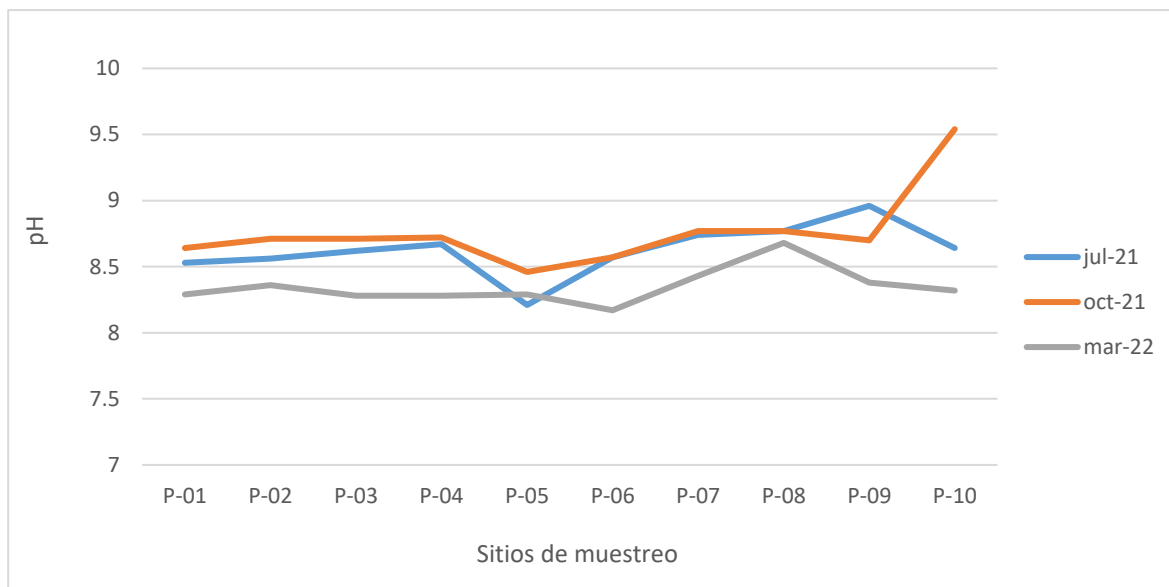


Figura 3. Valores de pH de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

La conductividad eléctrica está representada en la Figura 4. La conductividad eléctrica, explica la capacidad del agua de conducir una corriente eléctrica, midiendo los iones libres existentes, por lo que esta medida representa las concentraciones de los minerales disueltos en el agua se puede observar más o menos similar en todos los puntos, más sin embargo el muestreo del mes de julio en el punto 5 se observa un incremento muy significativo esto se debe a que es ahí la descarga del principal afluente que es el río el silencio y en ese mes es considerado de los más lluviosos y por consiguiente acarrea todos los minerales que se encuentra a su paso, a diferencia de las otras dos colectas se comportó de manera similar en cada uno de los puntos muestreados, en la temporada de estiaje que fue en el mes de marzo incremento un poco la conductividad esto se debe a que no hay agua de lluvia con la cual se puedan diluir.

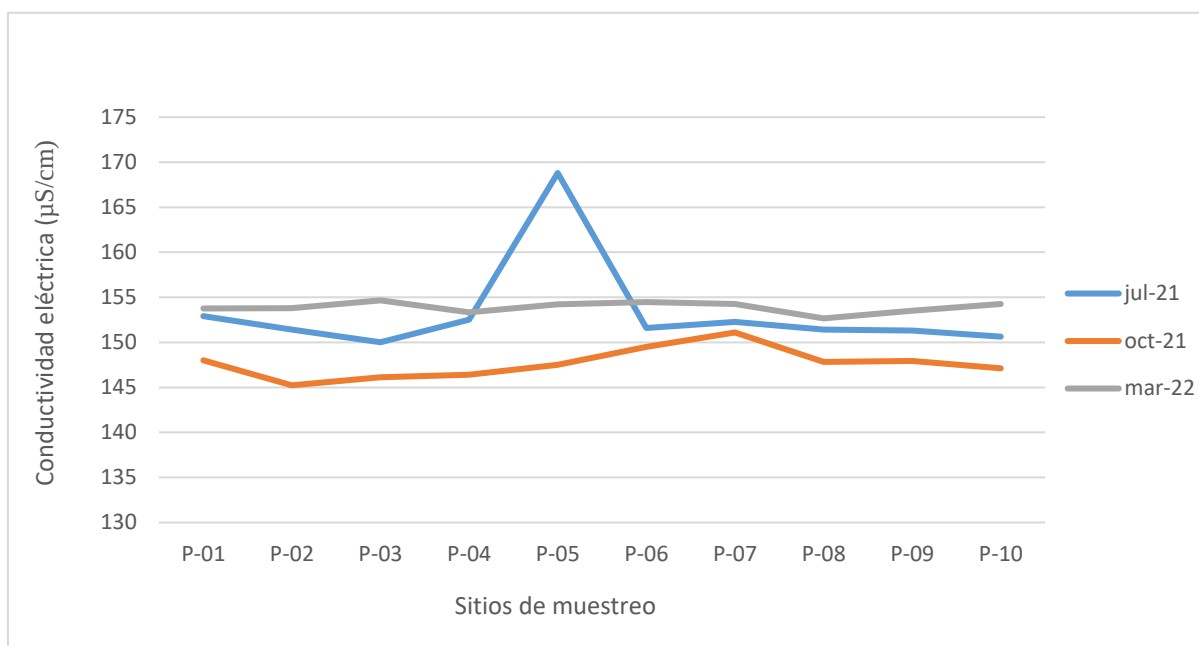


Figura 4. Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

El oxígeno es el gas más importante en el agua e indispensable para mantener las formas de vida, en los cuerpos de agua puede presentar cambios debido a la variación de temperatura, la mineralización del agua, el contenido de materia orgánica, así como también por procesos biológicos que se llevan a cabo entre los que se encuentran la fotosíntesis, la descomposición de la materia carbonosa o nitrogenada, la respiración de los organismos acuáticos, etc. Se puede observar en la Figura 5 que el oxígeno en la colecta del mes de marzo correspondiente a la temporada de estiaje se registraron menores concentraciones a diferencia de las concentraciones obtenidas en la temporada de precipitación pluvial, ya que la temperatura afecta la solubilidad de los gases.

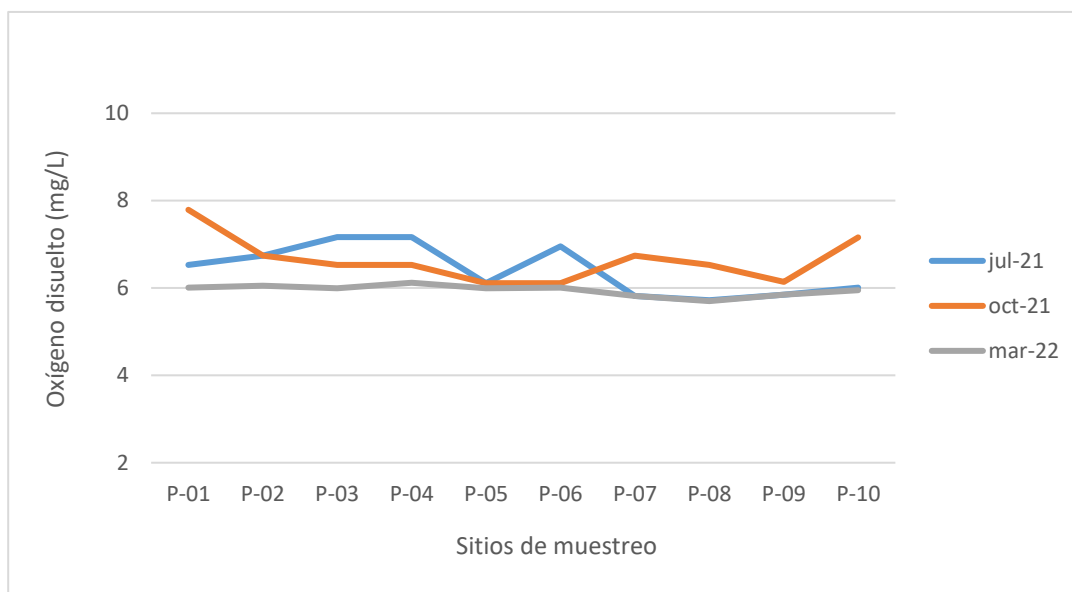


Figura 5. Valores de oxígeno disuelto (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

Se puede apreciar en casi todos los puntos del lago la relación inversa que existe entre las concentraciones de oxígeno disuelto y DQO (Figuras 5 y 7). De la misma manera, se aprecia la relación entre DQO y DBO₅ (Figuras 6) observándose que en todos los puntos del lago la DQO es siempre mayor a la DBO₅, debido a que la primera representa la capacidad de oxidación tanto de compuestos biodegradables como no biodegradables. De acuerdo con la clasificación de calidad del agua de CONAGUA en DQO ($20 < \text{DQO} < 40$) nos indica que es de calidad aceptable con indicio de contaminación y DBO₅ ($3 < \text{DBO}_5$) es de buena calidad con bajo contenido de materia orgánica biodegradable.

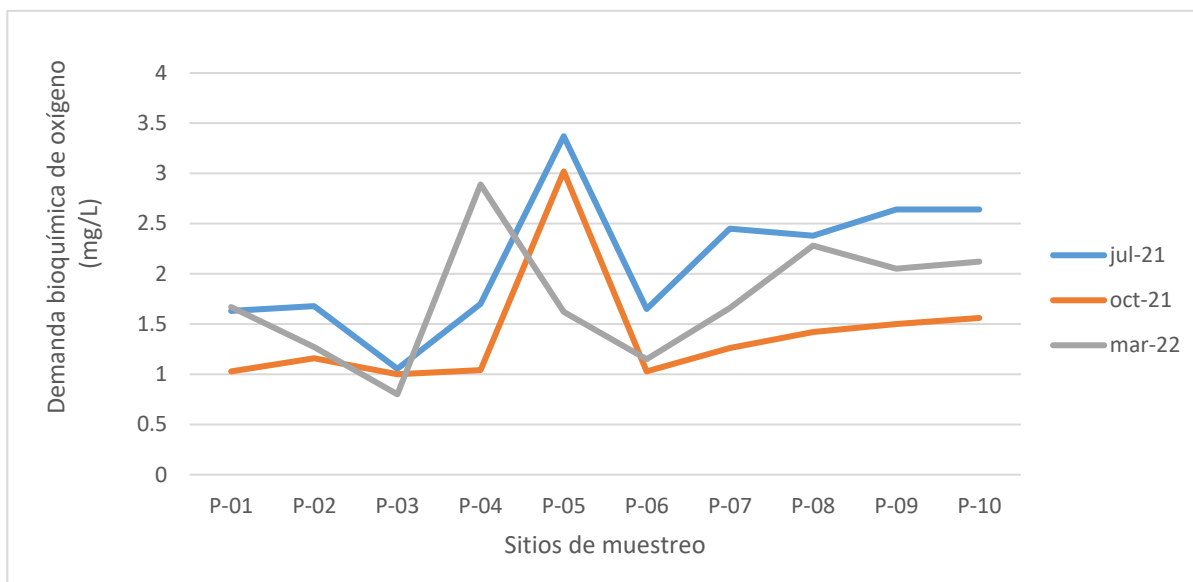


Figura 6. Valores de DBO_5 (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén .

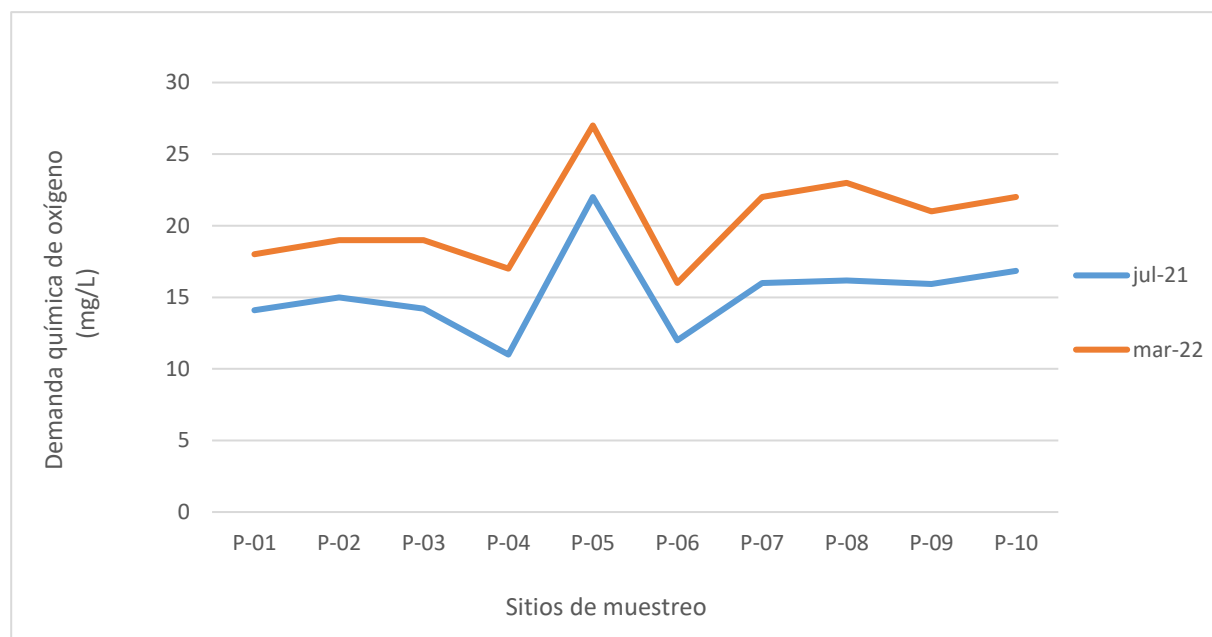


Figura 7. Valores de DQO (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén .

Los sólidos totales (ST) engloban a los SDT y SST. Los sólidos disueltos totales (SDT) miden la cantidad de sustancias disueltas en el agua, sean o no volátiles, y están relacionadas directamente con la conductividad eléctrica y la dureza, es decir, entre mayor sea la conductividad eléctrica de una sustancia, mayor será su dureza, por lo que ésta contendrá una mayor concentración de sólidos disueltos o minerales. Observándose en la Figura 8, que hay más concentración de sólidos en la temporada de precipitación pluvial en especial en el punto 5 ya que la lluvia promueve y escurre hacia los cuerpos de agua todo lo que se encuentra a su paso, aparte de que es un río y lleva un cauce, arrastra muchos sólidos suspendidos que al mismo tiempo le confieren turbiedad y color al agua, lo cual se observa en la Figura 9.

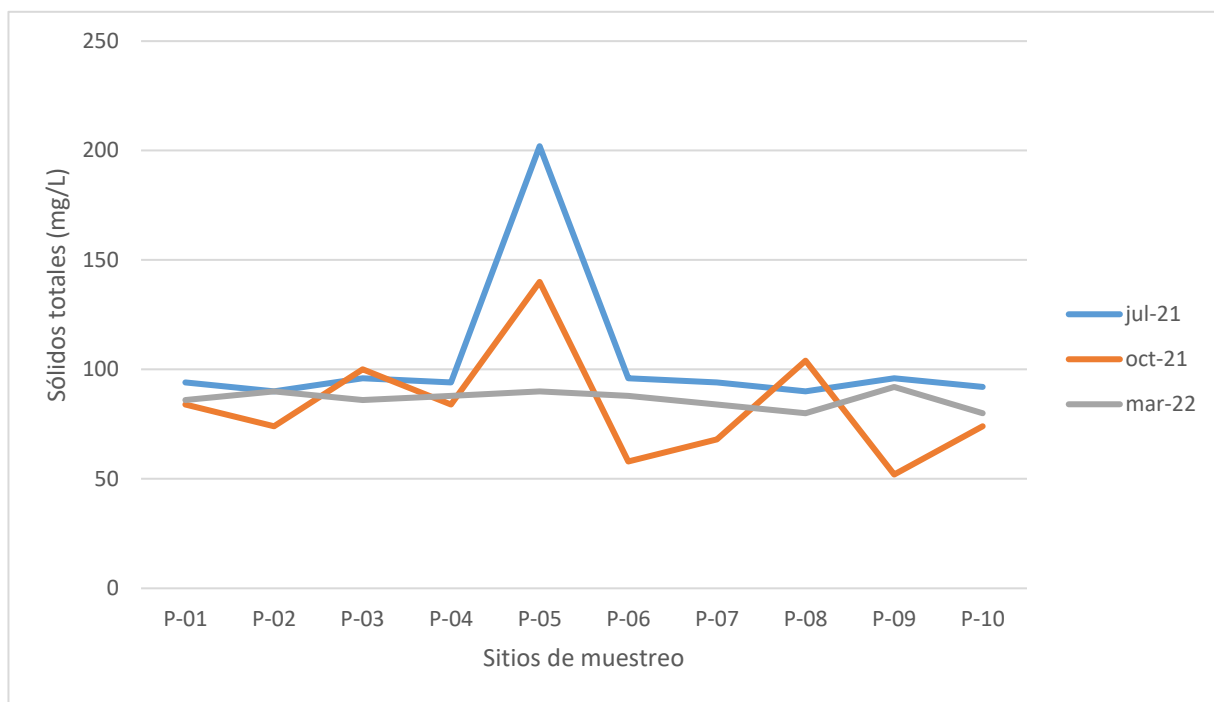


Figura 8. Valores de sólidos totales (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

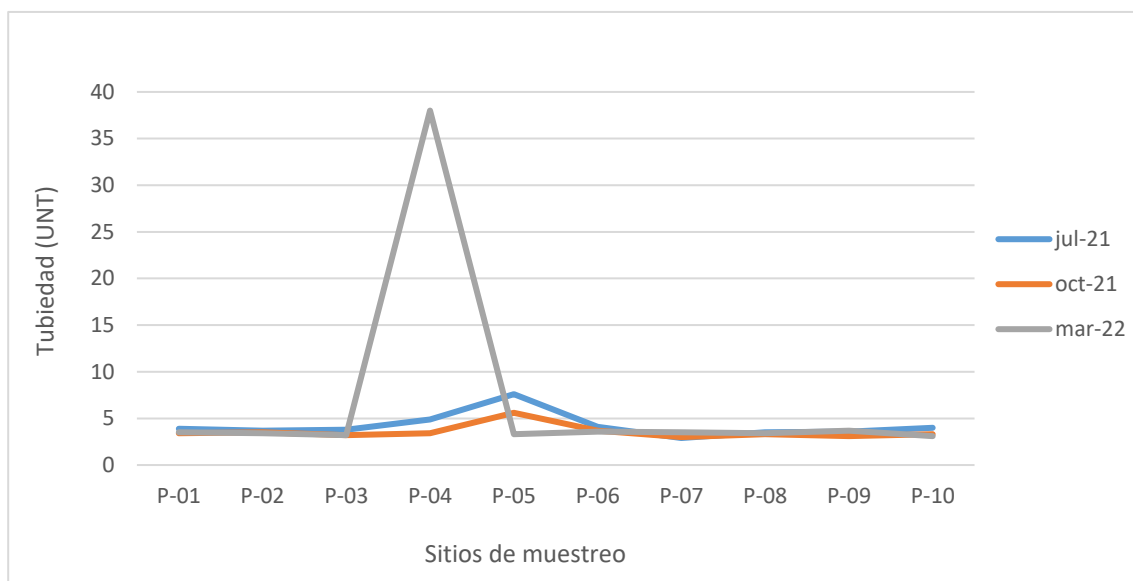


Figura 9. Valores de turbiedad (UNT) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

La dureza total es el parámetro que representa la concentración total del calcio y magnesio en el agua expresados como CaCO_3 (DOF, 2001). En este parámetro (Figura 10), se observa que el mayor incremento en todos los sitios muestreados fue en la tercera colecta ya es un parámetro que está directamente relacionado con la conductividad eléctrica. Comportándose de manera muy similar en la primer y segunda colecta correspondiente a la temporada de precipitación pluvial.

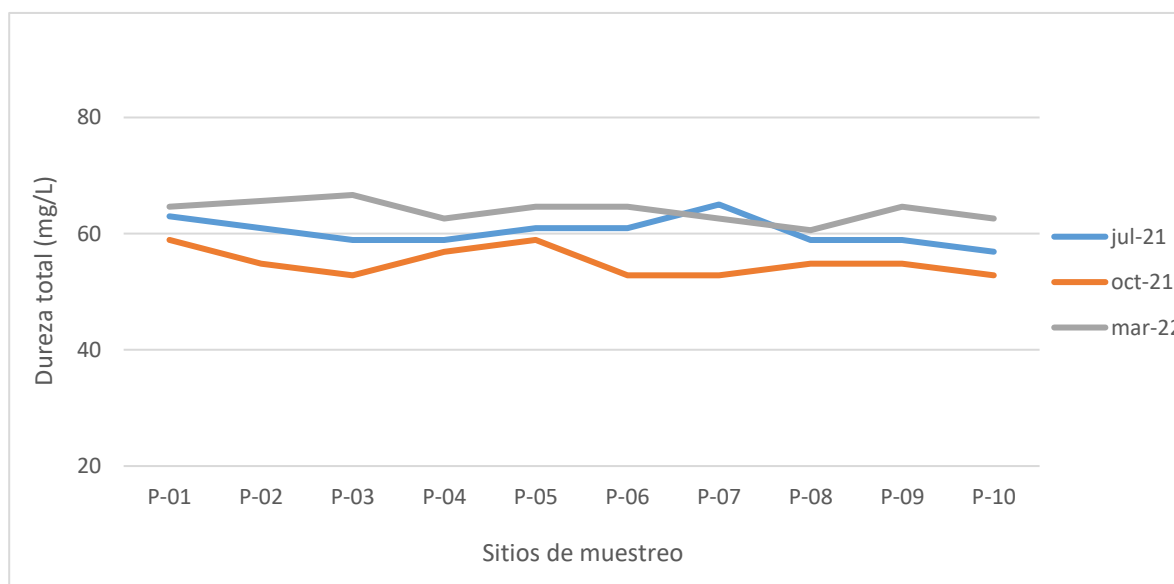


Figura 10. Valores de dureza (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

La alcalinidad total (Figura 11), tiene una relación directa con el valor de pH para saber que especies están interactuando en la alcalinidad carbonatada o no carbonatada, en el caso de nuestros resultados se observa que en la primer colecta el punto 5 es el que presento mayor alcalinidad, a diferencia de las otras dos colectas que se comportaron de manera muy similar en cada uno de los sitios, de igual manera se encontró en mayor concentración los bicarbonatos y apenas en formación en algunos de los puntos de carbonatos, a diferencia de la tercer temporada, que ahí la alcalinidad está completamente dada por especies bicarbonatadas. En donde ambos parámetros tienen un carácter natural correspondiente a la dilución de rocas básicas carbonatadas en mayor parte y en una menor parte es la dilución proveniente de alúmino-silicatos que aportan los cationes metálicos, así como también a los carbonatos y bicarbonatos. En estos 10 puntos de muestreo salieron más altos los carbonatos y bicarbonatos que el contenido de cationes metálicos divalentes por lo que se puede considerar agua blanda apta para uso y consumo humano dentro del intervalo permisible de la NOM-127-SSA1-1994.

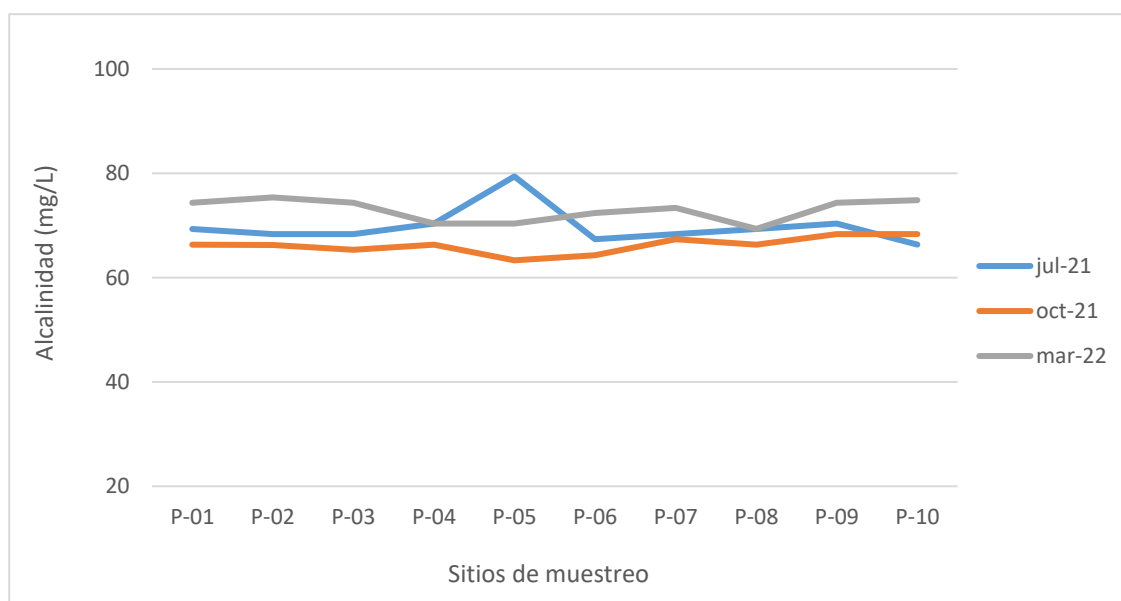


Figura 11. Valores de alcalinidad total (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

Los nitratos se representan en la Figura 12, la cual nos muestra que en la temporada de precipitación pluvial el sitio donde salió más elevado en los dos muestreos es el punto 5, 0.095 mg/L y 0.061 mg/L, sin embargo en el muestreo correspondiente a la temporada de estiaje se elevaron las concentraciones de manera significativa en cada sitio, esto puede deberse a que como ya no temporada de lluvia no se diluye este parámetro, se oxidó de amoniacal a nitratos es por eso que encontramos en mayor concentración la forma de nitratos que la forma de amoniacal que se representa en la figura 13, corroborándose que en todos los sitios muestreados el valor fue el más bajo de 0.058 mg/L.

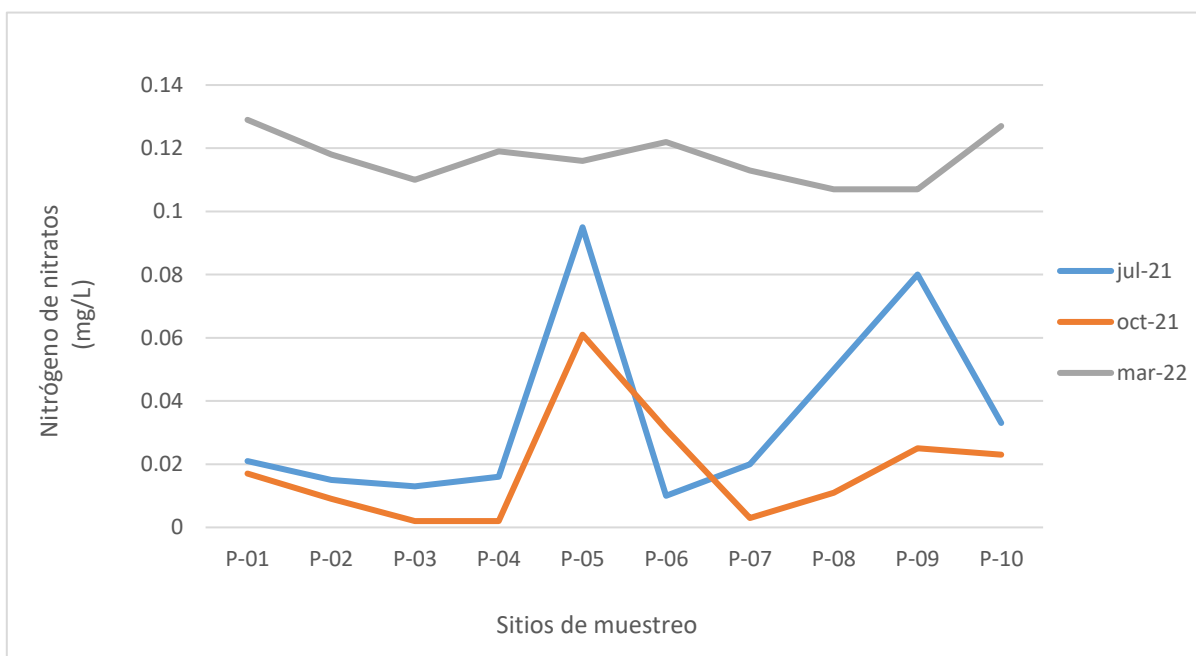


Figura 12. Valores de nitrógeno de nitratos (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

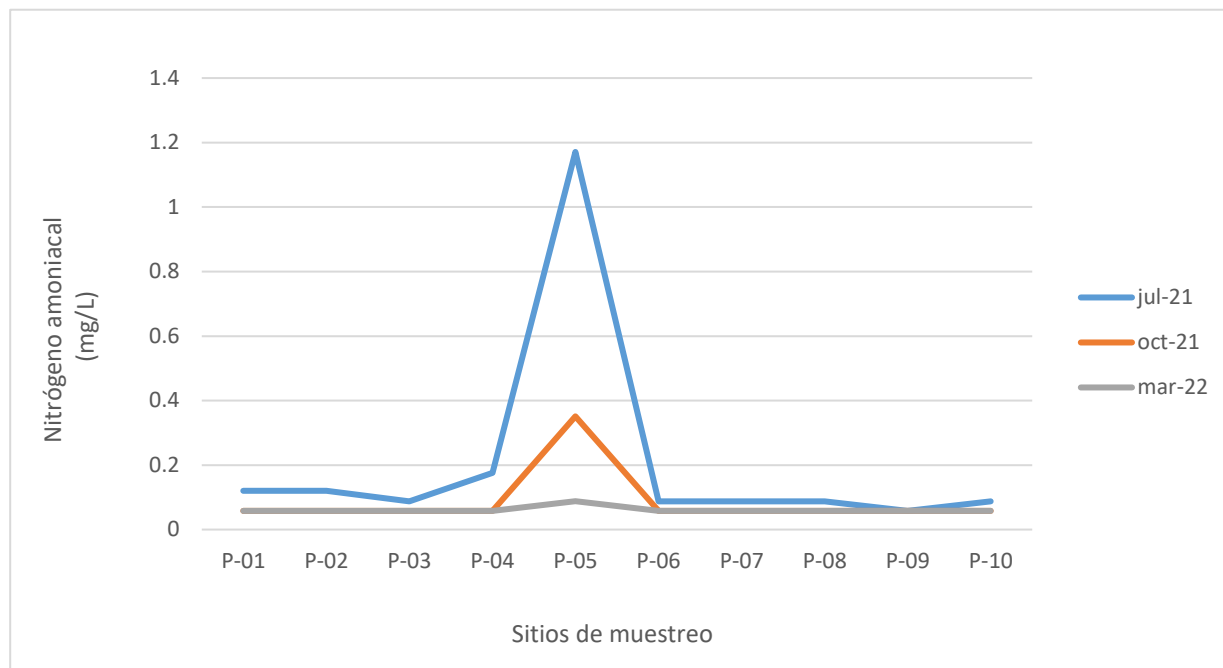


Figura 13. Valores de nitrógeno amoniacal (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

Los fosfatos son nutrientes esenciales para las plantas acuáticas causando la eutrofización. En la Figura 14, se observa que la mayor concentración en todos los sitios (0.1 mg/L) fue correspondiente a la tercer colecta de temporada de estiaje, mientras que en la primer colecta y segunda colecta el valor más alto fue 0.087 mg/L y 0.032 mg/L correspondiente al punto 7; cabe mencionar que en esta zona se encuentran los plantíos de aguacate, que podrían ser contribuyentes al aporte de fosfatos a partir de los fertilizantes y plaguicidas usados para este fruto.

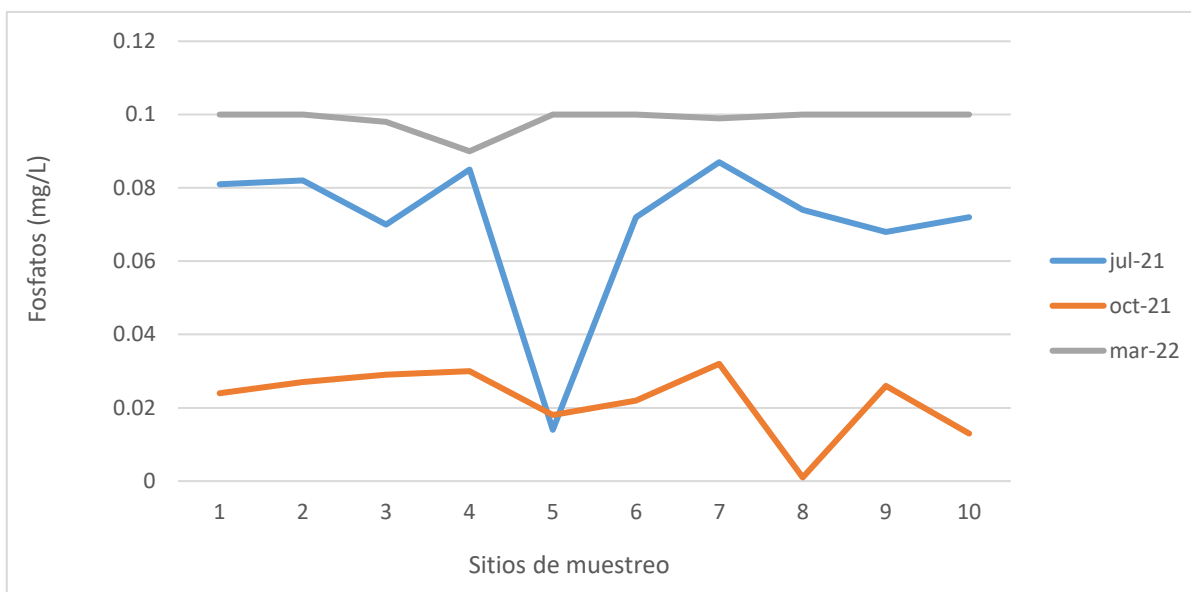


Figura 14. Valores de fosfatos (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

Los sulfatos proceden fundamentalmente de los procesos de disolución de yesos ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sin olvidar las cantidades procedentes de la oxidación bacteriana de sulfuros. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 15, en donde hay una tendencia un poco similar en la temporada de precipitación comprobándose que como es tiempo de lluvias hay disolución de las rocas y tienden a incrementar este parámetro y en la tercera colecta en todos los sitios muestreados disminuyeron ya que es la temporada de estiaje por ende no hay lluvia y al no haber lluvia no hay dilución de las rocas.

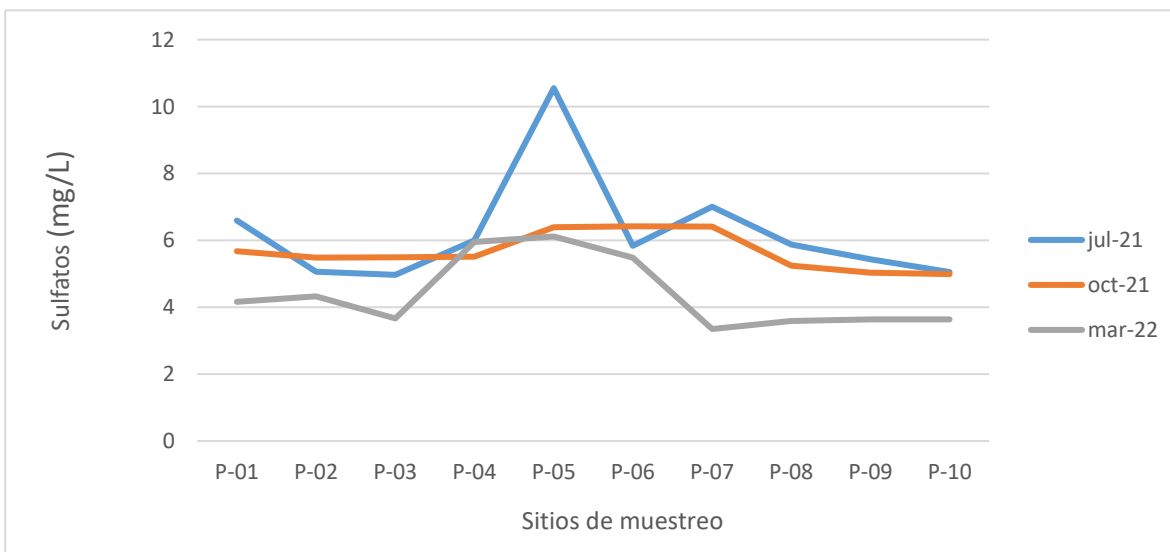


Figura 15. Valores de sulfatos (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

VI.1.3.1.2. Diagramas de Piper y Schöeller

Estos diagramas hidroquímicos fueron elaborados con ayuda del software AquaChem 2014.2. Las Figuras 1, 2, 3 y 4 (Anexo A), representan los tipos de agua para los 10 sitios de muestreo durante las dos campañas realizadas una para la temporada de precipitación pluvial y otra para la temporada de estiaje, donde podemos observar que todos los sitios de muestreo tienen la característica de ser un agua bicarbonatada cálcica.

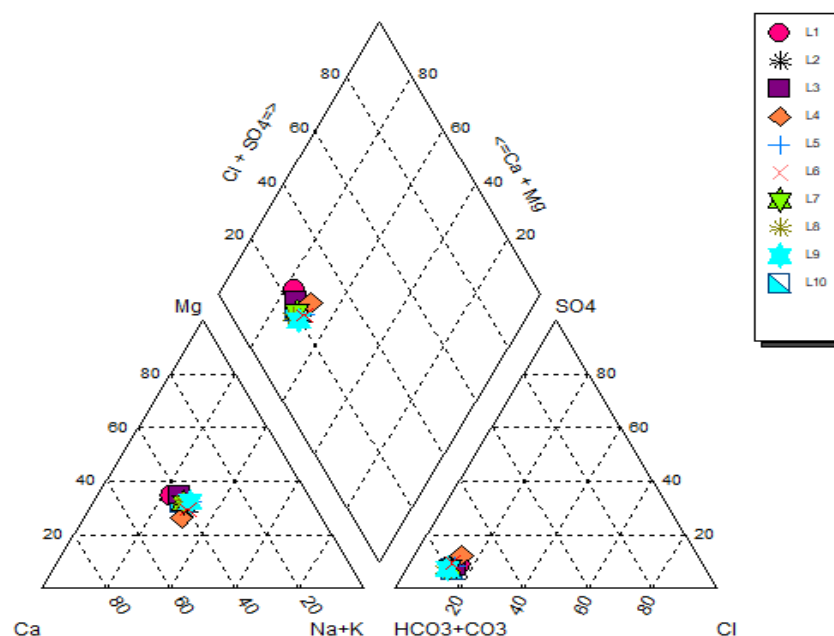


Figura 16. Diagrama de Piper correspondiente al muestreo del mes de julio 2021 para los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

El tipo de agua encontrado en la zona de estudio en los tres periodos (julio 2021, octubre 2021 y marzo 2022) de muestreo fue la bicarbonatada cálcica y/o magnésica. Esto significa que el tipo de agua encontrada en el lago es de baja mineralización, baja alcalinidad, y con un corto tiempo de permanencia en el acuífero. Todo lo anterior se basa en una regla general, la cual establece que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo

son generalmente las bicarbonatadas, después predominan las sulfatadas, y las aguas con mayor tiempo en el acuífero son las cloruradas. Esta evolución se denomina en la composición catiónica la secuencia análoga sería: Ca^{2+} , Mg^{2+} y al final el Na^+ (Custodio et al., 1996).

El diagrama de Schöeller es una representación de los 6 iones mayoritarios en meq/L, que plasma el comportamiento de los mismos en los 10 sitios de muestreo del lago de Zirahuén. Este esquema tiene la característica de ser de fácil visualización para encontrar características típicas de los sitios de estudio con respecto a sus concentraciones de iones mayoritarios. Se puede observar que la tendencia de los meq/L de estos sitios es muy similar en todos sus componentes mayoritarios, destacando que los iones HCO_3^- y el Ca^{2+} fueron los que presentaron las mayores concentraciones, mientras que el anión SO_4^{2-} mostró las mínimas concentraciones en la mayoría de los sitios estudiados.

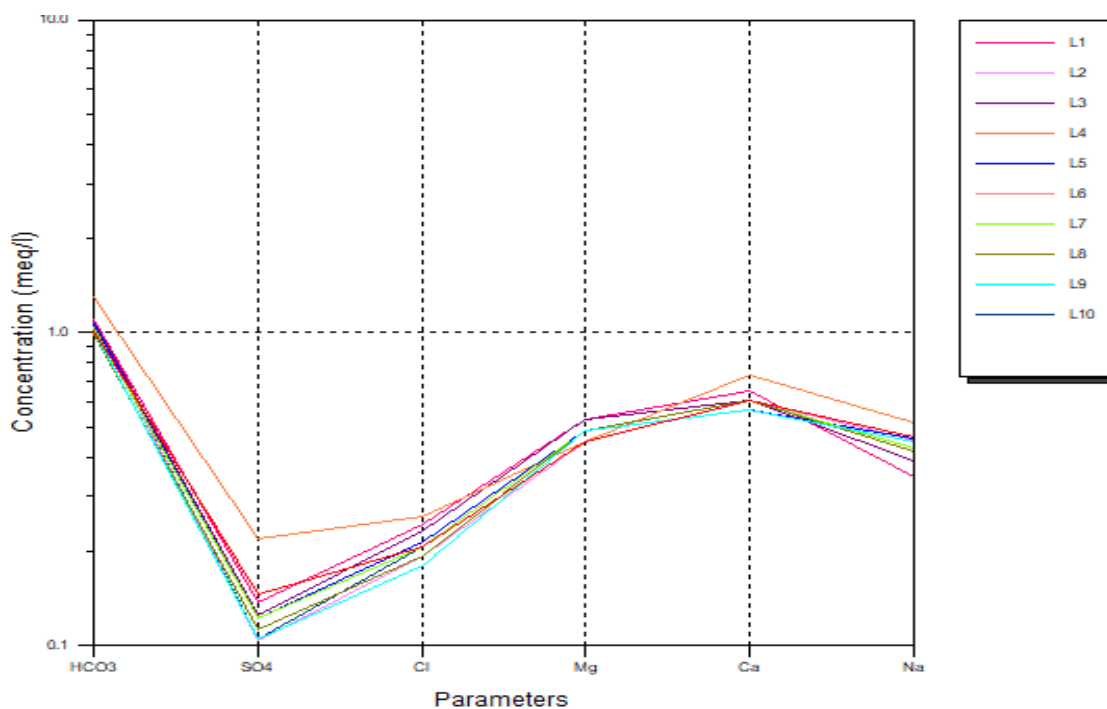


Figura 17. Diagrama de Schöeller correspondiente al muestreo del mes de julio 2021 para los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

En el segundo muestreo (Figura 1, Anexo A), correspondiente al mes de octubre destacan los iones HCO_3^- y el Mg^{2+} para los primeros sitios, en el caso de los sitios 8 y 9 es el catión Ca^{2+} el que representa la mayor concentración con respecto a los otros, mientras que el anión SO_4^{2-} mostró las mínimas concentraciones en la mayoría de los sitios estudiados.

En el tercer muestreo (Figura 2, ver anexo A), correspondiente al mes de marzo de 2022 en la temporada de estiaje, nuevamente destacan los iones HCO_3^- , el Ca^{2+} , Mg^{2+} para todos los sitios, mientras que el anión SO_4^{2-} mostró las mínimas concentraciones en la mayoría de los sitios estudiados con respecto a los cloruros.

VI.1.3.2. Elementos traza

El resultado obtenido sobre elementos traza en agua determinados por el método de espectrofotometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) se muestran en las Figuras 18 a 23. Estos resultados, fueron comparados con la norma NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION". Los límites de detección del aparato en mg/L son: Fe = 0.00051 mg/L, Zn = 0.000242 mg/L, Cu = 0.000248 mg/L, Pb = 0.000009 mg/L, Ni = 0.00016 mg/L, Cr = 0.000024 mg/L.

En la Figura 18 se presenta el hierro, donde parte de los resultados indican que las concentraciones fueron menores al límite de detección del aparato (0.00051 mg/L) debido a los valores de pH en el medio los cuales favorecen la precipitación de este elemento. se observa que en el muestreo realizado en octubre (precipitación pluvial) en el sitio 5 se incrementa la concentración como ya es bien sabido es la entrada del río el silencio al lago. Pero no sobrepasa el límite máximo permisible 0.31 mg/L de la NOM-127-SSA1-1994, agua uso y consumo humano.

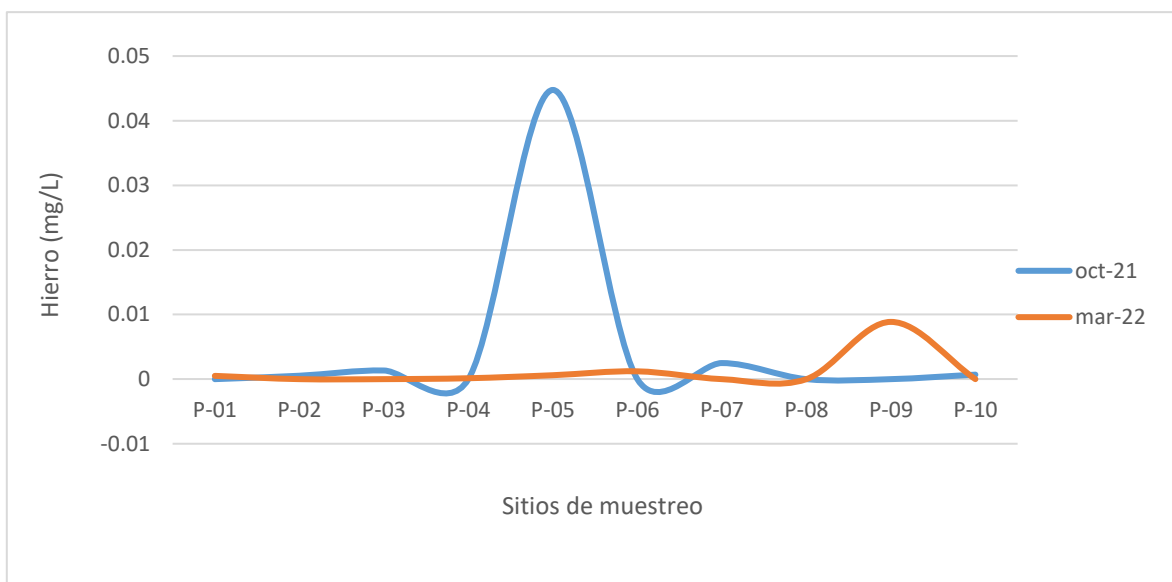


Figura 18. Concentraciones de Fe (mg/L) determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.

El Zn y Cu se pueden observar en las Figuras 19 y 20, Zn presentan la concentración más alta en el sitio 2 en octubre (lluvias) y en el sitio 3 en marzo (estiaje) con respecto a los demás sitios que estuvieron por debajo del límite de detección, Cu en los diez sitios en ambas temporadas estuvieron por debajo del límite de detección, Los límites de detección del aparato en mg/L son: Zn = 0.000242 mg/L y Cu = 0.000248 mg/L. Es pertinente mencionar que en este caso del Cu y el Zn ninguno sobrepasa los LMP establecidos por la NOM-127-SSA1-1994

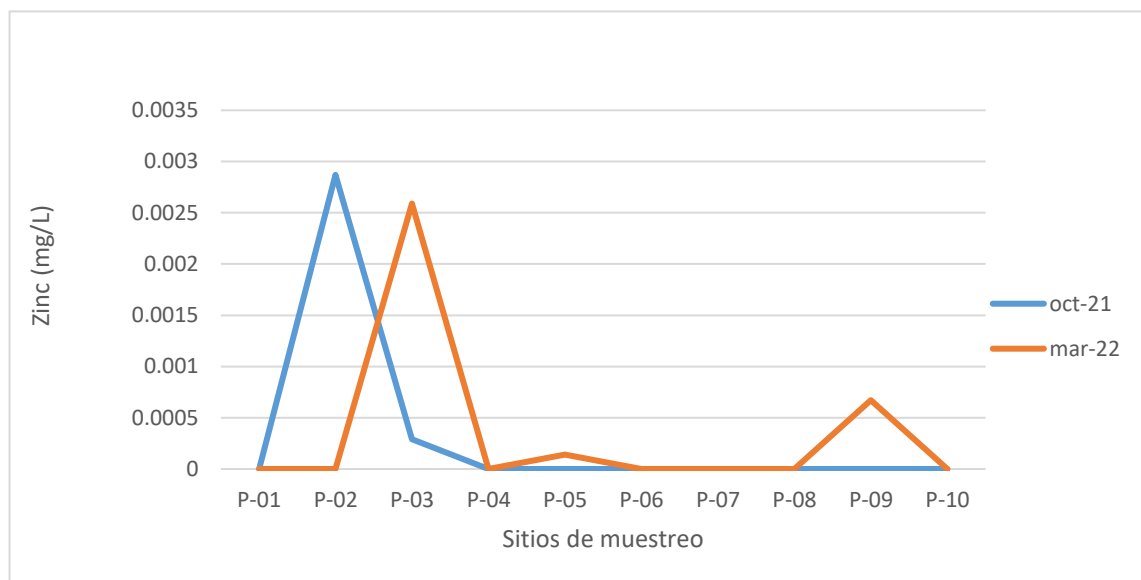


Figura 19. Concentraciones de Zn en mg/L determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.



Figura 20. Concentraciones de Cu (mg/L) determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.

El Pb se presenta en la Figura 21, la mayor parte de los muestreos indican concentraciones menores al límite de detección del aparato y solo se detectó la concentración más alta en el sitio 10 (0.06 mg/L) en marzo (estiaje) sobrepasando el LMP de la NOM-127-SSA1-1994, el cual es de 0.01 mg/L. El límite de detección del aparato para Pb fue de 0.000009 en mg/L.

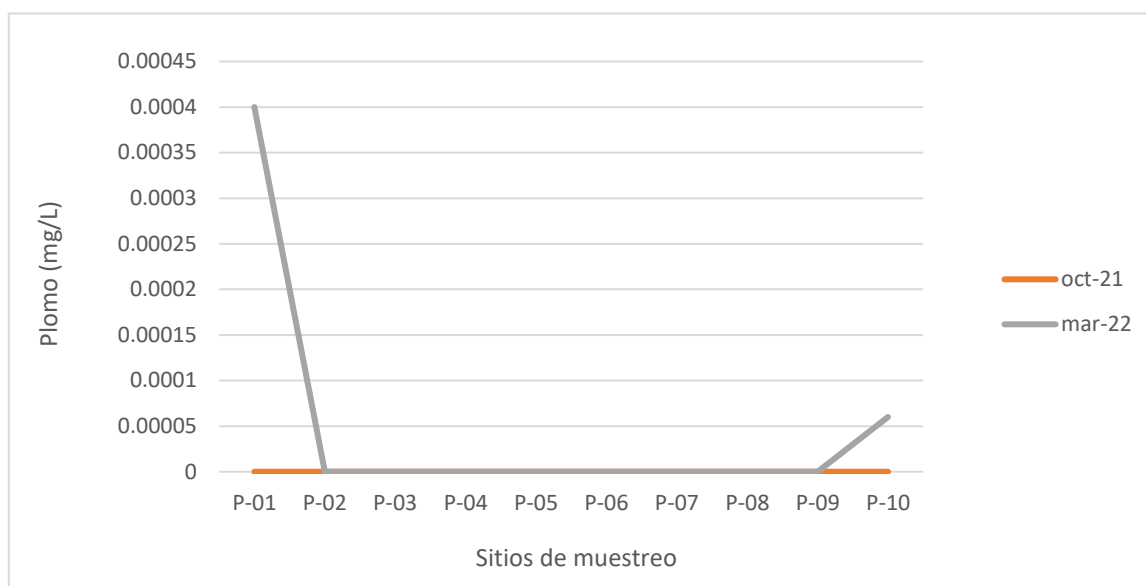


Figura 21. Concentraciones de Pb (mg/L) determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.

En la Figura 22. los Cr indican que la mayor parte de los resultados fueron menores al límite de detección del aparato, durante los muestreos que cubren las dos temporadas, el Cr presentó las concentraciones más altas en el muestreo de marzo (estiaje) en el sitio 3. El límite de detección del aparato fue 0.000024 mg/L para Cr, cabe mencionar que ningún sitio sobrepasa LMP de la NOM-127-SSA1-1994 que es de 0.05 mg/L.

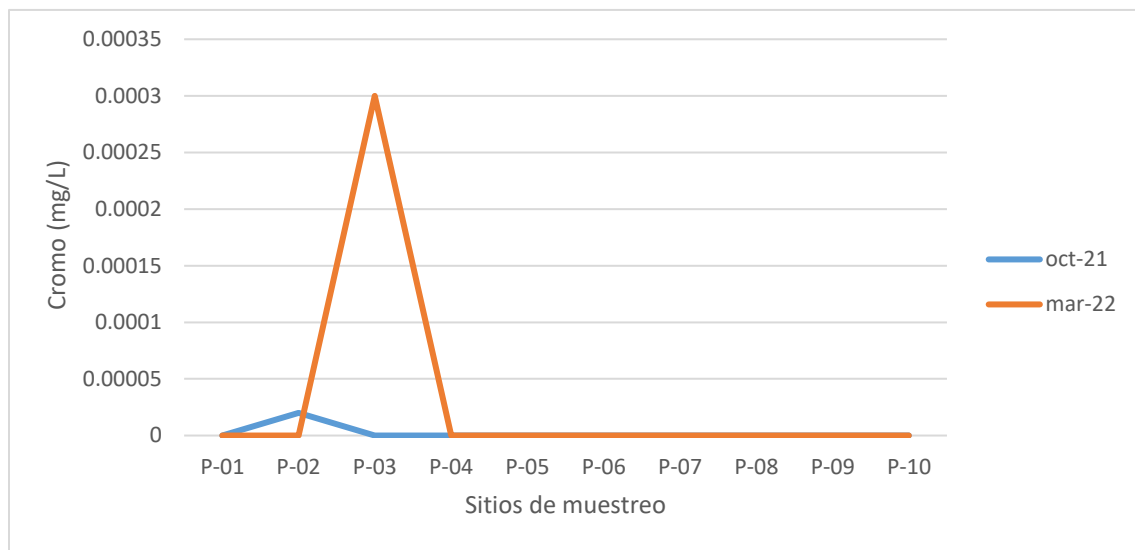


Figura 22. Concentraciones de Cr en mg/L determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.

En la Figura 23 el Ni en la mayor parte de los resultados fue menores al límite de detección del aparato, durante los muestreos que cubren las dos temporadas, El límite de detección del aparato fue 0.00016 mg/L, ninguno sobre pasa el límite máximo permisible de la NOM-127-SSA1-1994 que es de 0.07 mg/L.



Figura 23. Concentraciones de Ni (mg/L) determinadas en agua por ICP-MS en el lago de Zirahuén.

VI.1.3.3. Microplásticos

En la Figura 24 se muestran los resultados obtenidos de la identificación de microplásticos de las tres colectas realizadas. Viendo que se comporta de manera más homogénea en todos los sitios en la última colecta a diferencia de las colectas que se realizaron en la temporada de precipitación pluvial esto se atribuye a que es temporada de lluvia y acarrea los plásticos al lago o si estos estuvieran sedimentados con el movimiento tienden a suspenderse y por eso diferencia de concentración en ciertos puntos del lago.

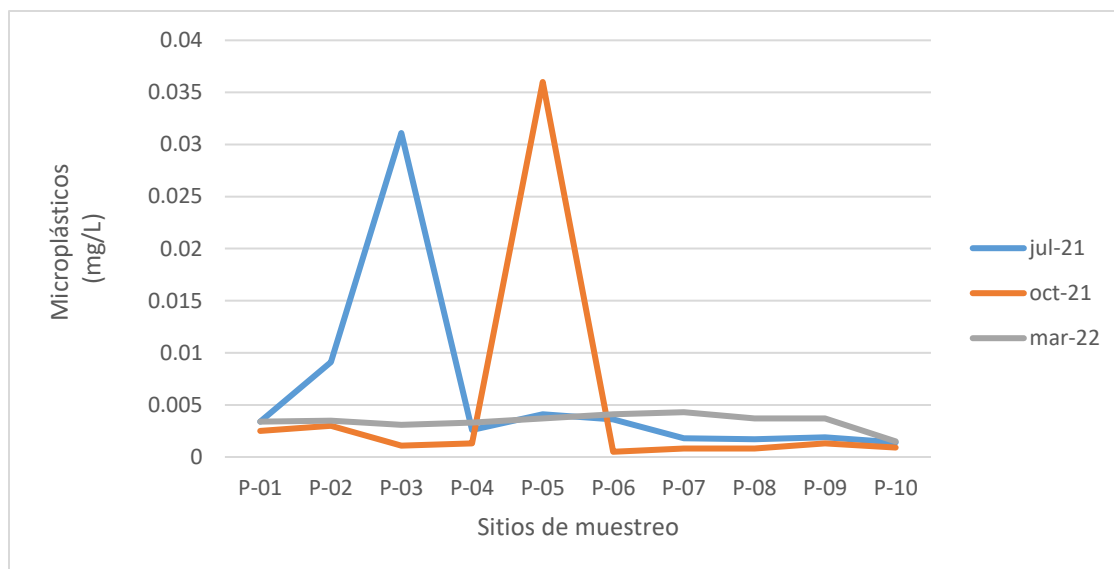


Figura 24. Concentraciones de microplásticos (mg/L) de los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

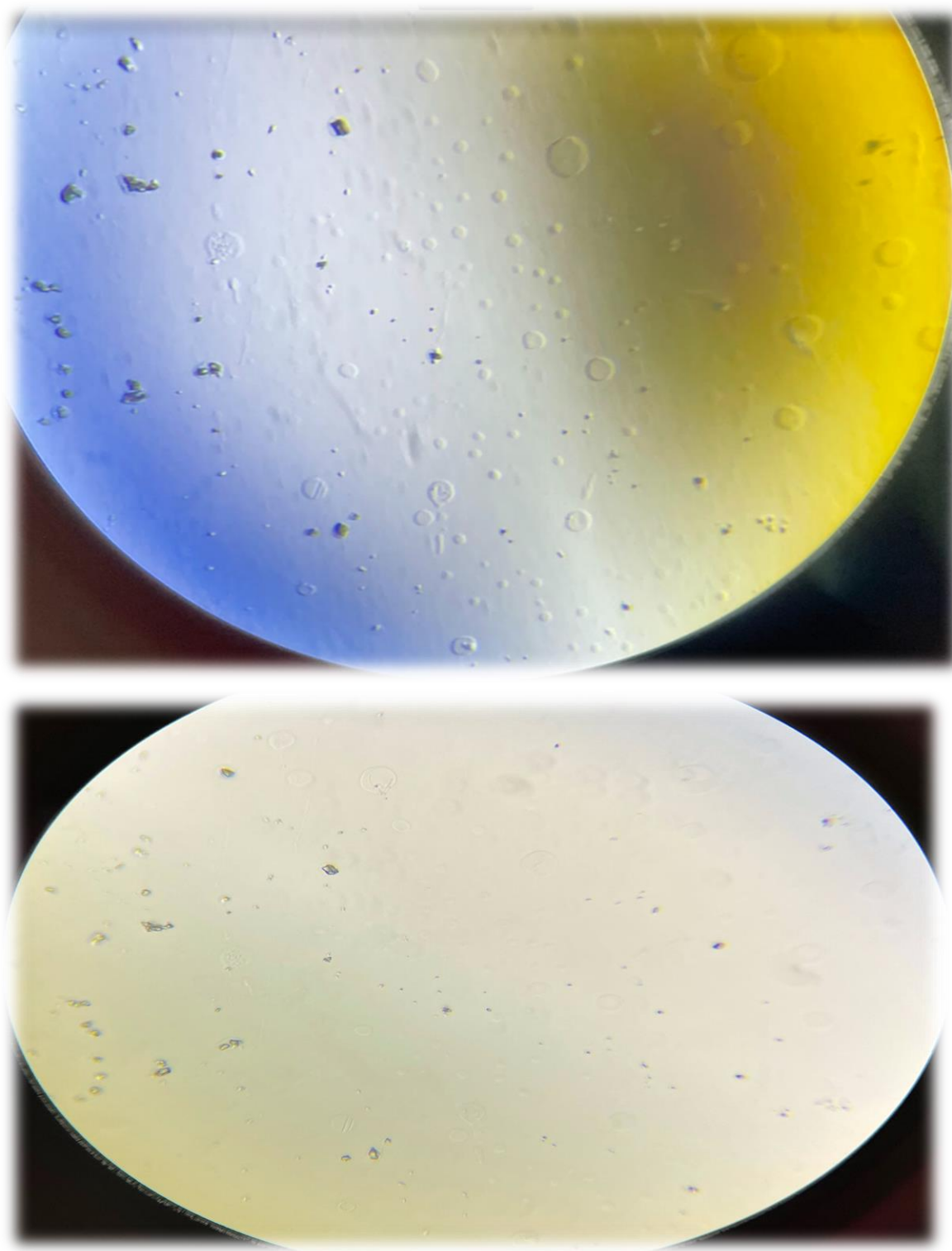


Figura 25. Imagen a 40x de los microplásticos en las muestras del lago de Zirahuén.

VI.1.4. CONCLUSIONES

Actualmente el agua lago de Zirahuén en cuanto a los elementos traza se encuentra dentro de los límites máximos permisibles que marca la NOM-127-SSA1-1994, por lo que no se corre riesgo por estos y la calidad del lago no se ve afectada.

En cuanto a los parámetros bacteriológicos obtuvimos presencia de coliformes fecales en los 10 sitios que se muestrearon, por lo que representa un riesgo para la salud la ingesta de esta agua sin llevar algún tratamiento de desinfección previo.

Con base en el tipo de agua observado (Ca^{2+} - HCO_3^-), se concluye que el agua del lago es un agua joven, lo cual confirma su clasificación como cuerpo de agua oligotrófico.

En cuanto a los resultados de los parámetros fisicoquímicos comparados con la norma NOM-127-SSA1-1994, se encuentran dentro del límite máximo permisible para uso y consumo humano, por lo cual no hay riesgo actual por las concentraciones de estos.

Los sitios 5 y 6 presentaron las máximas concentraciones en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos, por lo tanto, se asume que es la principal entrada de contaminantes al lago, puesto que es la desembocadura del río el silencio.

En cuanto a los microplásticos, se observó presencia de ellos en el agua en todos los sitios muestreados. Al no contar con normas establecidas no se puede dar un diagnóstico claro de su actual peligro o si sobrepasa algún límite máximo permisible, pero aun así se debe poner cuidado para que estos no llegue a presentar un problema a futuro y afecten la calidad del agua debido al uso que le dan a la misma.

VI.1.5. BIBLIOGRAFIA

- Alfaro R. 2010. Estudio de la movilidad y toxicidad de metales pesados y arsénico en agua y sedimentos del lago de Cuitzeo, Michoacán. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México.
- ALFARO, M., & SALAZAR, F. 2005. “Ganadería y contaminación difusa, implicancias para el sur de Chile”. En: *Agricultura Técnica*. Vol. 65(3): 330-340 pp.
- APHA-AWWA-WPCF. (2005). Methods for the examination of water, 19^a Edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF). USA.
- BATES, B., KUNDZEWICZ, Z., & WU, S. 2008. “Climate change and water”. En: *Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat*.
- Bilbao Villena, A. (2015). Desengancharse del plástico. Problemas de un material ubicuo. Madrid: Confederación de ecologistas en acción
- CHAPMAN, D. V. 1996. “Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring”. En: *World Health Organization*
- CISNEROS, J. M., GRAU, J. B., ANTÓN, J. M., DE PRADA, J. D., DEGIOANNI, A. J., CANTERO, A., & ESPAÑA, T. S. D. I. A. 2010. “Evaluación multicriterio de alternativas de ordenamiento territorial utilizando modelos hidrológicos y de erosión para una cuenca representativa del sur de Córdoba”. En: *Valoración de servicios ecosistémicos*, 552-579 pp.
- Custodio, E., Llamas, M., 1996. Hidrología subterránea, 2 ed. ed. Omega.
- DOF, 1980a. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-AA-014-1980. Lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, excluyendo aguas estuarinas y aguas marinas, con el fin de determinar sus características físicas, químicas y tóxicas. Méxic.
- DOF, 2006. NMX-AA-102-SCFI-2006 CALIDAD DEL AGUA – DETECCIÓN Y ENUMERACIÓN DE ORGANISMOS COLIFORMES, ORGANISMOS COLIFORMES

TERMOTOLERANTES Y *Escherichia coli* PRESUNTIVA – MÉTODO DE FILTRACIÓN EN MEMBRANA.

- DOF. 2001g. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-072-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de la dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas –Método de prueba. México.
- DOF. 2001k. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas –Método de prueba. México.
- EPA (1992). Method 3005A. Acid digestion of waters for total recoverable or dissolved metals for analysis by flaa or icp spectroscopy.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Roma.
- Gigault, J., Halle, A., Baudrimont, M., Pascal, P. Y., Gauffre, F., Phi, T. L., . . . Reynaud, S. (2018). Current Opinion: What is a nanoplastic. *Envorimental Pollution*, 1030-1034
- GLEICK, P. H. 1993. “Water in crisis: a guide to the worlds fresh water resources”.
- González Saldía Fernanda E.(2019) “Distribución y abundancia de microplásticos en cuencas Mediterráneas” tesis máster de Ecología , Universidad de Barcelona, España (pp 6-9).
- Manahan S.E. (2007). “*Introducción a la química ambiental*” Ed. Reverté. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. pp 725
- Martin Lara Ma. A., (2008). “*Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados*” Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química pp 347.
- Moshiri Gerald, 1993. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, CRC press Inc
- NOAA 2015. *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments*

- NOVOTNY, V. 1994. "Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution". En: *Van Nostrand-Reinhold Publishers*.
- NOVOTNY, V. 2003. "Water quality: diffuse pollution and watershed management". John Wiley & Sons.
- Ömer A., Melek T.S. , Ayten K.E. (2008). "*Water quality and heavy metal monitoring in water and sediment samples of the Küçükçekmece Lagoon, Turkey*" Springer science, Istanbul, Turkey.
- ORTIZ-PANIAGUA, C.F., GARCÍA, J.O., SANTA-CRUZ, I. 2010. "Caracterización socioeconómica e integración regional de la cuenca del lago de Zirahuén". En: *Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén*, Ortiz-Paniagua y Rendón- López (compiladores). 358 p.
- Ouyang, T.P., Zhu, Z.Y., Kuang, Y.Q., Huang, N.S., Tan, J.J., Guo, G.Z., Gu, L.S. 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. *Environ. Geol.* 49, 733–742.
- Rojo-Nieto, E., & Montoto, T. (2017). Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global . Madrid: Ecologistas en Acción.
- SCHINDLER, D. W. 2012. "The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. Proceedings of the Royal Society". En: *Biological Sciences*. Vol. 279(1746): 4322-4333 pp.
- Sedykh E.M., Starshinova N.P., Bannykh L.N., Ershova E. Yu., Venitsianov E.V. (2000). "*Using Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry and Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry*" *Journal of Analytical Chemistry* 55 (4) pp 385-391.
- SOPHOCLEOUS, M. 2000. "From safe yield to sustainable development of water resources—the Kansas experience". En: *Journal of Hydrology*. Vol. 235(1-2): 27-43 pp.
- Tipping E., Lofts S., Lawlor A.J., (1998). "Modelling the chemical speciation of trace metals in the surface waters of the Humber system". *The Science of the Total Environment* 210/211 63-77.

Toledo Martínez, M. Á. (2019). REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MICRO(NANO)PLÁSTICOS EN EL MEDIO AMBIENTE Y LA BIOTA MARINA. Madrid.

CAPÍTULO 2

VI.2. CAPÍTULO 2

ELEMENTOS TRAZA EN SEDIMENTO DEL LAGO DE ZIRAHUÉN, MICHUACÁN

RESUMEN

En México los lagos son escasos, el Estado de Michoacán posee tres lagos que son parte de los cuerpos de agua más importante del país; Pátzcuaro, Cuitzeo y Zirahuén. Por su parte, el lago de Zirahuén es de los más profundos y jóvenes del país, lo caracteriza su transparencia y belleza no sólo del lago sino también de los densos bosques que lo rodean (Ortiz-Paniagua y Rendón, 2010). Biológicamente es único ya que posee propiedades de lago tropical pero dentro de una altitud elevada e inmerso en bosque templado (Martínez-Almeida y Tavera, 2005); es reservorio de diversas especies endémicas de la zona lacustre de Michoacán y forma parte de la región purhépecha.

El objetivo de este estudio fue determinar la concentración de elementos traza como Cr, Ni, Cu, Zn, Fe y Pb comparándolos con los estándares mexicanos e internacionales. Se recolectaron muestras de sedimento en 10 sitios durante las temporadas de precipitación pluvial y temporada de estiaje, todas las muestras se caracterizaron físicamente y se determinaron las concentraciones de elementos traza Cr, Ni, Cu, Zn y Pb por fluorescencia de rayos X (FRX) en base a los criterios de protección para los sedimentos de agua dulce.

La importancia de analizar los elementos traza radica en que estos resultan dañinos a la salud y el ecosistema debido a su persistencia y toxicidad. Es importante recalcar que existen pocos o nulos estudios de este tipo en el lago de Zirahuén Michoacán y es escasa la información de elementos traza en agua y sedimento en la zona de estudio.

Los sedimentos resultaron de color marrón en su mayoría y con texturas franco arenoso, solo el sitio 5 mostró textura franco limoso y el sitio 8 dio textura arenosa, en la mayoría el pH fue neutro.

En todos los sitios se encontraron grandes concentraciones de los elementos traza sobrepasando los niveles LEL Y SEL recomendados por el NOAA para sedimentos de agua

dulce. El elemento que se presentó en concentraciones mayores en las dos temporadas fue el Fe, esto se atribuye a que es el metal más común en la corteza terrestre.

II. ABSTRACT

In Mexico the lakes are scarce, the state of Michoacán has three lakes that are part of the most important bodies of fresh water in the country; Patzcuaro, Cuitzeo and Zirahuén. For its part, Lake Zirahuén is one of the deepest and youngest in the country, characterized by its transparency and beauty not only of the lake but also of the dense forests that surround it (Ortiz-Paniagua and Rendón, 2010). Biologically it is unique since it has tropical lake properties but within a high altitude and immersed in temperate forest (Martínez-Almeida and Tavera, 2005); It is a reservoir for various endemic species of the lacustrine zone of Michoacán and is part of the Purépecha region.

The objective of this study is to determine the concentration of trace elements such as Cr, Ni, Cu, Zn, Fe and Pb, comparing them with Mexican and international standards. Sediment samples were collected at 10 sites during the rainy season and dry season, all samples were physically characterized and the concentrations of trace elements Cr, Ni, Cu, Zn and Pb were determined by X-ray fluorescence (XRF). based on the protection criteria for freshwater sediments.

The importance of analyzing trace elements is that they are harmful to health and the ecosystem due to their persistence and toxicity. It is important to emphasize that there are few or no studies of this type in Lake Zirahuén, Michoacán, and there is little information on trace elements in water and sediment in the study area.

The sediments were mostly brown in color and with sandy loam textures, only site 5 showed a silt loam texture and site 8 had a sandy texture, in most of them the pH was neutral.

Large concentrations of trace elements were found at all sites, exceeding the NOAA recommended LEL and SEL levels for freshwater sediments. The element that appeared in large quantities in both seasons was Fe, this is attributed to the fact that it is the most common metal in the earth's crust.

VI.2.1. INTRODUCCIÓN

Se denomina sedimento a todo tipo de depósito formado por partículas de naturaleza mineral o biológica transportado por fluidos, especialmente el agua y el aire. Los sedimentos se acumulan en el fondo de un cuerpo de agua y son de gran valor para el estudio de esos ecosistemas, dado que conservan el registro histórico de lo acaecido en el lugar. Las sustancias tóxicas o contaminantes vertidas al agua, tienden a depositarse en el sedimento y, si este se remueve, pueden volver a quedar suspendidas, permaneciendo nuevamente a disposición (Mariani et al, 2008). Además, variaciones de pH, OD, salinidad y de las propiedades redox de las corrientes de agua también pueden provocar movilización de especies químicas acumuladas en los sedimentos, magnificando incluso su efecto tóxico, tal como es el caso de los metales pesados y elementos traza (Herrera et al. 2012), los cuales son considerados entre los contaminantes prioritarios para los sistemas acuáticos, debido a que no son eliminados por procesos naturales como los contaminantes de origen orgánico y pueden incorporarse a las cadenas alimentarias por medio de procesos de bioacumulación, bioconcentración o biomagnificación. Cuando los elementos traza derivados de fuentes naturales o antropogénicas se introducen en un lago, se reparten entre fases acuosas (columna de agua) y fase sólida (sedimentos y partículas en suspensión) (Chunye et al. 2008; Shahet al. 2011). Los metales más tóxicos como Hg, Cd, Pb y As se acumulan en los sedimentos donde pueden transformarse a 10 formas químicas biodisponibles, resuspenderse hacia la columna de agua y producir intoxicaciones crónicas o agudas en los organismos (Tejeda et al, 2005).

Los metales pesados incluyen elementos esenciales y no esenciales que tienen una significancia particular en ecotoxicología, desde que estos son altamente persistentes y todos tienen el potencial para ser tóxicos en organismos vivos (Öztürk *et al.*, 2009). Después de la introducción de trazas de contaminantes metálicos en un río o en un lago, ya sea a través de fuentes naturales o antropogénicas, la partición se realiza entre fases acuosas (columna de agua e intersticial) y fases sólidas (sedimentos, partículas en suspensión y biota) (Chunye *et al.*, 2008). Los oligoelementos pueden ser inmovilizado en el flujo de sedimentos y por lo tanto podrían estar involucrados en la absorción, coprecipitación, y la formación de compuestos (Okafor et al, 2007; Mohiuddin et al, 2010). En ocasiones son co-adsorbidos con

otros elementos como los óxidoshidróxidos de Fe, Mn o pueden estar en la fase particulada (Mwiganga et al, 2005) concentraciones traza de elementos en sedimentos se pueden utilizar para revelar la historia y la intensidad de la contaminación local y regional (Awofolu et al, 2005).

VI.2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

VI.2.2.1. Área de estudio

Zirahuén (en purépecha “lugar de aguas profundas”) se localiza a 21 km de la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán. Se puede admirar su lago del mismo nombre.

El lago de Zirahuén se localiza en la porción centro norte del Estado de Michoacán, dentro de la región hidrológica del Balsas, entre las coordenadas 19°21'14" y 19°29'32" de latitud Norte y 101°30'33" y 101°46'15" de longitud Oeste. El cuerpo lacustre se ubica en la región Oeste de la cuenca a 2,075 msnm y posee una superficie de 10.48 km² ; es un lago monomítico, con estratificación en verano y mezcla en oligotrófico, de tipo endorreico y posee una profundidad máxima de 43 m.

El afluente principal es el río La Palma o El Silencio, clasificado como de cuarto orden y de tipo perenne. Existen otras corrientes intermitentes de segundo y tercer orden en zonas de pendientes poco pronunciadas.

El clima es de tipo Cw (w2)(w) i, templado con lluvias en verano, con proporción de precipitación invernal inferior a 5%; la temperatura media anual es de 15.7°C y el promedio de precipitación anual de 1182.6 mm.

En torno al Lago existen tres muelles, el “muelle general”, que es propiedad mayormente de la Comunidad Agraria y pequeños propietarios de Zirahuén y, en menor medida, de integrantes de la Comunidad Indígena. Otro muelle es propiedad de la empresa Impulsora

Zirahuén S.A. de C.V, propiedad del señor Guillermo Arreola; por último, el “Muelle Cedritos” es propiedad del señor Heliodoro García (Sandoval-Hernández, 2006).

VI.2.2.2. Plan de muestreo

VI.2.2.2.1. Selección de los sitios de muestreo

Se seleccionaron 10 sitios de muestreo representativos del área de estudio en mención y se llevaron a cabo tres muestreos en los meses de julio y octubre de 20221, así como marzo de 2022.

La Figura 2 y la Tabla 3 muestran la ubicación de la zona de estudio.



Figura 2. Localización de los sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

Tabla 3. Localización de los sitios de muestreo.

SITIO	NOMBRE	COORDENADAS
P-01	Lago Zirahuén 01	19° 26' 56" N 101° 43' 54" W
P-02	Lago Zirahuén 02	19° 26' 23" N 101° 43' 26" W
P-03	Lago Zirahuén 03	19° 26' 8" N 101° 43' 12" W
P-04	Lago Zirahuén 04	19° 25' 53" N 101° 43' 23" W
P-05	Desembocadura del río El Silencio al lago de Zirahuén 05	19° 25' 41" N 101° 43' 32" W
P-06	Lago Zirahuén 06	19° 25' 36" N 101° 43' 38" W
P-07	Lago Zirahuén 07	19° 25' 36.6996" N 101° 45' 21.0168" W
P-08	Lago Zirahuén 08	19° 26' 10.5177" N 101° 45' 38.376" W
P-09	Lago Zirahuén 09	19° 26' 34.0194" N 101° 44' 57.395" W
P-10	Lago Zirahuén 10	19° 27' 14.9282" N 101° 44' 33.5308" W

VI.2.2.3. Parámetros

La selección de parámetros fisicoquímicos para la caracterización de los sedimentos está basada en el propósito del estudio, los objetivos de calidad de los datos y los recursos disponibles. Los parámetros seleccionados fueron: temperatura, pH y tamaño de partícula (textura), elementos traza.

VI.2.2.4. Toma de muestras de sedimento

La colecta de sedimento se efectuó con un muestreador de tubo de PVC, de acuerdo a las características de profundidad y acceso al sitio. Se colectaron los primeros 10 cm de profundidad para obtener parámetros o propiedades de interés por deposición de material reciente (Mudroch y Azcue, 1997; Lau y Chu, 2000; EPA, 2001).

Las muestras de sedimentos fueron homogeneizadas, transferidas a bolsas de polietileno previamente lavadas con ácido y luego se mantuvieron congeladas hasta su análisis. Las muestras de sedimento se descongelaron y se secaron en un horno de circulación durante 6 horas a 60°C, una vez secas las muestras se molieron en un mortero y se tamizaron usando un tamiz de 2 mm.

VI.2.2.5. Procedimiento general para la determinación de características físicas en sedimentos

El color se determinó con base en el sistema de Munsell ya que es el más utilizado y describe todos los colores posibles en términos de tres coordenadas: matiz (Tono), luminosidad (Valor) y pureza (Croma). La textura se determinó siguiendo el método de Bouyoucos que hace referencia a la porción relativa de los diferentes tamaños de partículas (granulometría) que se encuentran en el suelo (arena, limo y arcilla), en este método la muestra seca se dispersa con hexametáfosfato de sodio, luego se mide la densidad de la suspensión resultante con un hidrómetro después de 40 segundos y dos horas de sedimentación y con las lecturas obtenidas se calcula la distribución de las partículas de arcilla, limo y arena, cuando estas proporciones se combinan, el suelo puede ser categorizado en una de las 12 clases texturales.

El pH se determinó utilizando el método 9045C para suelos y lodos (EPA 2004), que es un método potenciométrico.

VI.2.2.6. Determinación de elementos traza

La determinación para elementos traza se realizó por fluorescencia de rayos X, la cual consiste en cuantificar la energía liberada en forma de fluorescencia cuando el electrón pasa de un orbital de mayor energía a otro de menor energía. En este caso específico se requiere de una radiación de rayos X para producir fluorescencia en determinados materiales. El sedimento tiene que estar libre de humedad por lo que se dejó secar a temperatura ambiente por varios días, posteriormente se hizo pasar por una malla 200 y se pesaron 4 g.

VI.2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VI.2.3.1. Descripción de la muestra y parámetros fisicoquímicos

El color de la muestra determinado por el método de Munsell se muestra en la Tabla 2. El sedimento seco de cinco sitios (P-01, P-02, P-03, P-05, P-09) resultó de color marrón, dos sitios (P-06, P-08) resultaron de color marrón grisáceo, un sitio (P-07) dio color gris, un sitio (P-04) dio color marrón oliva oscuro y un sitio (P-10) dio color marrón amarillento oscuro. El color puede ser utilizado como una clave del contenido de ciertos minerales en el suelo, fundamentalmente minerales férricos ya que ellos proveen la mayor variedad de pigmentos al suelo.

Tabla 2. Valores de matiz, brillo e intensidad obtenidos para los sedimentos del lago de Zirahuén y su clasificación (NOM-021-RECNAT-2000).

<i>Sitio</i>	<i>Determinación</i>	<i>Matiz (Hue)</i>	<i>Brillo (Value)</i>	<i>Intensidad (Chroma)</i>	<i>Color</i>
P-01	Seco	10 YR	4	3	Marrón
P-02	Seco	10 YR	4	3	Marrón
P-03	Seco	7.5 YR	3	4	Marrón oscuro
P-04	Seco	10 YR	4	3	Marrón oliva oscuro
P-05	Seco	10 YR	4	3	Marrón
P-06	Seco	10 YR	5	2	Marrón grisáceo
P-07	NA	NA	NA	NA	NA
P-08	Seco	2.5 YR	3	2	Marrón grisáceo muy oscuro
P-09	Seco	10 YR	5	3	Marrón
P-10	Seco	10 YR	3	6	Marrón amarillento oscuro

Los resultados de textura (tamaño de partícula) indican que solamente el sedimento del sitio 8 es una combinación de arenas y limos, en el cual predominan las arenas. En tanto que los otros cuatro sitios P-03, P-04, P-09 y P-10 presentan sedimentos de tipo franco arenoso (Tabla 3), el P-06 es de textura areno franco, mientras que los P-01, P-02 y el P-05 presentan una textura franco limoso. La mayoría de los sitios presentaron sedimentos finos y suaves al tacto con partículas grandes y algunos restos de materia orgánica, las cuales fueron removidas para realizar los análisis en el laboratorio. En cuanto al P-07 no se pudo obtener muestra de sedimento. Las clases texturales en las clasificaciones pedológicas se basan en porcentajes. Las características texturales de los sedimentos son uno de los factores más importantes que determinan la química y ecología de los sedimentos, además de controlar el almacenamiento de metales pesados en los sedimentos en sistemas fluviales. Se acepta que el limo y arcilla son probablemente los más importantes limpiadores de metales traza en este tipo de sistemas, lo que se atribuye a las grandes superficies de contacto de las partículas finas, así como a sus formas variadas y la carga que poseen. Además, debido a los recubrimientos de su superficie con óxidos de hierro y manganeso, es probable que también adsorban contaminantes orgánicos, y es aún más probable que estén involucrados en reacciones de adsorción. Las fracciones limosas y arcillosas en sedimentos están fuertemente relacionadas con la mayor parte de los contaminantes que se pueden encontrar en los sedimentos (Orescanin *et al.*, 2004; Çevik *et al.*, 2009).

Tabla 3. Porcentajes de arena, limos y arcillas obtenidos para los sedimentos del lago de Zirahuén y su clasificación de acuerdo al triángulo de textura (NOM-021-RECNAT-2000).

Sitio	%				Textura
	Limo	Arcillas	Arena	Total	
P-01	54.62	19.74	25.64	100	Franco limoso
P-02	52	17.7	30.3	100	Franco limoso

P-03	32	5.64	62.32	100	Franco arenoso
P-04	23.64	7.64	68.72	100	Franco arenoso
P-05	55.64	19.64	24.72	100	Franco limoso
P-06	10.36	6	83.64	100	Areno franco
P-07	NA	NA	NA	NA	
P-08	4	0	96	100	Arena
P-09	30.36	15.28	54.36	100	Franco arenoso
P-10	17.64	7.28	75.08	100	Franco arenoso

El pH determinado en las 9 muestras, se muestra en la tabla 4 donde se observan los valores que se obtuvieron de las tres colectas de sedimentos del lago de Zirahuén, y se comparó con las categorías de la norma mexicana, en el P-07 no fue posible recolectar sedimento. En Figura 3 se encuentran graficados estos valores, siete sitios se encuentran dentro de la categoría de pH neutro, el sitio 8 y 9 se clasifica como medianamente alcalino. El pH es una propiedad química del sedimento que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos, es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo.

Tabla 4. Valores de pH obtenidos para los sedimentos del lago de Zirahuén y criterios de evaluación de un suelo respecto a su valor (NOM-021-RECNAT-2000).

Sitio	pH	pH	pH	Categoría
P-01	7.56	7.32	7.04	Moderadamente alcalino, neutro
P-02	7.07	7.01	7.12	Neutro
P-03	7.36	7.24	7.13	Neutro
P-04	7.29	7.21	6.96	Neutro

P-05	7.41	7.56	7.36	Medianamente alcalino, Medianamente alcalino, neutro
P-06	7.8	7.08	6.93	Medianamente alcalino
P-07	NA	NA	NA	NA
P-08	7.37	8.08	7.05	Medianamente alcalino
P-09	7.3	7.54	6.99	Neutro, medianamente alcalino, neutro
P-10	7.46	6.93	6.59	Medianamente alcalino, neutro

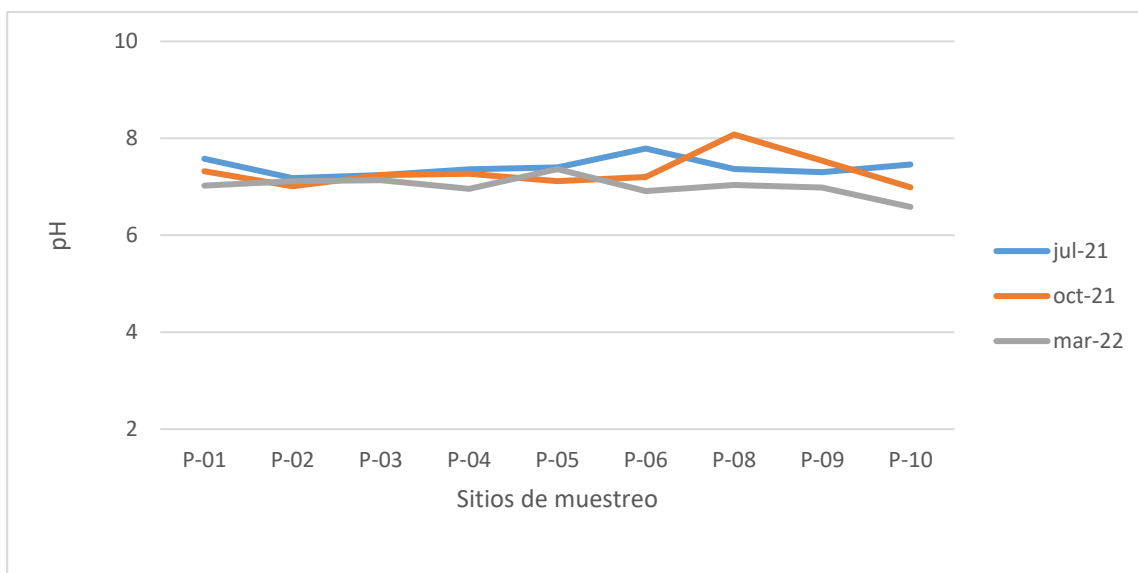


Figura 3. Valores de pH para sedimento en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

VI.2.3.2. Concentración de elementos traza

Las concentraciones de elementos traza en sedimentos se compararon con los criterios para sedimento en agua dulce recomendados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2008), conocidos como LEL “Lowest Effect Level” (Nivel de Efecto Bajo) y SEL “Severe Effect Level” (Nivel de efecto severo), criterios establecidos de acuerdo al gradiente de toxicidad.

En la Figura 4 se puede observar que el Fe presentó en la mayoría de los sitios, valores mayores al criterio LEL (2%) y en algunos muestreos alcanzan el criterio SEL (4%) de acuerdo a la NOAA, el valor más alto se obtuvo en muestreos de marzo (temporada de estiaje) en los sitios P-01, P-02, P-03, P-04, P-05, P-06, P-08, P-09, P-10 comportándose de manera similar en ambas temporadas. El Fe es uno de los metales más abundantes en sedimentos debido a que es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre (Jain et al., 2007). Las concentraciones relativamente altas de Fe en las muestras, pueden ser atribuidas principalmente al tipo de suelo presente en la zona de estudio. Cabe mencionar que este metal tiene una alta afinidad por las arcillas y limos de los sedimentos, provocando su retención y así muy poca movilidad, en nuestro caso la concentración aumento en temporada de estiaje esto a que el lago ya no tiene gran entrada de partículas arrastradas por las lluvias y al no haber movimiento en el agua tienden a formar óxidos y sedimentar.



Figura 4. Valores de He en % para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

En la Figura 5 se muestran las concentraciones de Cu en sedimentos, las cuales fueron mayores al criterio LEL (16 mg/kg) recomendado por la NOAA, rebasando también el criterio SEL (110 mg/kg). Las concentraciones presentaron una variación menor entre muestreos en la mayoría de los sitios, pero notándose un incremento en el sitio P-05 y P-06

que es la desembocadura del río el silencio al lago, esto puede deberse a que en las zonas aledañas por donde pasa el río practican mucho la alfarería (santa clara del cobre) y las aguas son descargadas en el río que posteriormente llegan al lago, las concentraciones son relativamente más altas en temporada de precipitación pluvial a diferencia que en temporada de estiaje esto a que por el arrastre por medio de la lluvia ingresan al lago.

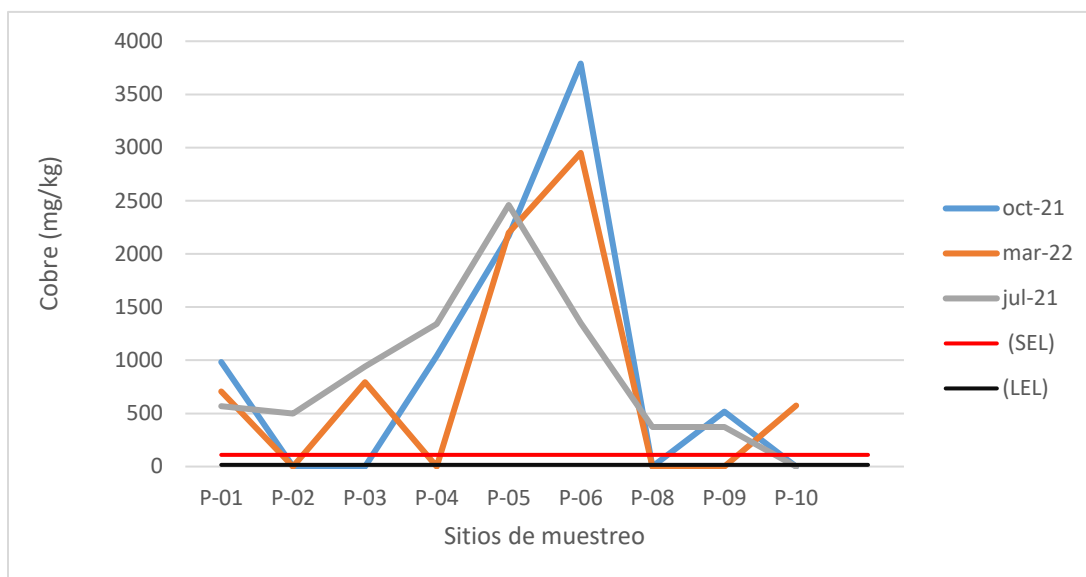


Figura 5. Valores de Cu (mg/kg) para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

El Zn puede encontrarse en forma natural en los suelos, y es un nutriente requerido por las plantas para su desarrollo (Mahler, 2003). presenta concentraciones muy variadas después del sitio 7 en la cual no fue posible recolectar sedimento para su análisis. En la Figura 6 se observa que los sitios P-05 y P-06 muestran la mayor concentración de zinc en las dos temporadas de recolección, indicando posiblemente la entrada del zinc es por fuentes antropogénicas, ya que el P-05 es la desembocadura del río El Silencio en el lago, además de acuerdo a la textura del sitio presenta gran cantidad de arenas; lo que provoca que el zinc se libere fácilmente. Cabe mencionar que todos los sitios sobrepasaron el criterio SEL (820 mg/kg).

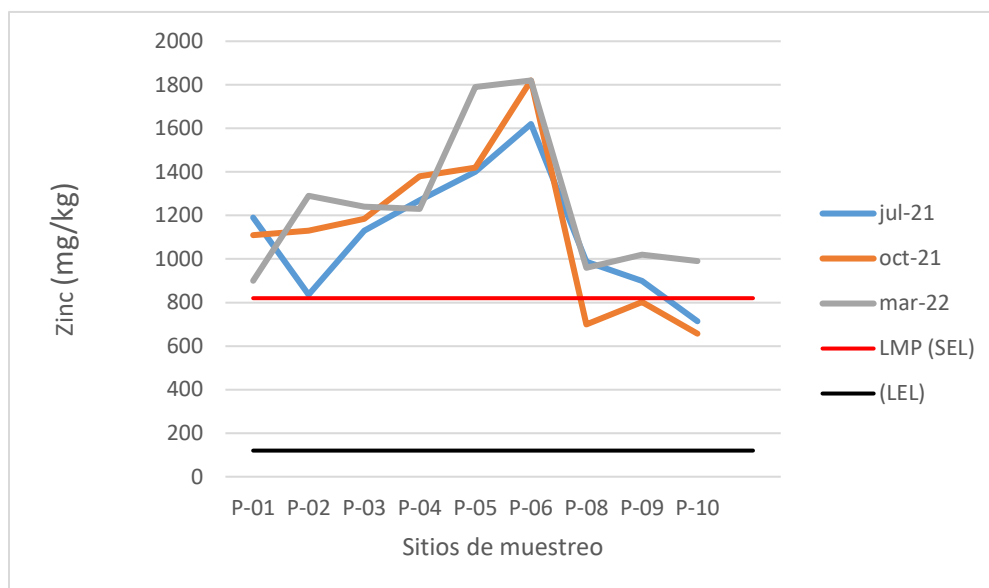


Figura 6. Valores de Zn (mg/kg) para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

En la Figura 7 se muestran las concentraciones de Cr en sedimentos, las cuales fueron mayores al criterio LEL (26 mg/kg) recomendado por la NOAA, rebasando el criterio SEL (110 mg/kg). Las concentraciones presentaron una variación entre muestreos para la temporada de precipitación pluvial ya que en la colecta del mes de octubre en la mayoría de los sitios por fluorescencia de rayos x no se detectó este elemento, siendo a partir del sitio 5 en adelante donde se pudo detectar como ya se ha mencionado es la entrada del río el silencio al lago solo en el sitio p-01 se eleva demasiado en la temporada de estiaje que fue en el mes de marzo esto quizá se deba a que el cromo formó algún complejo con los óxidos de hierro de ese sitio, lo cual provoco que se precipitara, en ese sitio se encuentra también una concentración alta de hierro.

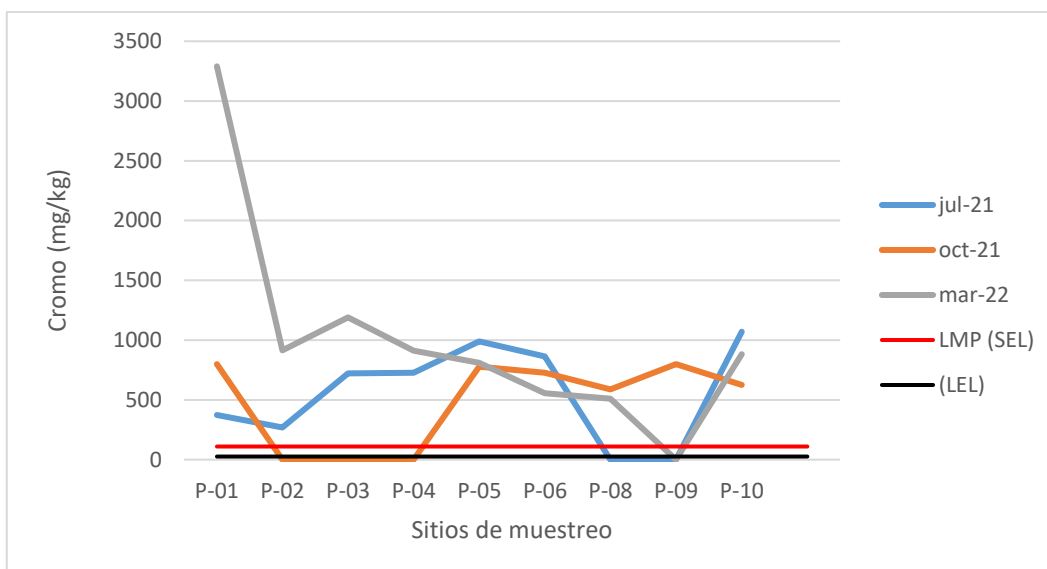


Figura 7. Valores de Cr (mg/kg) para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

La producción de Ni se obtiene principalmente de yacimientos de azufre. Se utiliza ampliamente en la industria de la galvanoplastia, la producción de baterías recargables, aleaciones, la industria electrónica, refinerías de petróleo, entre otras. Este metal entra al ambiente acuático mediante la disolución de las rocas y suelos ricos en minerales que lo contienen, desechos industriales, deposición atmosférica y los tiraderos de basura. El Ni es relativamente insoluble a valores de pH por encima de 6.7. La lluvia ácida incrementa también su concentración en agua.

En la Figura 8 se muestra la concentración de Ni en las diferentes temporadas, la cual se determinó por FRX. Se observa que en la temporada de precipitación pluvial que corresponde a julio, no se detecta concentración de Ni en la mayoría de los sitios, sin embargo, en el mes de octubre donde finaliza la temporada de lluvias, se detecta una concentración de Ni en la mayoría de los sitios; considerando que puede deberse a que al inicio de las lluvias (julio) el metal solo es acarreado al lago y al finalizar la temporada el metal ya ha sedimentado.

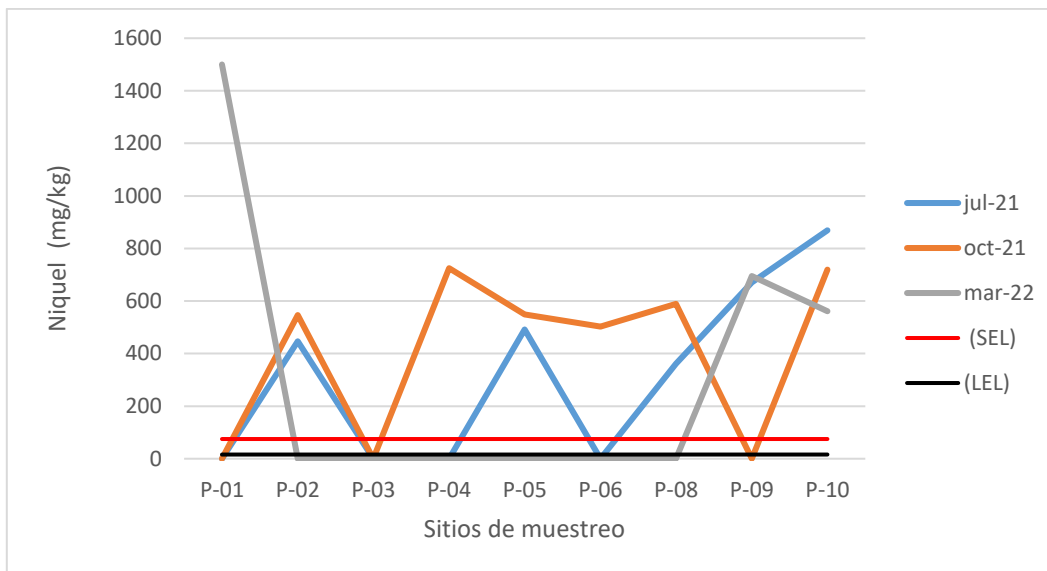


Figura 8. Valores de Ni (mg/kg) para sedimento determinado por FRX en los 9 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

VI.2.3.3. Modelación de la especiación química

Para llevar a cabo este procedimiento se utilizó el Programa Visual MINTEQ (versión 3.1) y se representan los elementos traza: Zn, Fe y Ni ya que fueron los que estuvieron en mayor concentración para valorar la forma en la que se encuentra el elemento y el porcentaje de abundancia.

A pH neutro y en presencia de oxígeno, el hierro como ion ferroso (Fe^{2+}) es oxidado a ion férrico (Fe^{3+}), el mismo que rápidamente es hidrolizado bajo la forma de un precipitado insoluble como hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$. A valores de pH por debajo de 6, la tasa de oxidación del Fe^{2+} hacia Fe^{3+} es extremadamente lenta. El Fe se oxida bajo la acción del aire o por la adición de cloro, pasando al estado férrico pudiendo así hidrolizarse para dar un hidróxido de hierro insoluble (Valencia, 2010). En este estudio se realizó la especiación química del hierro férrico Fe^{3+} , debido a la oxidación que sufrió el Fe^{2+} , el agua colectada al estar en contacto con el oxígeno de la superficie Lo que propició a pasar del Fe^{2+} al Fe^{3+} .

En la temporada de precipitación pluvial (Figura 8) se observó la presencia del $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ como especie predominante en todos los sitios de estudio, seguido con un porcentaje menor la especie el hidróxido férrico acuoso $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{aq})$, y con menor presencia, el ion hidróxido de hierro (II) $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, cromato de hierro (II) FeCrO_4 .

En la temporada de estiaje se volvió a observar la presencia en mayor proporción del $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ en todos los sitios de estudio (Figura 9), seguida de la especie $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{aq})$, en mucho menor concentración cromato de hierro (II) FeCrO_4 .

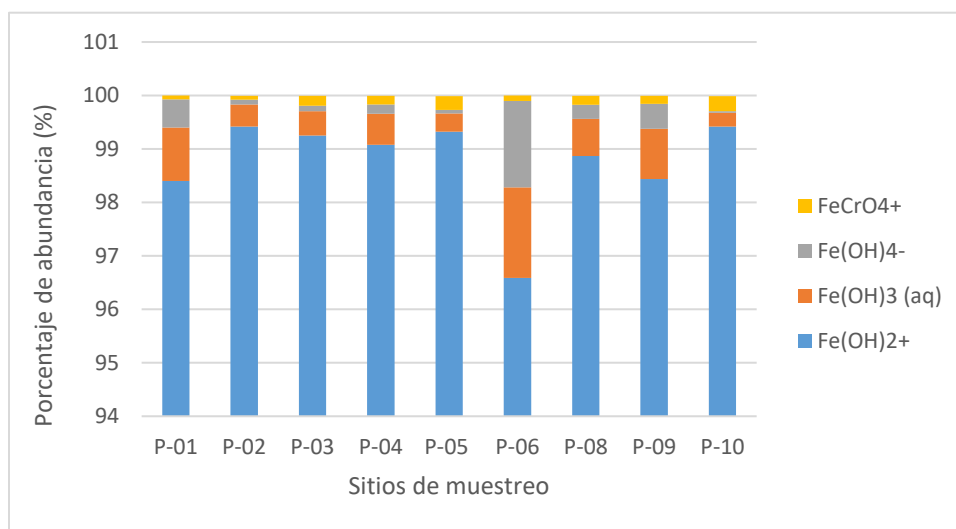


Figura 9. Especiación química del He en temporada de precipitación pluvial.

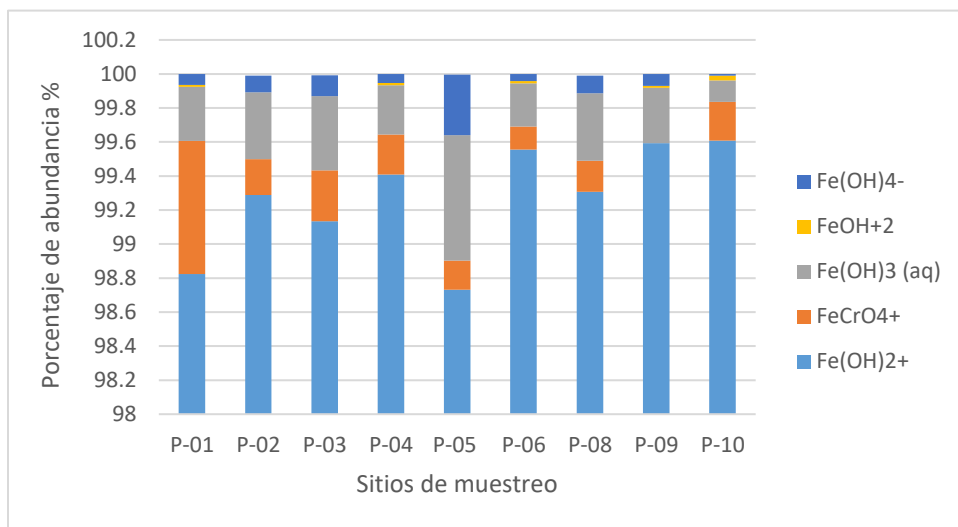


Figura 10. Especiación química del Fe . Temporada de estiaje.

En cuanto al Ni, se presentan los resultados de la colecta que corresponde a la temporada de precipitación pluvial (Figura 10) y de la colecta de estiaje (Figura 11). La especie predominante es su ion libre Ni^{2+} , seguido de la especie NiOH^+ .

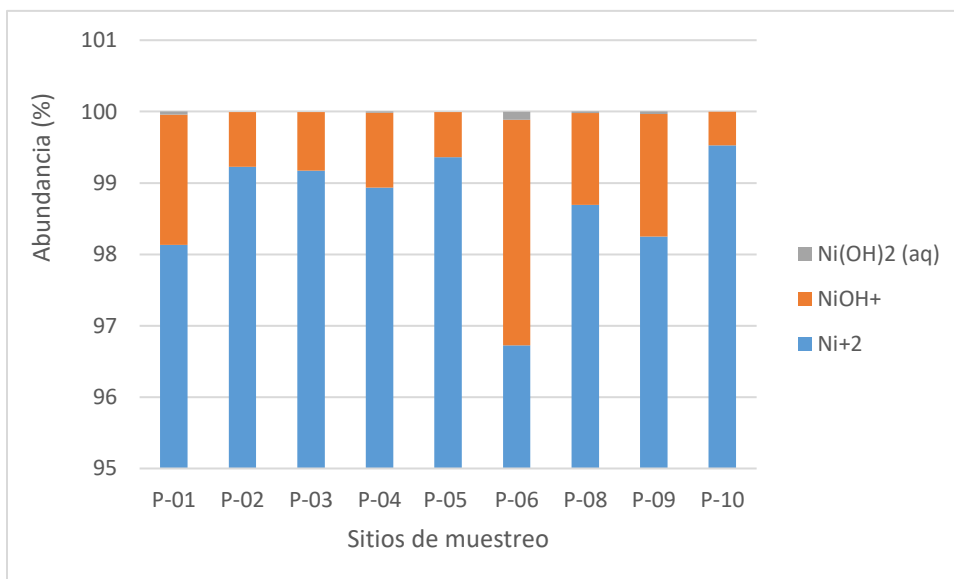


Figura 11. Especiación química del Ni en la temporada de precipitación pluvial.

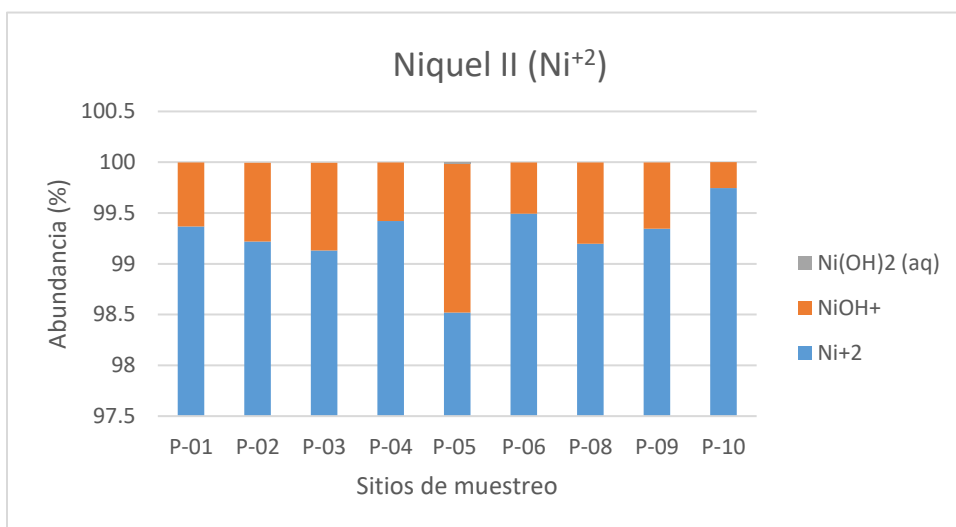


Figura 12. Especiación química del Ni en la temporada de estiaje.

El Zn en contacto con el oxígeno se hidroliza para formar un precipitado. En las Figuras 12 y 13 que corresponden a la primera colecta y segunda colecta se presenta en mayor proporción su ion libre Zn^{2+} , seguido del $Zn(OH)$ y por último pasando al $Zn(OH)_2$ aq. Lo cual podemos decir que debido a los pH y sus características químicas tiende a estar en esa forma libre.

De la concentración total del metal, sólo ciertas formas químicas son tóxicas para los organismos estas incluyen los metales liposolubles y los iones libres (Morrison et al 1989 en Rosas 2001)

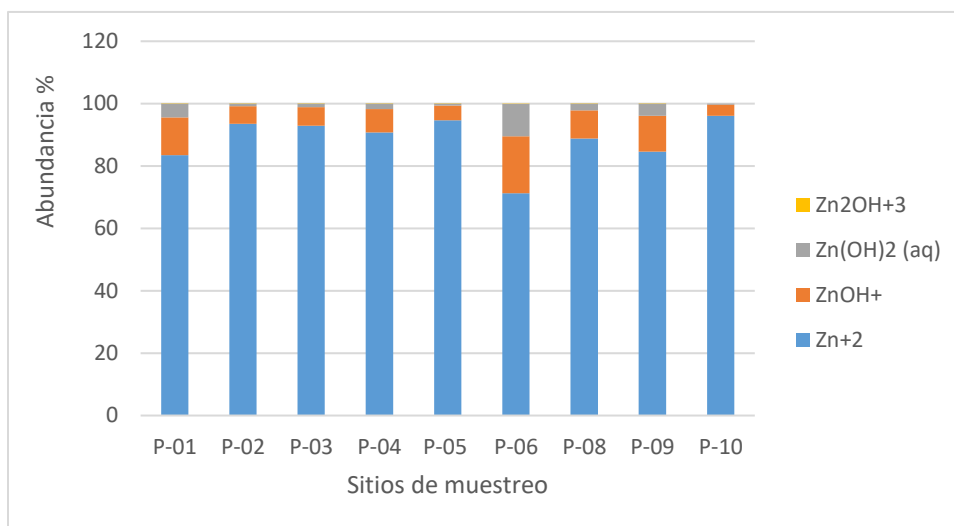


Figura 13. Especiación química del Zn en la temporada de precipitación pluvial.

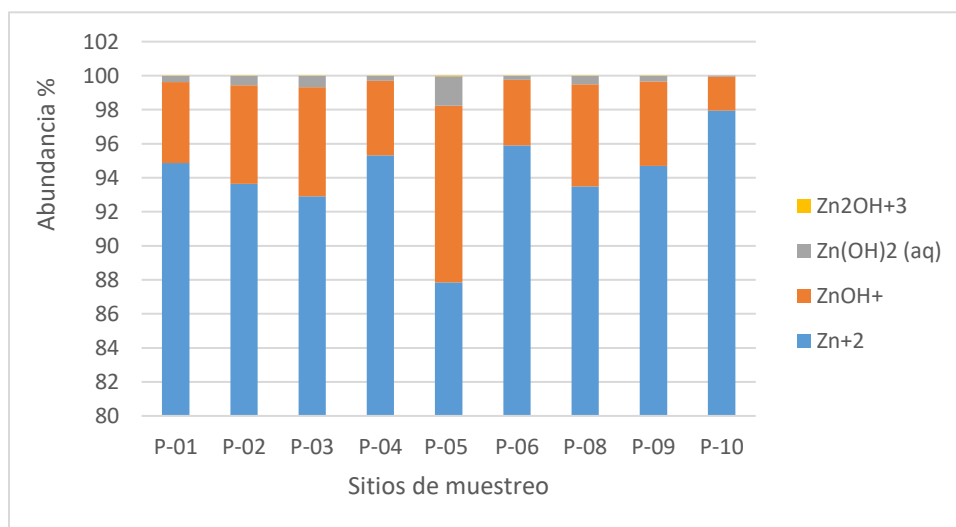


Figura 14. Especiación química del Zn en la temporada de estiaje.

VI.2.4. CONCLUSIONES

Los elementos traza se encontraron en mayor concentración en sedimento, esto debido a las condiciones fisicoquímicas presentes en el cuerpo de agua, que favorecieron su retención en el sedimento como lo es el pH y OD.

La mayor concentración de hierro fue en los sedimentos, ya que todos los sitios presentaron una coloración marrón (cantidades de óxidos de hierro), corroborándose con los resultados que obtuvimos por fluorescencia de Rx .

Los pH en sedimento fueron neutros a mediamente alcalinos en su mayoría, probablemente por el tipo de geología y edafología de la zona de estudio.

En la especiación química para Ni y Zn, se observó que las especies predominantes fueron sus iones libres (Ni^{2+} y Zn^{2+}), los cuales son considerados tóxicos para los organismos acuáticos. Pero por las condiciones del lago prefieren estar en sedimento y no afecta a estas especies a diferencia que estos elementos en sus iones libres estuvieran en agua.

VI.2.5 BIBLIOGRAFÍA

- Awofolu, O. R.; Mbolekwa, Z.; Mtshemla, V.; Fatoki, O. S. (2005). Levels of trace metals in water and sediments from Tyume River and its effects on an irrigated farmland. *Water SA*, 31(1), 87-94.
- Çevik, F.; Göksu, M. Z. L.; Derici, O. B.; Fındık, Ö. (2009). An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses. *Environ. Monit. Assess.*, 152, 309-317.
- Chunye L., Mengchang H., Yuxiang Z., Wei G. y & Zhifeng Y. (2008). Distribution and contamination assessment of heavy metals in sediment of the Second Songhua River, China. *Environ Monit Assess* 137:329–342.
- EPA (2004). Method 9045C. pH Electrometric measurement.
- EPA Ohio. 2001. Sediment Sampling Guide and Methodologies (2nd Edition). Division of Surface Water. State of Ohio. Environmental Protection Agency U.S.A.
- Lau, S.S.S.; Chu, L.M. (2000). The significance of sediment contamination in a coastal wetland, Hong Kong, China. *Water Res.*, 34(2), 379-386.
- Mariani, C. & Pompêo, M. (2008). La calidad del sedimento: La contaminación por metales puede ser una amenaza para los seres vivos. *Revista Ciencia Hoy*, 18(107): 48-53.
- Mudroch, A.; Azcue, J.M.; Mudroch, P. (1997). *Manual of Physico-Chemical Analysis of Aquatic Sediments*. CRC Lewis Publishers, Estados Unidos.
- Mwiganga, M.; Kansiime, F., (2005). Impact of Mpererwe Landfill in Kampala Uganda, on the surrounding environment. *Phys. Chem. Earth*, 30(11-16), 744-750.
- Nyangababo, J. T.; Henry, E.; Omutange, E., (2005a). Lead, cadmium, copper, manganese and zinc in wetland waters of Victoria Lake Basin, East Africa. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 74(5), 1003-1010.

- Orescanin, V.; Lulic, S.; Pavlovic, G.; Mikelic, L. (2004). Granulometric and chemical composition of the Sava River sediments upstream and downstream of the Krsko nuclear power plant. *Environ. Geol.*, 46, 605-613.0< -*.
- Öztürk M., Özözen G., Minareci O. y Minareci E. (2009). Determination of heavy metals in fish, water and sediments of Avsar Dam Lake in Turkey. *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 73-80.
- Rosas, R. H. (2001). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Energía, Minería y Recursos Naturales. Tesis Doctoral. 281pp
- Tejeda, S., Ávila, P. P., Zarazúa, G., Carapia, M. L., Díaz, D. C., Lugo, J. (2005). Distribución de metales pesados en sedimentos: Estudio del Curso Alto del Río Lerma. 279-296 pp. En: Rivera, T. F., Gutiérrez, L. A., Val, S. R., Mejía, Z. R., Sánchez, R. P. A., Aparicio, M. J., Díaz, F. L. L. (Editores). *La Medición de sedimentos en México*. Ediciones IMTA-UJAT, Jiutepec, Morelos/Villahermosa, Tabasco, Mexico 318 pp.
- Valencia, C., 2010. Química del hierro y manganeso en el agua, métodos de remoción. Universidad de la Cuenca-Ecuador.

VII. DISCUSIÓN GENERAL

El agua en el lago no presenta gran diferencia en los resultados fisicoquímicos entre ambas temporadas lo que sugiere características similares, en cuanto a los metales como el Fe, Zn, Cu, Pb, Ni y Cr en la mayoría de los sitios fue inferior al límite de detección, observado en base a los resultados que obtuvimos.

La entrada de estos metales al lago, al estar en contacto con el agua y debido a sus condiciones y características fisicoquímicas tienden a precipitar y acumularse en los sedimentos a permanecer disueltos en el agua, lo cual en cierta parte está bien ya que esta agua es usada para uso y consumo humano y así todos los contaminantes metálicos que entran se precipitan y se van acumulando en el sedimento, pero también al acumularse en el sedimento provocan la proliferación de algas que a su vez consumen el oxígeno, así se va disminuyendo el oxígeno, disminuyendo su transparencia y con el paso del tiempo se va deteriorando el cuerpo de agua. Esta discusión es buena pero la puedes mejorar.

En los sedimentos para los sitios estudiados todos los elementos traza sobrepasan el nivel SEL recomendado por el NOAA, notándose que las concentraciones siempre son mayor del P-05 en adelante ya que este sitio es la desembocadura del río y la corriente sigue en ese sentido. Los valores de pH mostrados son alcalinos a ligeramente alcalinos representan un factor en la presencia o ausencia de metales pesados y arsénico en el medio acuático.

CONCLUSIÓN GENERAL

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos entran dentro del rango y la calidad de este es aceptable, mas sin embargo por la presencia de coliformes fecales esta agua no es apta para uso y consumo humano, en cuanto a los elementos traza por las características del agua como lo es su pH alcalino, su oxígeno disuelto estos tienden a formar compuestos y precipitar, por eso se encontraron en mayor proporción en sedimento, sin embargo si estas condiciones cambiaran a un pH ácido y un bajo oxígeno disuelto estos elementos traza su prevalencia seria en la columna de agua y superaría los límites máximos permisibles para agua apta para uso

y consumo humano. En cuanto a los microplásticos no tenemos una norma de referencia para poder comparar, pero si sería de mucha ayuda poder caracterizar estos para saber de cual tipo de plástico son provenientes y poder concientizar a las personas que están contribuyendo a esta contaminación.

VIII. RECOMENDACIONES

- Es necesario que se sigan haciendo este tipo de estudios al lago, para poder conservar este cuerpo de agua y siga siendo uno de los lagos más conservados de la región lacustre de Michoacán.
- Realizar más estudios implementando técnicas analíticas como ICP-MS que complementen los resultados obtenidos por fluorescencia de rayos X, ya que no se cuenta con resultados anteriores de elementos traza.
- Promover proyectos enfocados al tratamiento de aguas y mejorar los ya existentes.
- Realizar una caracterización de los microplásticos obtenidos en este estudio para ver cuál tipo de plástico es el que está presente en esta zona de estudio y su posible remoción.
- Promover el desarrollo sustentable, la concientización y el respeto de las normas referentes a la protección de los cuerpos de agua en la población que aporta contaminación.
- Realizar un estudio de elementos traza en las especies acuáticas que viven en el lago, para valorar su bioacumulación.

ANEXO A: TABLAS DE RESULTADOS AGUA

Tabla 1. Resultados de los parámetros de campo en los sitios de estudio.

SITIO	CAMPAÑAS DE MUESTREO	pH	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Temperatura (°C)
P-01	Julio 21	8.53	152.9	16
	Octubre 21	8.64	148	21.5
	Marzo 22	8.29	153.76	21
P-02	Julio 21	8.56	151.43	16
	Octubre 21	8.71	145.23	22.5
	Marzo 22	8.36	153.8	23
P-03	Julio 21	8.62	150.01	17
	Octubre 21	8.71	146.13	21.8
	Marzo 22	8.28	154.66	21
P-04	Julio 21	8.67	152.5	17
	Octubre 21	8.72	146.4	19.5
	Marzo 22	8.28	153.33	20
P-05	Julio 21	8.21	168.8	18
	Octubre 21	8.46	147.5	18.1
	Marzo 22	8.29	154.233	21
P-06	Julio 21	8.57	151.6	16
	Octubre 21	8.57	149.5	17.7
	Marzo 22	8.17	154.466	20
P-07	Julio 21	8.74	152.26	18
	Octubre 21	8.77	151.1	19.5
	Marzo 22	8.43	154.266	22
P-08	Julio 21	8.77	151.42	18
	Octubre 21	8.77	147.83	19.9
	Marzo 22	8.68	152.66	22
P-09	Julio 21	8.96	151.3	18
	Octubre 21	8.7	147.93	19.9
	Marzo 22	8.38	153.5	23
P-10	Julio 21	8.64	150.63	19

	Octubre 21	9.54	147.13	20
	Marzo 22	8.32	154.266	24

Tabla 2. Escala de clasificación de calidad de agua superficial con base en la demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO)

Criterio (mg/L)	Clasificación	Color
DBO ₅ ≤ 3	EXCELENTE (no contaminada)	Azul
3 < DBO ₅ ≤ 6	BUENA CALIDAD (Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable)	Verde
6 < DBO ₅ ≤ 30	ACEPTABLE (Con indicio de contaminación, aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente)	Amarillo
30 < DBO ₅ ≤ 120	CONTAMINADA (Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal)	Naranja
DBO ₅ > 120	FUERTEMENTE CONTAMINADAS (Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales)	Rojo

Criterio (mg/L)	Clasificación	Color
DQO ≤ 10	EXCELENTE (no contaminada)	Azul
10 < DQO ≤ 20	BUENA CALIDAD (Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable)	Verde
20 < DQO ≤ 40	ACEPTABLE (Con indicio de contaminación, aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente)	Amarillo
40 < DBO ₅ ≤ 200	CONTAMINADA (Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal)	Naranja
DQO > 200	FUERTEMENTE CONTAMINADAS	Rojo

	(Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales)	
--	---	--

Tabla 3. Resultados de parámetros fisicoquímicos y coliformes fecales.

Sitio	Campaña de colectas	Turbiedad (UTN)	Color (Pt-Co)	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	Nitrógeno de nitratos (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	Dureza atotal (mg/L)	Alcalinidad total (mg/L)	Coliformes fecales (UFC/100ml)
P1	Julio 21	3.9	5	94	14	80	0.12	0.021	1.63	14.1	62.992	69.345	410
	Octubre 21	3.4	5	84	4	80	0.058	0.017	1.03		58.928	66.33	260
	Marzo 22	3.5	5	86	6	80	0.058	0.129	1.67	18	64.64	74.37	20
P2	Julio 21	3.7	5	90	14	76	0.12	0.015	1.68	15	60.96	68.34	320
	Octubre 21	3.5	5	74	6	68	0.058	0.009	1.16		54.864	66.23	0
	Marzo 22	3.4	5	90	6	84	0.058	0.118	1.27	19	65.65	75.375	0
P3	Julio 21	3.8	10	96	14	82	0.088	0.013	1.054	14.2	58.896	68.34	170
	Octubre 21	3.2	5	100	6	94	0.058	0.002	1		52.832	65.325	290
	Marzo 22	3.2	5	86	6	80	0.058	0.11	0.8	19	66.66	74.37	10
P4	Julio 21	4.9	5	94	16	84	0.176	0.016	1.7	11	58.928	70.35	50
	Octubre 21	3.4	5	84	4	80	0.058	0.002	1.04		56.896	66.33	300
	Marzo 22	38	20	88	8	80	0.058	0.119	2.89	17	62.62	70.35	0
P5	Julio 21	7.6	20	202	104	98	1.171	0.095	3.37	22	60.96	79.395	1300
	Octubre 21	5.6	10	140	60	80	0.351	0.061	3.02		58.928	63.315	1400
	Marzo 22	3.3	5	90	10	80	0.088	0.116	1.62	27	64.64	70.35	0
P6	Julio 21	4.1	5	96	16	80	0.088	0.01	1.65	12	60.96	67.335	160
	Octubre 21	3.7	5	58	10	48	0.058	0.031	1.03		52.832	64.32	130
	Marzo 22	3.6	5	88	16	72	0.058	0.122	1.15	16	64.64	72.36	0
P7	Julio 21	2.9	5	94	10	84	0.088	0.02	2.45	16	65.024	68.34	40
	Octubre 21	3	5	68	2	66	0.058	0.003	1.26		52.832	67.335	120
	Marzo 22	3.5	5	84	4	80	0.058	0.113	1.66	22	62.62	73.36	10
P8	Julio 21	3.5	5	90	6	84	0.088	0.05	2.38	16.172	58.928	69.345	40
	Octubre 21	3.3	5	104	4	100	0.058	0.011	1.42		54.864	66.33	460

	Marzo 22	3.4	5	80	2	78	0.058	0.107	2.28	23	60.6	69.345	20
P9	Julio 21	3.6	5	96	8	88	0.058	0.08	2.64	15.92	58.928	70.35	90
	Octubre 21	3.1	5	52	12	40	0.058	0.025	1.5		54.864	68.34	340
	Marzo 22	3.7	5	92	8	84	0.058	0.107	2.05	21	64.64	74.37	90
P10	Julio 21	4	5	92	12	80	0.088	0.033	2.64	16.85	56.896	66.33	180
	Octubre 21	3.3	5	74	2	72	0.058	0.023	1.56		52.832	68.34	160
	Marzo 22	3.1	5	80	6	74	0.058	0.127	2.12	22	62.62	74.872	10

Tabla 4. Resultados de iones mayoritarios.

Sitio	Campaña de colectas	PO³⁻₄ (mg/L)	Cl⁻ (mg/L)	SO²⁻₄ (mg/L)	CO²⁻₃ (mg/L)	HCO⁻₃ (mg/L)	Ca²⁺ (mg/L)	Mg²⁺ (mg/L)	Na⁺ (mg/L)
P1	Julio 21	0.081	8.69	6.589	2.01	67.335	13.031	6.410	8.07
	Octubre 21	0.024	5.94	5.673	8.04	58.29	13.031	7.396	5.08
	Marzo 22	0.1	8.933	4.165	0	74.37	15.788	6.127	5.64
P2	Julio 21	0.082	7.32	5.059	2.01	66.33	12.216	5.917	9.60
	Octubre 21	0.027	7.77	5.487	10.05	56.28	12.216	7.396	5.38
	Marzo 22	0.1	8.933	4.323	0	75.375	16.192	6.127	5.19
P3	Julio 21	0.07	6.86	4.696	2.01	66.33	12.216	5.424	10.42
	Octubre 21	0.029	7.32	5.495	8.04	57.285	13.031	6.402	6.53
	Marzo 22	0.098	9.429	3.666	0	74.37	16.192	6.372	4.92

P4	Julio 21	0.085	8.23	5.996	4.02	66.33	12.216	6.410	8.91
	Octubre 21	0.03	6.86	5.511	8.04	58.29	13.031	6.410	6.58
	Marzo 22	0.09	8.933	5.953	0	70.35	15.788	5.637	6.47
P5	Julio 21	0.014	9.15	10.54 9	0	79.395	14.660	5.424	11.80
	Octubre 21	0.018	8.23	6.394	0	63.315	13.031	6.903	5.90
	Marzo 22	0.1	8.933	6.116	0	70.35	15.788	6.127	5.75
P6	Julio 21	0.072	7.59	5.842	2.01	65.325	11.402	5.917	10.59
	Octubre 21	0.022	6.86	6.419	4.02	60.3	13.845	6.410	6.36
	Marzo 22	0.1	9.429	5.488	0	72.36	15.788	6.127	5.80
P7	Julio 21	0.087	7.32	7.007	6.03	62.31	12.216	5.424	10.72
	Octubre 21	0.032	6.86	6.411	6.03	61.305	14.660	6.903	4.86
	Marzo 22	0.099	8.933	3.35	0	73.36	15.788	5.637	6.69
P8	Julio 21	0.074	7.32	5.88	6.03	63.315	12.216	5.917	9.78
	Octubre 21	0.001	7.77	5.243	8.04	58.29	13.031	6.410	6.91
	Marzo 22	0.1	8.437	3.593	6.03	63.315	15.387	5.389	7.24
P9	Julio 21	0.068	6.86	5.44	10.05	60.3	12.216	5.917	9.57
	Octubre 21	0.026	7.77	5.031	8.04	60.3	13.845	5.917	6.93
	Marzo 22	0.1	8.933	3.635	0	74.37	15.788	6.127	5.58
P10	Julio 21	0.072	6.4	5.049	4.02	62.31	11.402	5.917	10.35
	Octubre 21	0.013	7.32	4.991	18.09	50.25	13.031	5.917	7.68
	Marzo 22	0.1	9.429	3.633	0	74.872	16.192	5.392	6.68

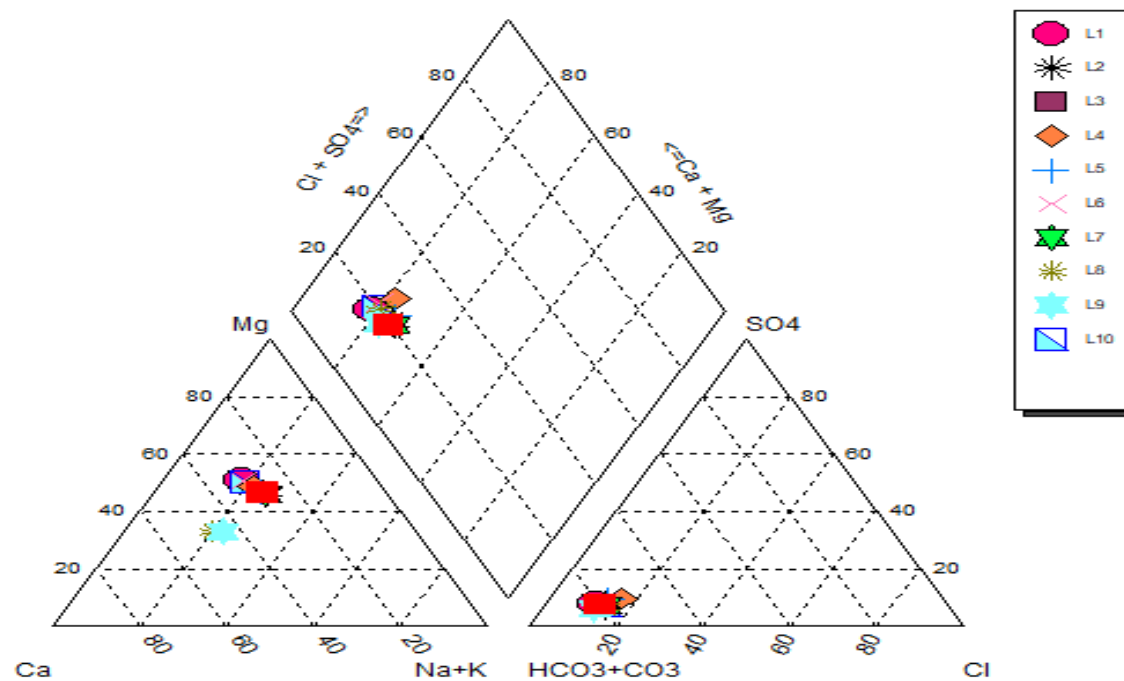


Figura 1. Diagrama de Piper correspondiente al muestreo del mes de octubre 2021 para los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

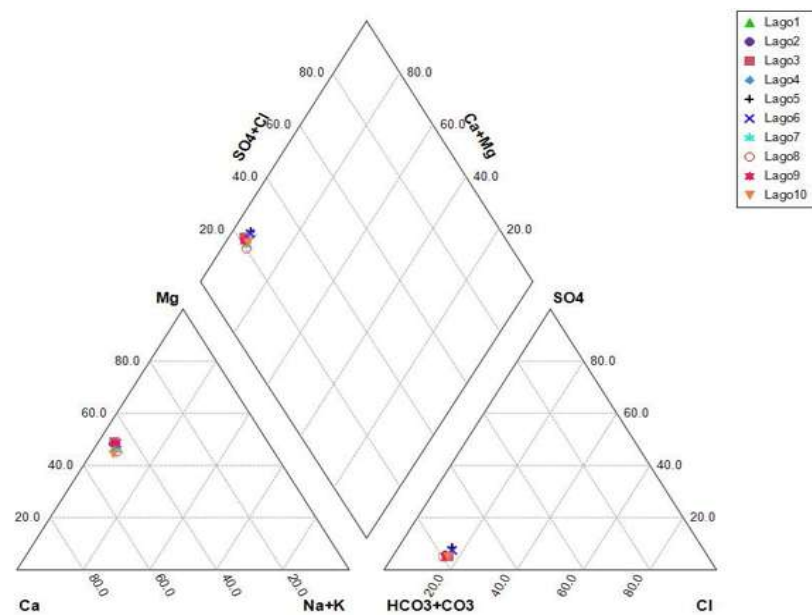


Figura 2. Diagrama de Piper correspondiente al muestreo del mes de marzo 2022 para los 10 sitios de muestreo en el lago de Zirahuén.

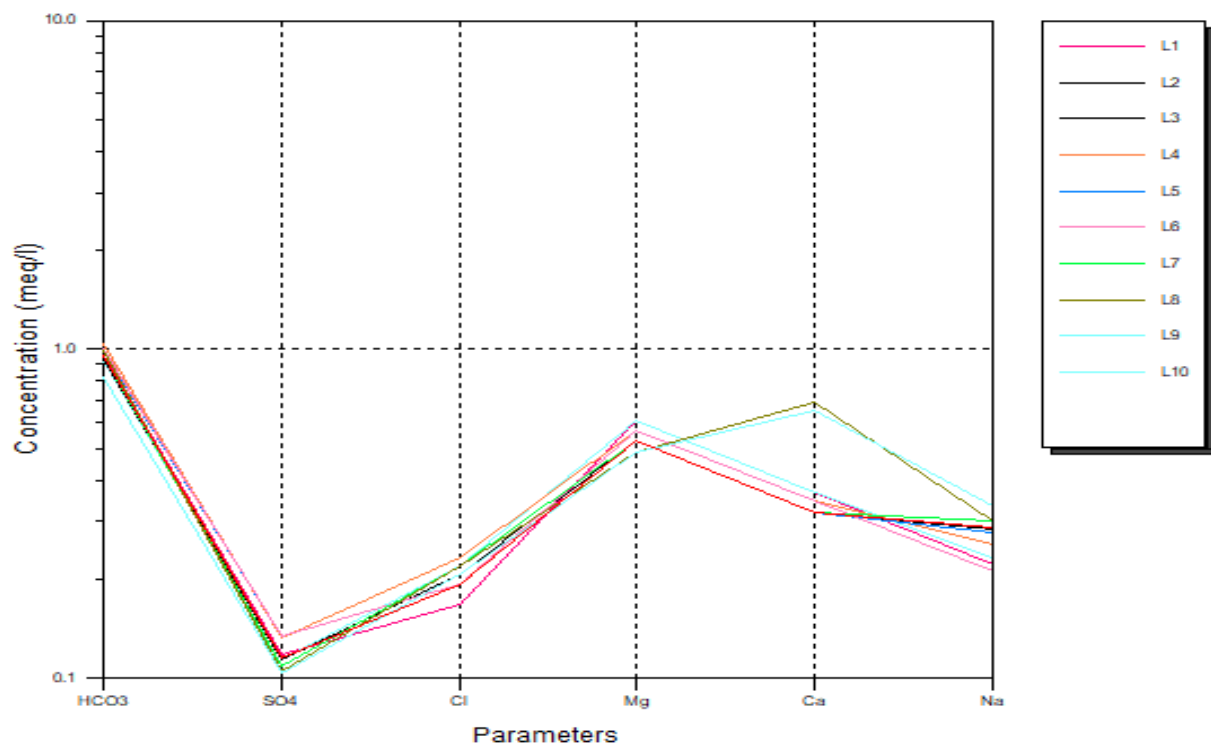


Figura 3. Diagrama de Schöeller correspondiente al muestreo del mes de octubre 2021 para los 10 sitios en el lago de Zirahuén.

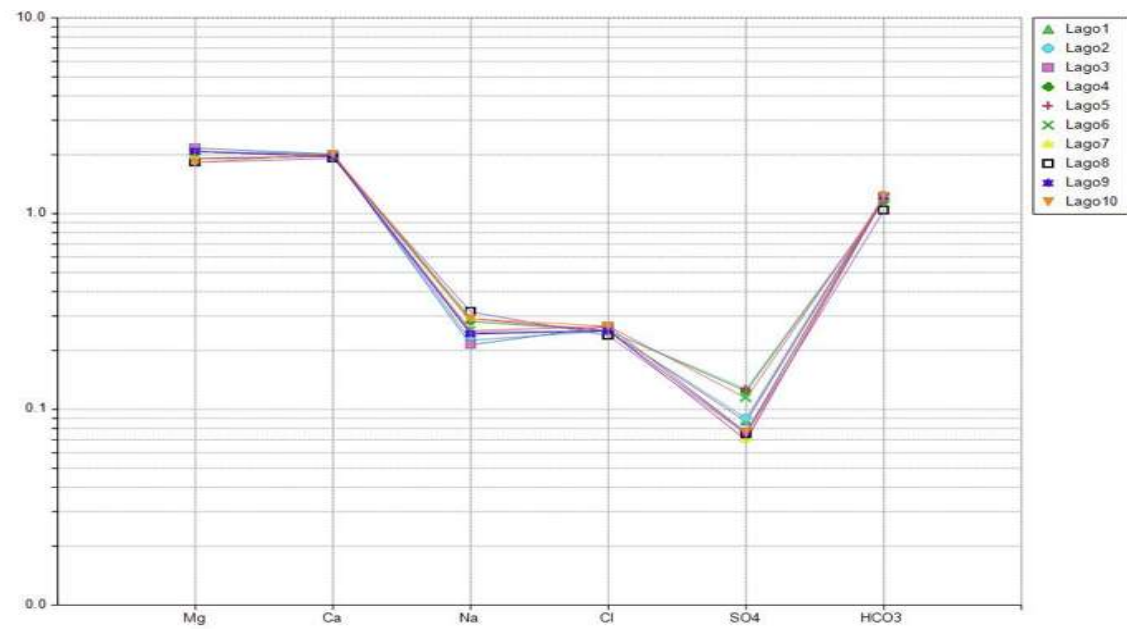


Figura 4. Diagrama de Schöeller correspondiente al muestreo del mes de marzo 2022 para los 10 sitios.

Tabla 5. Resultados de elementos traza en agua determinados por ICP-MS para los sitios de estudio.

Sitio	Campaña de colectas	Al (µg/L)	Cr (µg/L)	Fe (µg/L)	Ni (µg/L)	Cu (µg/L)	Zn (µg/L)	Pb (µg/L)
P1	Octubre 21	22.89	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
	Marzo 22	4.10	<L.D.	0.51	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.40
P2	Octubre 21	10.49	0.02	0.53	<L.D.	<L.D.	2.87	<L.D.
	Marzo 22	4.12	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
P3	Octubre 21	10.31	<L.D.	1.34	<L.D.	<L.D.	0.29	<L.D.
	Marzo 22	4.85	0.3	<L.D.	<L.D.	<L.D.	2.59	<L.D.
P4	Octubre 21	11.69	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
	Marzo 22	4.34	<L.D.	0.14	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
P5	Octubre 21	14.10	<L.D.	44.76	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
	Marzo 22	2.27	<L.D.	0.61	<L.D.	<L.D.	0.14	<L.D.

P6	Octubre 21	5.26	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
	Marzo 22	5.80	<L.D.	1.21	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
P7	Octubre 21	9.79	<L.D.	2.49	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
	Marzo 22	3.88	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
P8	Octubre 21	14.65	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
	Marzo 22	4.83	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
P9	Octubre 21	5.48	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
	Marzo 22	3.21	<L.D.	8.86	<L.D.	<L.D.	0.67	<L.D.
P10	Octubre 21	15.72	<L.D.	0.7	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
	Marzo 22	3.01	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.06

ANEXO B: TABLAS DE RESULTADOS DE SEDIMENTO

Tabla 6. Resultados de elementos traza en sedimento determinados por fluorescencia de rayos X para los sitios de estudio en ppm

Sitio	Campaña de colectas	Cr	Fe	Ni	Cu	Zn
P1	Octubre 21	799	412	-	568	1110
	Marzo 22	3290	416	1500	705	900
P2	Octubre 21	268	366	546	499	1130
	Marzo 22	913	417	-	-	1290
P3	Octubre 21	722	350	-	940	1130
	Marzo 22	1190	375	-	794	1240
P4	Octubre 21	728	367	725	1340	1380
	Marzo 22	912	386	-	-	1230
	Octubre 21	990	362	549	2170	1420

P5	Marzo 22	811	396	-	2200	1790
P6	Octubre 21	864	342	503	3790	1820
	Marzo 22	555	415	-	2950	1820
P7	Octubre 21	-	-	-	-	-
	Marzo 22	-	-	-	-	-
P8	Octubre 21	589	245	589	373	700
	Marzo 22	511	256	-	-	959
P9	Octubre 21	798	360	671	516	803
	Marzo 22	-	389	695	-	1020
P10	Octubre 21	625	379	720	-	657
	Marzo 22	883	406	561	573	991

Tabla 7. Concentraciones de metales pesados en sedimentos (mg/kg base seca) de acuerdo a las tablas de referencia (NOOA, 2008)

Análisis		SEDIMENTO AGUA DULCE									SEDIMENTO MARINO						
Concentraciones en ppm peso seco		Background ¹	ARCS H. azteca TEL 2	TEC 3	TEL 3	LEL 4	PEC 3	PEL 3	SEL 4	UET 1	_T205	TEL 6	ERL 6	T50 5	PEL 6	ERM 6	AET 7
Predicción de gradiente de toxicidad				INCREMENTO							INCREMENTO						
Aluminio (%)	Al	0.26%	2.55%														1.8% N
Antimonio	Sb	0.16								3 M	0.63			2.4			9.3 E
Arsénico	As	1.1	10.798	9.79	5.9	6	33	17	33	17 I	7.4	7.24	8.2	20	41.6	70	35 B
Bario	Ba	0.7										130.1 #					48 A
Cadmio	Cd	0.1-0.3	0.583	0.99	0.596	0.6	4.98	3.53	10	3 I	0.38	0.68	1.2	1.4	4.21	9.6	3 N
Cromo	Cr	7_10	36.286	43.4	37.3	26	111	90	110	95 H	49	52.3	81	141	160	370	62 N
Cobalto	Co	10				50+											10 N
Cobre	Cu	10_25	28.012	31.6	35.7	16	149	197	110	86 I	32	18.7	34	94	108	270	390 MO
Hierro (%)	Fe	0.99-1.8 %	18.64%			2.00%				4% I							22% N
Plomo	Pb	4_17	37	35.6	35	31	128	91.3	250	127 H	30	30.24	46.7	94	112	216	400 B
Manganeso	Mn	400	630			460			1100	1100 I							260 N
Mercurio	Hg	0.004-0.051		0.16	0.174	0.2	1.06	0.486	2	0.56 M	0.14	0.13	0.15	0.48	0.7	0.71	0.41 M
Níquel	Ni	9.9	19.514	22.7	16	16	46.6	36	75	43 H	15	15.9	20.9	47	42.6	51.6	110 EL
Selenio	Se	0.29															1_A
Plata	Ag	<0.5				0.5+				4.5 H	0.23	0.73	1	1.1	1.77	3.7	3.1 B
Estroncio	Sr	49															
Estañio	Sn	5										0.046 *					> 3.4 N
Vanadio	V	50															57 N
Zinc	Zn	7_38	96	121	123	120	459	315	820	520 M	94	124	150	245	271	410	410 I
Plomo 210 bq/g dw						0.0006^			< 0.0087^								
Polonio 210 bq/g dw						0.0006^			< 0.0087^								
Radio 226 bq/g dw						0.0001^			< 0.013^								
Sulfatos										130 M							4.5 MO
# - Basado en SLC approach usando especies sensibles HC5%; ES&T 2005 39(14):5148-5156.										Fuentes							
* - Basado sobre EQp approach usando actuales AWQC CCC										1 - Buchman, M. 1999. NOAA HAZMAT Report 99-1.							
^ - Basado en SLC approach para derivar LEL y SEL; Env'al Monitor & Ass'ment 2005 110:71-85										2 - EPA 905-R-96-008							
+ - Tomado de Open Water disposal Guidelines, tratado como LEL para decisiones de manejo.										3 - Arch ET&C 2000, 39(1)20- TEL and PEL are also known as Canadian ISQGs and PELs							
										4 - Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario Aug 1993							
										5 - ET&C 2002, 21(9)1993-							
A - Amphipodo N - Neanthes; L - Bioensayo con larvas; plus, I - Impacto comunidades de fauna																	

Tabla 8. Concentraciones de referencia de metales pesados en agua para consumo humano (mg/L) de acuerdo a las guías en el mundo (Öztürk et al., 2009)).

Guía/ referencias	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb
OMS “WHO”, 1993	0.01	0.05	2	-	0.02	0.05
EPA, 2002	0.01	0.05	1.3	0.3	-	0.05
EC, 1998	0.005	0.05	2	0.2	0.002	0.001
WPCL, 2004	0.003	0.02	0.02	0.3	0.02	0.01