



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



Facultad de Biología

Facultad de Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería Civil

**"CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN SUELOS AGRÍCOLAS
EN LA RIBERA OESTE DEL LAGO DE CUITZEO"**

Tesis:

Para obtener el grado de Maestra en Ciencias en
Ingeniería Ambiental

Presenta:

NELI SAIDÉ HERNÁNDEZ MORQUECHO

Ingeniera Ambiental

Asesora de tesis:

Dra. María Alcalá De Jesús

Co-asesora:

Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva

Morelia, Michoacán, noviembre de 2018.

AGRADECIMIENTOS

*A **CONACYT** por el apoyo económico otorgado durante los dos años para estudiar el posgrado.*

*Al **Laboratorio de Edafología (Edificio B-4)** de la facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por brindarme un espacio, equipo y material para trabajar en los análisis de suelo.*

*Al **Laboratorio del posgrado de Ingeniería Química** de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitirme realizar los análisis de metales pesados.*

*Al **Laboratorio de Edafología del Instituto Tecnológico Del Valle De Morelia** por el apoyo en la realización de análisis de suelo.*

*A mi asesora la **Dra. María Alcalá De Jesús** y co-asesora la **Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva**. Que confiaron en mí para llevar a cabo este proyecto brindándome apoyo incondicional y compartiéndome sus conocimientos para que este proyecto se realizara.*

*A los sinodales. **Dra. Isabel Israde Alcántara, M.C. Adriana Fernández Pérez, Dr. Juan Manuel Ortega Rodríguez**. Un sincero agradecimiento por ser parte de esta investigación y haberme brindado las asesorías necesarias para desarrollarla satisfactoriamente.*

*A **Mariela Casillas Corona y Juan Luis Mora Rosas**. Quienes con su experiencia y conocimientos adquiridos durante su formación académica me brindaron todo su apoyo en el desarrollo de esta investigación.*

DEDICATORIA

A mis padres María Morquecho Valdez y Agustín Hernández Fierros. Por darme la vida y apoyarme siempre en todas mis decisiones, por brindarme fuerzas para continuar con mis estudios, por darme amor, consejos y valores, los cuales solo se consiguen en una gran familia, por enseñarme que no hay imposibles cuando se quiere salir adelante.

A mis hermanos, Jorge, Carlos y Marco Antonio. Por ayudarme incondicionalmente y estar conmigo en todo momento, gracias por ser parte de este éxito, por sacrificarse para que yo llegara a ser alguien en la vida.

A mi abuelita Ma'Cuca. Que más que ser mi abuelita fue una hermana, una amiga y una compañera, gracias por llenarme de sabios consejos durante 21 años que estuviste a mi lado y aunque ya no estés conmigo sé que te enorgullecerá saber que pude culminar un posgrado como tanto lo anhelabas y me atrevo a decir que de no haber sido por ti me hubiera rendido con el primer obstáculo.

A Jossué Martínez. Quién ha estado conmigo en los momentos más difíciles y de quien he recibido apoyo y amor incondicional. Gracias por ser parte de este logro, gracias por ser parte de mi vida.

ÍNDICE

	Página
Índice.....	I
Índice de cuadros.....	III
Índice de figuras.....	IV
Resumen.....	VII
Abstract.....	VIII
1 Introducción.....	1
2 Marco teórico.....	4
2.1. La contaminación del ambiente.....	4
2.2. Metales pesados (MP).....	4
2.3. Contaminación de los suelos por MP en México.....	5
2.4. Formas de retención y disponibilidad de los MP en el suelo.....	6
2.5. Factores que afectan la biodisponibilidad de los MP.....	7
2.5.1. pH.....	7
2.5.2. Textura.....	7
2.5.3. Condiciones de óxido-reducción.....	7
2.5.4. Materia orgánica.....	8
2.5.5. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).....	8
2.6. Metales pesados y su afectación en la salud.....	8
3. Antecedentes.....	13
3.1. Agua.....	13
3.2. Suelo.....	14
3.3. El Lago de Cuitzeo.....	16
4. Justificación.....	19
5. Hipótesis.....	21
6. Objetivos.....	21
6.1 Objetivo general.....	21
6.2 Objetivos específicos.....	21

7. Materiales y métodos.....	22
7.1. Ubicación.....	23
7.1.1. Clima.....	24
7.1.2. Geología.....	25
7.1.3. Suelos.....	27
7.2 Selección de los sitios de estudio.....	29
7.2.1. Trabajo de campo.....	30
7.2.2. Trabajo de laboratorio.....	30
7.3 Análisis físicos.....	33
7.3.1 Color.....	33
7.3.2 Textura.....	33
7.3.3 Densidad aparente.....	33
7.4 Análisis químicos.....	33
7.4.1 Reacción de suelo (pH) y conductividad eléctrica (CE).....	33
7.4.2 Materia orgánica.....	33
7.4.3 Capacidad de intercambio catiónico.....	33
7.4.4. Bases intercambiables.....	34
7.5. Clasificación de propiedades físicas y químicas de los suelos...	34
7.6. Metales pesados y el metaloide arsénico.....	34
7.7. Límites permisibles de metales pesados y del metaloide As.....	36
7.8. Encuestas.....	36
7.9. Distribución espacial de las propiedades físicas, químicas y de los elementos traza	37
8. Resultados.....	38
9. Conclusiones.....	77
10. Recomendaciones.....	78
11. Bibliografía.....	79

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Formas químicas de los metales en el suelo y su disponibilidad para las plantas.....	6
Cuadro 2. Concentración de metales pesados en las aguas de riego en Tula, Hidalgo.....	14
Cuadro 3. Georreferencia de los sitios de estudio en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	32
Cuadro 4. Clasificación de los parámetros físicos y químicos de suelos (Muñoz <i>et al.</i> , 2013 y NOM-023-SEMARNAT- 2001).....	35
Cuadro 5. Límites máximos permisibles de metales pesados en suelos.....	36
Cuadro 6. Formato para realizar encuestas a los agricultores de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	37
Cuadro 7. Propiedades físicas de suelos agrícolas en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	41
Cuadro 8. Propiedades químicas de suelos agrícolas en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	48
Cuadro 9. Concentración de elementos traza en suelos de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	60
Cuadro 10. Resultados de las encuestas.....	75
Cuadro 11. Elementos traza en fertilizantes de acuerdo con Wilcke y Dohier (1995).....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Diagrama de la metodología de investigación.....	22
Figura 2. Ubicación de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	24
Figura 3. Geología de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	26
Figura 4. Suelos de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	28
Figura 5. Localización de los sitios de estudio en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	31
Figura 6. Ubicación y nomenclatura de los sitios de estudio.....	39
Figura 7. Porcentaje de partículas en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	42
Figura 8. Distribución del porcentaje de partículas en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	43
Figura 9. Distribución de la clase textural en suelos de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	44
Figura 10. Densidad aparente en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	46
Figura 11. Distribución de la Densidad aparente en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	47
Figura 12. pH en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	50
Figura 13. Distribución de pH en suelos de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	51
Figura 14. Conductividad eléctrica en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	52

Figura 15. Distribución de la conductividad eléctrica en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	53
Figura 16. Materia orgánica en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	54
Figura 17. Distribución de materia orgánica en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	55
Figura 18. Capacidad de intercambio catiónico en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	56
Figura 19. Distribución de la capacidad de intercambio catiónico en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	57
Figura 20. Cationes intercambiables en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	58
Figura 21. Distribución espacial de cationes intercambiables en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	59
Figura 22. Arsénico en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	62
Figura 23. Distribución de Arsénico en suelos de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	63
Figura 24. Cadmio en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo	64
Figura 25. Distribución de Cadmio en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	65
Figura 26. Cobre en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	66
Figura 27. Distribución de Cobre en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	67
Figura 28. Hierro en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	69

Figura 29. Distribución de Hierro en suelos de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	70
Figura 30. Níquel en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	71
Figura 31. Distribución de Níquel en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	72
Figura 32. Zinc en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	73
Figura 33. Distribución del Zinc en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.....	74

RESUMEN

La contaminación por elementos traza (*ET*) en el suelo provoca daños al medio ambiente y en la salud humana. En la ribera oeste del lago de Cuitzeo se han reportado *ET* en suelos cercanos a las descargas de aguas residuales y, en los campos agrícolas; los *ET* también llegan al suelo vía fertilizantes.

Se presenta la relación entre los *ET* y, las propiedades físicas y químicas de suelos agrícolas, y se establece la relación con el uso de fertilizantes. Se determinaron los parámetros físicos y químicos así como la concentración de *ET* en suelos agrícolas; se realizaron encuestas a los agricultores para conocer el tipo de fertilizante que aplican y con el apoyo de la literatura se estableció la relación fertilizante-*ET*.

Los suelos presentan texturas de clase arcillosa, arcillo arenosa y franco arcillosa; la MO varía de muy baja (0.19%) a muy alta (10.94%); la CIC es de clase media (16 $\text{cmol}_{(+)}$ kg^{-1}) a muy alta (70 $\text{cmol}_{(+)}$ kg^{-1}) con promedio de 40 $\text{cmol}_{(+)}$ kg^{-1} . El pH oscila de neutro (6.7) a fuertemente alcalino (8.5 a más). La concentración de *ET* (mg kg^{-1}) más alta es para el As, 12.56 y para Cd, 2.8; Cu, 19.7; Fe, 25 581; Ni, 33.5 y Zn, 76.5. La MO influye en la retención de los *ET*, ya sea mediante el intercambio catiónico o por la formación de complejos que disminuyen la posibilidad de que los *ET* estén disponibles en el medio; las arcillas se relacionan con la CIC y también proporcionan al suelo alta capacidad para fijar *ET*. El pH es adecuado para la disponibilidad de los *ET*. En los suelos estudiados, los *ET* se relaciona directamente con los fertilizantes urea y sulfato de amonio que se aplican hasta tres veces por ciclo de siembra durante la rotación de cultivos; los fertilizantes aportan en concentraciones permisibles Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn. De acuerdo con las propiedades de los suelos antes mencionadas, los *ET* pueden estar inmovilizados, disminuyendo su disponibilidad en el medio y aunque en pequeñas concentraciones, estos son acumulables. En cuanto al **Cd**, éste rebasa el límite máximo permisible de acuerdo con la normatividad de la Agencia ambiental Holandesa.

Palabras clave: Contaminación, salud, metales, fertilizantes, enfermedades.

ABSTRACT

Trace element (*ET*) contamination in the soil causes damage to the environment and human health. On the west bank of Lake Cuitzeo *ET* have been reported in soils close to wastewater discharges and, in agricultural fields; the *ET* also reach the ground via fertilizers. The relationship between *ET* and the physical and chemical properties of agricultural soils is presented, and the relationship with the use of fertilizers is established. The physical and chemical parameters were determined as well as the concentration of *ET* in agricultural soils; Surveys were conducted to farmers to know the type of fertilizer applied and with the support of the literature the fertilizer-*ET* relationship was established. The soils present textures of clayey class, sandy clayey and loamy clay; the MO varies from very low (0.19%) to very high (10.94%); CIC is middle class (16 $\text{cmol}_{(+)}$ kg^{-1}) at very high (70 $\text{cmol}_{(+)}$ kg^{-1}) with an average of 40 $\text{cmol}_{(+)}$ kg^{-1} . The pH ranges from neutral (6.7) to strongly alkaline (8.5 to more). The highest concentration of *ET* (mg kg^{-1}) is for As, 12.56 and for Cd, 2.8; Cu, 19.7; Faith, 25 581; Ni, 33.5 and Zn, 76.5. The MO influences the retention of *ETs*, either through cation exchange or the formation of complexes that reduce the possibility that *ETs* are available in the environment; the clays are related to the CIC and also provide the soil with high capacity to fix *ET*. The pH is suitable for the availability of *ET*. In the studied soils, the *ETs* are directly related to the fertilizers urea and ammonium sulfate that are applied up to three times per planting cycle during the rotation of crops; the fertilizers provide Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in permissible concentrations. According to the properties of the aforementioned soils, the *ET* can be immobilized, decreasing their availability in the medium and although in small concentrations, they are cumulative. As for the Cd, it exceeds the maximum permissible limit in accordance with the regulations of the Dutch Environmental Agency.

1. INTRODUCCIÓN

Los metales pesados (MP) también conocidos como elementos traza (*ET*) debido a su tamaño, son elementos químicos metálicos de alta densidad y son tóxicos en concentraciones bajas como en el caso del Cd, As, Cr y Pb, entre otros. Se encuentran, tanto de manera natural como antropogénica en la corteza terrestre en forma de minerales, sales y aportados por actividades del hombre, tales como la industria, por combustión fósil así como por el uso de fertilizantes y plaguicidas (Abollino *et al.*, 2002).

Los *ET* han tenido gran impacto, tanto en el campo ambiental como en el de salud pública. Los daños que causan son severos y en ocasiones están ausentes de síntomas. La exposición de estos elementos por vías respiratorias puede ocasionar cáncer en los pulmones e irritación en la piel. Los *ET* ocurren en medios como el agua, el aire y el suelo, éste último es afectado principalmente en el área agrícola (Bautista, 1999).

Las propiedades físicas y químicas del suelo influyen de manera directa con los *ET*, estos pueden formar complejos con las arcillas y con la materia orgánica, y migrar a los horizontes más profundos o mantenerse en la solución del suelo. La capacidad de intercambio catiónico indica el potencial de un suelo para retener e intercambiar *ET* dejándolos disponibles o inmóviles. En suelos ácidos, la solubilidad y absorción de los *ET* es favorable, en cambio, en medios alcalinos, se precipitan como hidróxidos.

En localidades del municipio de Copándaro, Michoacán, al sur de la ribera del Lago de Cuitzeo se ha reportado la presencia de As, Cr, Cd, Ni, Cu, Zn y Fe en

suelos cercanos a las descargas de agua residual así como en sedimentos y polvos en concentración menor a lo establecido en las Normas oficiales, sin embargo, su presencia es bioacumulable. También se ha reportado As en un pozo de agua de San Agustín del Maíz, cuya concentración (0.025 mg L^{-1}) rebasó el límite permisible. La presencia de As, Cr, Ni y Zn está asociada con las enfermedades gastrointestinales, respiratorias y dermatológicas que se manifiestan en la gente del municipio de Copándaro, Michoacán en la época de sequía cuando se presentan fuertes tolvaneras (Casillas, 2016), temporada en la que las partículas de suelo con los *ET* son trasladadas mediante el viento a varias zonas y se ponen en contacto no sólo con la gente, sino también caen en los campos agrícolas.

Mediante la actividad agrícola también puede contaminarse el suelo con *ET* a través de la aplicación de fertilizantes como fosfonitrato, sulfato de amonio, urea, estiércol y purines (Wilcke y Dohier, 1995). En la ribera oeste del lago de Cuitzeo se practica la agricultura y se fertiliza al suelo principalmente con urea y sulfato de amonio, fertilizantes que de acuerdo con Wilcke y Dohier (1995) aportan concentraciones en mg kg^{-1} de *ET* dentro de los límites máximos permisibles cada vez que los aplican, por ejemplo, el Cd (0.15), Cr (10.7), Cu (2.4), Ni (5.4), Pb (0.77) y Zn (2.4).

Lo anterior, aunque en concentraciones menores según las normas oficiales, indica la presencia de metales pesados en los suelos agrícolas que por diversos medios se acumulan en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo, zona en donde se carece de información que relacione a los *ET* con las propiedades de los suelos

en áreas agrícolas. El objetivo de esta investigación es determinar la presencia de *ET* en suelos agrícolas y establecer su relación con las propiedades físicas y químicas de estos últimos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. La contaminación del ambiente

El término contaminación se refiere a la introducción o incremento anormal de sustancias que pueden ejercer un efecto dañino sobre los organismos en los ecosistemas. A veces, la contaminación es de origen natural, pero en general, está relacionada con la actividad del hombre, que en su búsqueda de supervivencia y bienestar dispersa sustancias agresivas, algunas de las cuales pueden ser transformadas por los organismos vivos (biodegradables) y otras que son persistentes (no biodegradables).

Las sustancias naturales pueden ocasionar daños ecológicos importantes; sin embargo, a corto plazo serán degradadas; en cambio, las sustancias sintéticas, por no ser biodegradables, ingresarán a las redes tróficas y a lo largo de los niveles tróficos se incrementará su concentración (Bautista, 1999).

2.2. Metales pesados (MP)

El término MP es utilizado en el campo de las ciencias ambientales y es asociado a los metales que causan un impacto ambiental debido a su toxicidad. Los MP son elementos químicos con una densidad superior a 6.0 g cm^{-3} . Todos los metales de transición pueden considerarse MP, excepto: el Ti que tiene una densidad de 4.5 g cm^{-3} , pero que también se considera MP y el As, que a pesar de ser considerado un no metal, por su alta densidad de 5.7 g cm^{-3} y por algunas propiedades de carácter ambiental, se le clasifica como MP (Domènech y Pera, 2006).

2.3. Contaminación de los suelos por MP en México

Se considera que los países en desarrollo como México, aún no presentan fuertes problemas de contaminación por MP como ocurre en los países industrializados; sin embargo, en México se han generado y se siguen produciendo desechos mineros denominados *jales*, que contienen grandes cantidades de MP que son expuestos al ambiente y que en algunos casos ya constituyen graves problemas de contaminación. De la misma manera, la generación de lodos residuales con cantidades altas de metales pesados en las ciudades grandes y medianas, son un problema de manejo (Bautista, 1999).

Los daños en el medio ambiente son graves y cambian la alcalinidad del suelo, lo cual depende de la concentración. Los MP contaminan el agua y los cultivos. En éstos, si la cantidad es excesiva se producen alteraciones en las plantas y el suelo se degrada, lo que disminuye su productividad; si la contaminación es excesiva, llega a producir desertificación. En los ríos y lagos, también afectan a la fauna. La contaminación del medio ambiente por MP es un efecto silencioso, no se ve y cuando manifiesta el daño que producen, ya es tarde (Romero, 2009). Cada problema de contaminación presenta particularidades, debido al tipo de MP, especie química y mezclas de ellos, así como a las características y procesos de los diferentes suelos. Es decir, que las medidas de solución que funcionan para un determinado lugar pueden no funcionar para otro (Bautista, 1999).

Para mantener las demandas del mercado, se han implementado cultivos intensivos que incrementan el uso de fertilizantes, pesticidas y el uso de prácticas agrícolas, que llegan a degradar al suelo (Valenzuela, 2014).

2.4. Formas de retención y disponibilidad de los MP en el suelo

Los MP pueden presentarse en el suelo de las siguientes formas (Domènech y Pera, 2006):

1. Solubles en la solución del suelo.
2. Como iones intercambiables de los coloides que integran el complejo de cambio.
3. Formando complejos con la materia orgánica.
4. Adsorbidos en los óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al, sulfuros y fosfatos.
5. Como constituyentes de los minerales secundarios del suelo.

Los MP son retenidos en los suelos de distintas formas, ésto representa diferentes grados de disponibilidad para las plantas (Bautista, 1999) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Formas químicas de los metales pesados en el suelo y su disponibilidad para las plantas (Bautista, 1999).

Formas de retención del suelo	Disponibilidad relativa
Ión en la disolución del suelo	Fácilmente disponible
Ión en complejo de intercambio Orgánico o inorgánico	Disponible
Metales complejados o quelatados por compuestos orgánicos	Menos disponible
Metal precipitado o coprecipitado	Sólo si ocurre una alteración química
Incorporado en la matriz biológica	Después de la descomposición
Metal en la estructura mineral	Después de la alteración mineral

2.5. Factores que afectan la biodisponibilidad de los MP

Para conocer el comportamiento de los MP en los suelos se deben considerar las siguientes propiedades: pH, textura, condiciones de óxido-reducción, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y la presencia de otros elementos (Galán y Romero, 2010).

2.5.1. pH. Es el principal factor de control de la disponibilidad de los metales para las plantas. En su mayoría, los MP tienden a estar más disponibles en pH ácido, lo que mejora, tanto su solubilidad como su absorción por las raíces de las plantas. En el caso del As, Se y Cr, el incremento del pH del suelo no provoca disminución en su disponibilidad. El pH es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH de alcalinidad moderada se produce la precipitación como hidróxidos. Sin embargo, en medios muy alcalinos, éstos hidróxidos pueden pasar de nuevo a la solución como hidroxicomplejos. Por otra parte, metales como el As y el Cr pueden estar en la disolución del suelo en forma de aniones solubles.

2.5.2. Textura. Los suelos de textura fina proceden de minerales secundarios que se alteran con facilidad y que son en general la fuente principal de los MP, en cambio, los suelos de textura gruesa tienen minerales primarios como el cuarzo con bajo contenido en MP.

2.5.3. Condiciones de óxido-reducción. El Cd, Zn, Ni, Co, Cu y Pb forman sulfuros relativamente insolubles en condiciones de reducción fuerte; el Fe y el Mn pueden volverse más solubles.

2.5.4. Materia orgánica. Este parámetro presenta una alta afinidad por metales como el Co, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn, reacciona con ellos e influye en su disponibilidad. La disponibilidad de los metales se asocia con la formación de complejos con las sustancias húmicas y con otros compuestos de alto peso molecular. Una vez que los metales forman complejos, éstos pueden migrar más fácil a las capas profundas o mantenerse en la solución del suelo como complejos orgánicos solubles.

2.5.5. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). La CIC es una función del contenido de arcilla y de la materia orgánica del suelo; la CIC controla la disponibilidad de los metales. Un incremento en la CIC, produce un aumento en el tiempo en que los metales se encuentran disponibles para las plantas, dado que aumenta la capacidad del suelo para fijarlos.

2.6. Metales pesados y su afectación en la salud

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016) las enfermedades causadas por la exposición con MP son las siguientes:

Plomo (Pb). El Pb es un metal tóxico de forma natural en la corteza terrestre. Su uso ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública.

Entre las principales fuentes de contaminación ambiental destacan la explotación minera, la metalurgia, las actividades de fabricación y reciclaje y,

en algunos países, el uso constante de pinturas y gasolinas con Pb. Más de tres cuartas partes del consumo mundial de Pb corresponden a la fabricación de baterías de plomo-ácido para vehículos de motor. Este metal también se utiliza en productos como pigmentos, pinturas, material de soldadura, vidrieras, vajillas de cristal, municiones, esmaltes cerámicos, artículos de joyería y juguetes, así como en algunos productos cosméticos y medicamentos tradicionales. No existe un nivel de exposición al Pb que pueda considerarse seguro.

Efectos del Pb en la salud:

- Es una sustancia tóxica que se acumula en el organismo afectando a diversos sistemas y en especial daña en los niños de corta edad.
- Se distribuye por el organismo hasta alcanzar el cerebro, el hígado y los riñones y, se deposita en dientes y huesos en donde se acumula con el paso del tiempo. Para evaluar el grado de exposición humana, se mide la concentración de Pb en la sangre.
- El Pb presente en los huesos es liberado hacia la sangre durante el embarazo y se convierte en una fuente de exposición para el feto.

Cadmio (Cd). Por lo general, está presente en el medio ambiente en niveles bajos. Sin embargo, la actividad humana ha incrementado de manera considerable esos niveles. El Cd no se encuentra en el ambiente como un

metal puro, es más abundante en la naturaleza en forma de óxidos complejos, sulfuros y carbonatos en el Zn, Pb y menas de Cu.

El Cd puede recorrer grandes distancias desde la fuente de emisión a través del aire. Se acumula rápidamente en muchos organismos, principalmente en moluscos y crustáceos. También se encuentra en concentraciones, aunque más bajas, en vegetales, cereales y tubérculos ricos en almidón.

Efectos del Cd en la salud:

- Es tóxico en los riñones, en los sistemas óseo y respiratorio; además, está clasificado como carcinógeno para los seres humanos.

Cromo (Cr). Se encuentra en la naturaleza de forma natural en gran diversidad de alimentos como oligoelemento (Cr III), pero también puede contaminarlos en su forma tóxica (Cr VI); se transmite al ser humano al consumirlo en los alimentos con concentraciones altas.

Efectos del Cr VI en la salud:

- Los principales órganos afectados por su carcinogenicidad son los pulmones y los senos nasales. La genotoxicidad se ha evidenciado en estudios científicos en donde la exposición a altas dosis de Cr VI les ha provocado aborto a mujeres embarazadas, alteraciones en el desarrollo del esqueleto y sistema reproductivo del feto, y bajo peso de nacimiento.

Arsénico (As). Es un elemento natural de la corteza terrestre; ampliamente distribuido en el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y en la tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico.

La exposición prolongada al As inorgánico a través del consumo de agua contaminada o comida preparada con esta y cultivos alimentarios regados con agua rica en As puede causar intoxicación crónica.

Efectos del As en la salud:

- La exposición al As inorgánico puede causar varios efectos sobre la salud, como es irritación del estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel e irritación de los pulmones. Es sugerido que la toma de significantes cantidades de As inorgánico puede intensificar las posibilidades de desarrollar cáncer, en especial de piel, pulmón e hígado.
- A exposiciones muy altas de As inorgánico causa infertilidad y abortos en mujeres, puede causar perturbaciones de la piel y en el corazón, pérdida de la resistencia a infecciones y daño del cerebro tanto en hombres como en mujeres. El As inorgánico puede dañar el ADN. El As orgánico no causa cáncer ni daño al ADN. Pero exposiciones a dosis altas puede ocasionar lesión de nervios y dolores de estómago.

Níquel (Ni). Ocurre en forma natural en la corteza terrestre combinado con otros elementos. Se encuentra en todos los suelos y es liberado por volcanes. El Ni es el número 24 en la lista de elementos más abundantes. En el ambiente se encuentra principalmente combinado con oxígeno o azufre en forma de óxidos o

sulfuros. El Ni también se encuentra en meteoritos y en el fondo del océano formando masas de minerales llamadas nódulos del fondo del mar.

Efectos del Ni en la salud

Los efectos más graves por exposición al Ni son bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar, así como cáncer de los pulmones y los senos nasales.

3. ANTECEDENTES

3.1. Agua

La concentración en $\mu\text{g L}^{-1}$ de MP no esenciales como el Pb (90.15), Cd (1.64) y Cr (50.0) en agua y sedimento de la zona costera del golfo de México y el Caribe mexicano ha incrementado. La ausencia de programas efectivos de vigilancia y control de contaminantes del ambiente costero mexicano, la creciente industrialización y urbanización de esta zona y sobre todo la falta de una verdadera aplicación de normas ambientales han ocasionado que 30% de los ríos y las lagunas del Golfo de México estén contaminados (Villanueva y Botello, 1992).

El estudio del As en la región Lagunera se ha centrado en la calidad y recuperación del agua extraída del subsuelo que contiene concentraciones altas mayores a 0.20 mg L^{-1} . Diversas investigaciones han establecido que la adición de fertilizantes fosfatados en suelos agrícolas, favorece la disponibilidad del As en la solución del suelo (Hernández *et al.*, 2013).

El As es uno de los metaloides más tóxicos en el medio ambiente y la especiación de este depende de factores químicos, físicos y biológicos. La distribución y contaminación del As se debe a procesos naturales y antropogénicos, y su problemática es consecuencia de su fácil movilización en el ambiente. Las altas concentraciones de As en agua y suelo se han convertido en un problema global, ya que las exposiciones prolongadas a este metaloide pueden causar daños crónicos a la salud (Rangel *et al.*, 2015).

3.2. Suelo

La acumulación y disponibilidad de MP en suelos regados con aguas residuales en el distrito de Riego 03 en Tula, Hidalgo, México fue evaluada por Siebe (1994). La concentración de MP encontradas se muestran en el Cuadro 2. Se atribuye que los metales introducidos a través del riego tienden a acumularse en la capa arable de los suelos mostrando después de 80 años, concentraciones de tres a seis veces mayores que en sitios con cultivo de temporal, aunque sin llegar aún a niveles críticos. La disponibilidad de Cd, Pb y Zn es moderada, la cual incrementa con el riego al paso de los años, siendo el Cd el más disponible. El Cu tiende a ser retomado por las plantas en menor cantidad, atribuible a su inmovilización por la materia orgánica adicionada a los suelos por medio del agua residual.

Cuadro 2. Concentración de metales pesados en las aguas de riego en Tula, Hidalgo (Siebe, 1994).

Canal	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr
	-	-	mg kg ⁻¹	-	-
Requena	0.08	-	0.13	0.31	0.11
Tlamaco-Juandhó	0.10	0.005	0.12	0.37	0.09
Atotonilco	0.80	0.005	0.10	0.26	0.08
El Salto Tlamaco	0.15	0.006	0.21	0.60	0.13

La contaminación por Pb en suelos de Torreón, Coahuila, México fue la causa de varios envenenamientos, lo encontraron en la sangre de niños, los primeros resultados fueron en marzo de 1999. Analizaron casi cinco mil muestras y casi 90% de los niños presentan niveles inaceptables de Pb en la sangre (más de 10 µg dL⁻¹), de los cuales, aproximadamente 50% tiene niveles mayores de 25 µg

dL⁻¹ que ameritan intervención clínica. El Pb se encontraba en el suelo junto con As y Cd (Valdés, 1999).

La actividad agrícola del estado de Sonora se caracteriza por ser de las más desarrolladas del país, es altamente productiva, tecnificada y generadora de divisas. Para mantener las demandas del mercado ha sido necesario implementar cultivos intensivos y el uso indiscriminado de agroquímicos, lo que ha provocado la contaminación del suelo (Valenzuela, 2014).

Los plaguicidas organoclorados tienen una toxicidad significativa en plantas o animales, incluyendo los seres humanos. Las dioxinas se producen cuando la materia orgánica se quema en presencia de cloro. Insecticidas como el DDT son contaminantes orgánicos persistentes que suponen un peligro cuando se liberan en el medio ambiente, han sido utilizados desde 1950 hasta 1991, principalmente en el cultivo de algodón. En países industrializados fueron prohibidos o restringidos desde 1970 y en México a partir de 1991. Los plaguicidas organoclorados representan un riesgo para la salud y el medio ambiente por su toxicidad, bioacumulación, volatilidad y persistencia (Valenzuela, 2014).

Se evaluó de manera preliminar el contenido de MP en suelos agrícolas regados con agua del río Lerma, con agua de pozo y de temporal, provenientes de 11 sitios localizados en la microcuenca de La Piedad, Michoacán. Se buscaron ocho MP: Fe, Zn, Ni, Pb, Cu, Cd, Cr y el metaloide As. La concentración en mg kg⁻¹ en el suelo del Zn, 655; As, 28.7 y el Fe no fue posible compararlo con alguna normatividad; referencias indican que los contenidos totales máximos de Fe

encontrados en diferentes estudios corresponden a Italia con 37 000 mg kg⁻¹ y Austria con 13 300 mg kg⁻¹, cifras que son superadas por todos los sitios analizados en este trabajo. El Ni, Pb y Cu se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles en México y en el mundo. No se detectó Cd y Cr (Cira, 2012).

En las ciudades se generan materiales de deshecho que contaminan el ambiente como los MP y otros no metales llamados elementos potencialmente tóxicos (EPT). Su generación y distribución dependen del uso de suelo y del tipo de viabilidad. Los EPT afectan a diversos ecosistemas, a la salud humana y al suelo. En suelos de Morelia, Mich. analizaron las concentraciones de B, Cd, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, V y Zn considerando la influencia del uso del suelo y la viabilidad. Encontraron que no hubo diferencias significativas entre los usos de suelo, y por tipo de viabilidad, sólo en Zn. En el V (96 mg kg⁻¹), Mn (3640 g kg⁻¹), Pb (430 mg kg⁻¹) y Fe (57 000 g kg⁻¹) rebasaron los límites permisibles por la NOM-147 y la US-EPA (Delgado *et al.*, 2015).

3.3. El Lago de Cuitzeo

El largo periodo de sequía, la alta evaporación y la concentración de sales en el agua y en el sedimento, son factores que limitan el crecimiento de la vegetación acuática en casi todo el lago de Cuitzeo, en especial en la parte occidental y en el centro. De seguir la progresiva pérdida en la captación de agua, se pone en peligro el futuro del lago, la flora y fauna que lo habitan (Moreno y Retana 1995). En la desembocadura del río Grande de la cuenca del Lago de Cuitzeo se han encontrado los siguientes MP, cuya concentración es en µg L⁻¹: Cr, 11.300 y 124;

Cu, 26.200 y 122; Ni, 13.270 y 51; Pb, 27.520 y 57; Zn, 246.040 y 366; As, 29.6 y 22.6. La toxicidad más alta se ha presentado en los sedimentos más que en el agua. Las concentraciones más altas se encontraron en las áreas cercanas a la desembocadura del río Grande, lo cual hace suponer aporte de contaminantes metálicos al lago que proviene de las descargas industriales de la ciudad de Morelia y que son arrastradas por el río (Alfaro, 2010).

La biodisponibilidad y concentración del As, Fe y Zn en muestras de sedimentos y agua en el lago de Cuitzeo se ha reportado por Villalobos *et al.* (2010). El autor menciona que el Fe en los suelos de la región puede ser el responsable de su presencia en los sedimentos y del agua. Reporta que la concentración de As es moderada y de origen natural.

La contaminación de Pb, Cu, Ni y Cd de acuerdo con Kram-Heydrich *et al.* (2004) es de origen antrópico, principalmente por actividad agrícola y aguas residuales. Mencionan que el carbono orgánico y la conductividad eléctrica son buenos indicadores de la contaminación de los sedimentos de lago.

Las infecciones de piel, irritación de ojos y de vías respiratorias se presentan en el municipio de Copándaro, Michoacán en la cuenca del Lago de Cuitzeo, en especial en el periodo de estiaje cuando ocurren las tolvaneras que contienen los sedimentos superficiales del lago. Para el sur de la ribera del Lago se ha reportado la presencia de MP en suelos cercanos a las descargas de agua residual en concentraciones (mg kg^{-1}) dentro de los máximos permisibles: As, 0.003 a 0.009; Cr, 0.05 a 0.196; Cd, 0.215; Ni, 0.338; Cu, 0.892; Zn, 2.050 y Fe,

3.40. También encontró que en aguas residuales, los cloruros y la DBO₅ rebasan los límites establecidos para riego agrícola. En el agua potable, el Cd presentó el límite permisible (0.005 mg L⁻¹) en el Pozo 2 de Santa Rita, y el As sobrepasó el límite (0.025 mg L⁻¹) en el pozo de San Agustín del Maíz. Aunque la concentración de los *MP* en su mayoría es aceptable, se menciona que al estar presentes son bioacumulables. Las enfermedades gastrointestinales, respiratorias y dermatológicas en la población humana se asocian a la presencia de As, Cd, Cr, Ni y Zn encontrados en Copándaro, San Agustín del Maíz y Santa Rita del municipio de Copándaro, Mich. (Casillas, 2016).

En el poblado de Capula, municipio de Morelia, Mich., el agua y el suelo son afectados por los procesos artesanales como consecuencia de la mala disposición de los residuos derivados de las técnicas utilizadas que dan lugar a concentraciones de *ET* mayores a las establecidas en las Normas Oficiales Mexicanas. Analizaron 30 muestras de suelo distribuidas en la localidad. Los resultados indicaron valores de pH en promedio de 6.5, conductividad eléctrica de 431 a 2703 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y texturas francas a franco arenosas. La concentración en mg kg^{-1} de As varió de 0.2 a 2.0, en Cu de 3.7 a 123 y en Zn de 24.9 a 319. Las concentraciones más altas de estos elementos se encuentran en sitios en donde se practica la alfarería, sin embargo, no rebasan las normas oficiales. Por otro lado, en siete de las muestras de suelo, el pH mayor a 7, la conductividad eléctrica entre 400 y 800 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y suelos arenosos permiten que el As esté disponible en el ambiente (González, 2018).

4. JUSTIFICACIÓN

En estudios realizados con anterioridad se ha detectado entre otros, la presencia de *ET* como el As, Cr, Ni y Zn en comunidades del municipio de Copándaro, Michoacán, al sur de la ribera del Lago de Cuitzeo, en suelos a un lado de las descargas de aguas residuales, en sedimentos y polvos; aunque en concentraciones permitidas por las normas oficiales, excepto el As, estos elementos se acumulan; al As se le ha reportado en concentración mayor a la permitida en el Pozo de agua de San Agustín del Maíz. A estos *ET* se les asocia con las enfermedades gastrointestinales, respiratorias y dermatológicas que se manifiestan en las personas, principalmente en la temporada de secas cuando se levantan las partículas de suelos mediante las tolvaneras, se ponen en contacto con la gente y también se depositan en las áreas agrícolas.

Por otra parte, en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo, existen grandes extensiones de suelos agrícolas a los que se les aplica fertilizante, principalmente urea y sulfato de amonio que llevan integrados elementos tóxicos como el Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, elementos que también son bioacumulables. Por las propias actividades del proceso agrícola, estos *ET* junto con las partículas de suelo, se desprenden y mediante el aire se ponen en contacto con la gente y pueden afectar su salud, viéndose también afectado el rendimiento de los cultivos.

Lo anterior, sugiere la presencia de *ET* en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo en donde no hay estudios que indiquen su concentración en suelos agrícolas y que además los relacionen con las propiedades físicas y químicas de estos últimos.

5. HIPÓTESIS

En la ribera oeste del Lago de Cuitzeo, existen elementos traza en suelos de uso agrícola.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Evaluar la presencia de elementos traza en suelos de uso agrícola y establecer su relación con las propiedades físicas y químicas, y con el uso de fertilizantes.

6.2 Objetivos específicos

- Determinar la concentración de elementos traza en suelos agrícolas.
- Analizar la relación de los elementos traza con las propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas.
- Establecer una relación entre los elementos traza y los fertilizantes usados en la región.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar los objetivos planteados en la presente investigación se siguió la metodología mostrada en la Figura 1 en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

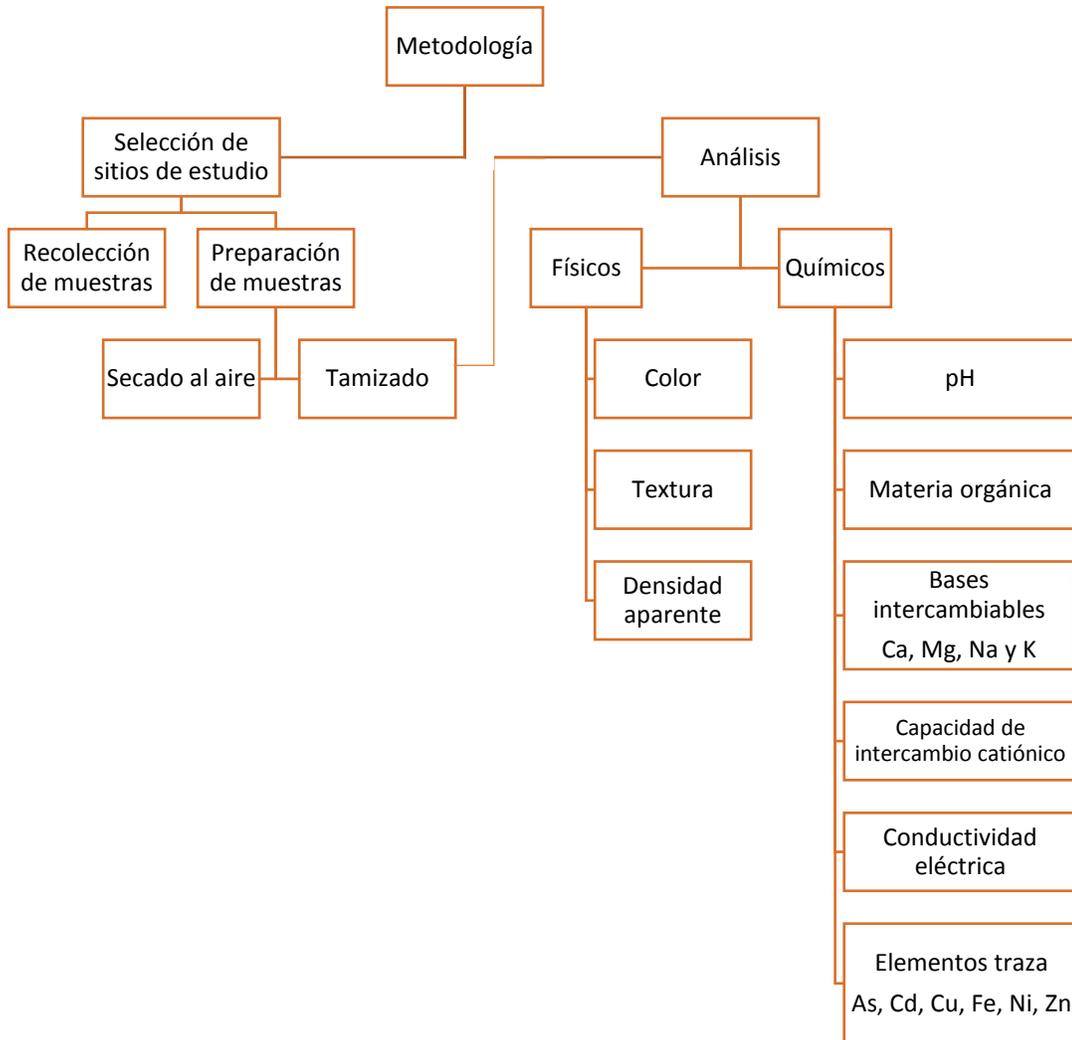


Figura 1. Diagrama de la metodología de investigación.

7.1. Ubicación

El área de estudio se localiza en varias comunidades en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo: Copándaro, San Agustín del Maíz, Santa Rita, El Salitre, Chucándiro, La Estancia, Arúmbaro, Huandacareo, Cuitzeo y San Agustín del Pulque. En los siguientes párrafos se hará una breve descripción de la Cuenca del Lago de Cuitzeo (Figura 2) para enseguida abordar aspectos de las localidades indicadas.

La Cuenca del Lago de Cuitzeo se encuentra al norte del estado de Michoacán entre las coordenadas 19°30' y 20°05' de latitud norte y, 100°35' y 101°30' de longitud oeste; tiene una extensión aproximada de 4000 km². El nombre de Cuitzeo proviene de la palabra purhépecha "cuiseo" que significa "lugar de tinajas" (Bravo *et al.*, 2008).

El lago y las zonas de inundación cubren alrededor de 400 km² en donde se producen beneficios para la región como la regulación del clima de la cuenca, ofrecen sustento y hábitat a varias especies, apoyan la economía de varias comunidades aledañas que practican la pesca y la agricultura de riego (Bravo *et al.*, 2008).

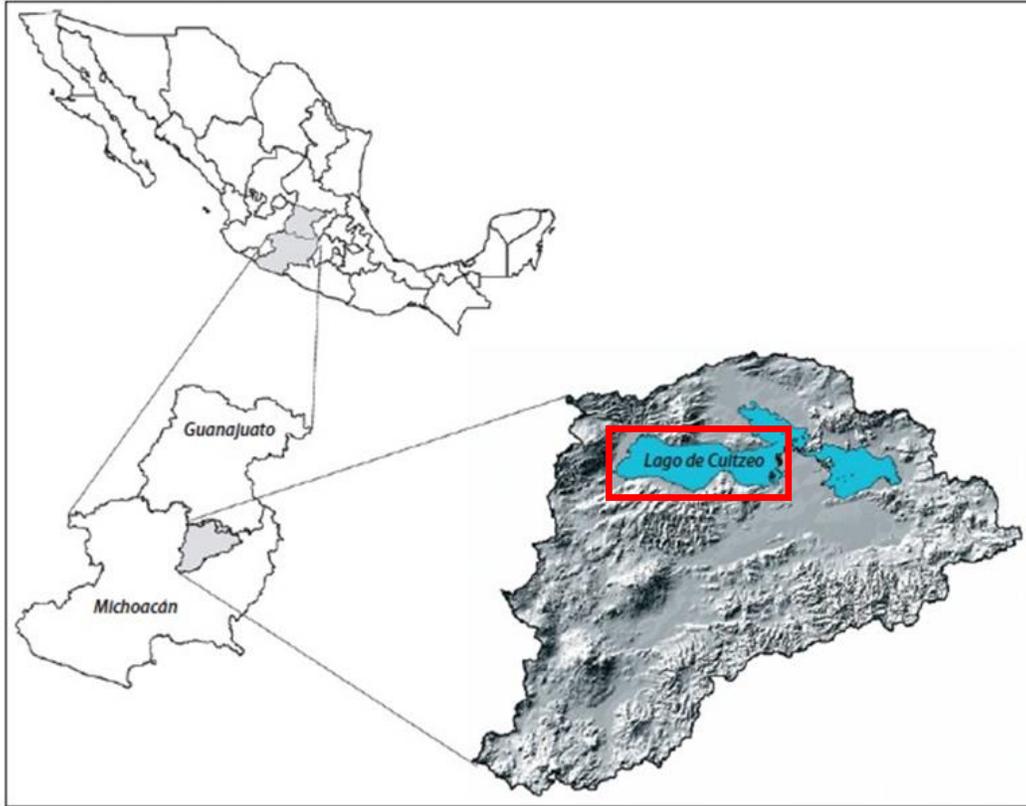


Figura 2. Ubicación de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

 Área de estudio: ribera oeste del Lago.

7.1.1. Clima

En la región del lago de Cuitzeo predominan los climas templados subhúmedos con lluvias en verano (600 a 800 mm anuales). Por ejemplo, en Cuitzeo, Copándaro y Huingo se presenta este clima, pero en algunas localidades es menos húmedo con respecto a los demás. En Cuitzeo por su altitud (1900 m), la temperatura media anual comprendida varía entre 18 y 22 °C, consideradas semicálidas. Hacia el norte del lago, en el Bajío, las temperaturas son más altas, los climas son semicálidos subhúmedos como en Moroleón con régimen de lluvia en verano y menores de 5% de lluvias en invierno. En contraste, hacia el sur, en

la ciudad de Morelia, el clima es un poco más lluvioso, semicálido subhúmedo con escasa lluvia invernal y verano fresco. Por la oscilación de su temperatura media anual es extremo, hay 7 °C de diferencia entre el mes más caliente (mayo) y el más frío (enero), y la marcha de su temperatura es tipo ganges, es decir, que el mes más caliente del año es mayo (Vidal, 2010).

7.1.2. Geología

La geología de la cuenca se puede distinguir por una serie de lomeríos alargados, limitados por fallas este-oeste que corresponden a bloques de rocas volcánicas muy fracturadas que limitan la porción norte y sur del Lago de Cuitzeo y flujos piroclásticos de color rosa (cantera), estas unidades se cubren por secuencias de materiales terrígenos de origen lacustre o fluviolacustre formadas durante el período Mio-Pleistoceno. Las principales rocas son Andesita, Dacita y Riolitas (Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, 2010).

En la cuenca del Lago de Cuitzeo afloran rocas de origen ígneo extrusivo y sedimentario continental. Las primeras se constituyen por derrames de lavas, escorias, aglomerados, tobas y flujos de tobas soldadas, con composiciones que varían de ácida a básica (ignimbritas, andesitas y basaltos) (Figura 3).

Andesita. Roca afanítica que se parece a la dacita, pero que no contiene cuarzo, predominan los feldespatos plagioclasa. La mayoría de las andesitas presentan estructuras bandeadas; esta roca es abundante en corrientes de lava y también en fragmentos de brechas volcánicas (Rico y Del Castillo, 2005).

Dacita. Está compuesta por fenocristales, principalmente de cuarzo y plagioclasa sódica englobada en una matriz microcristalina, el color varía de blanco o amarillo claro, gris o rojo y presenta estructura bandeada (Rico y Del Castillo, 2005).

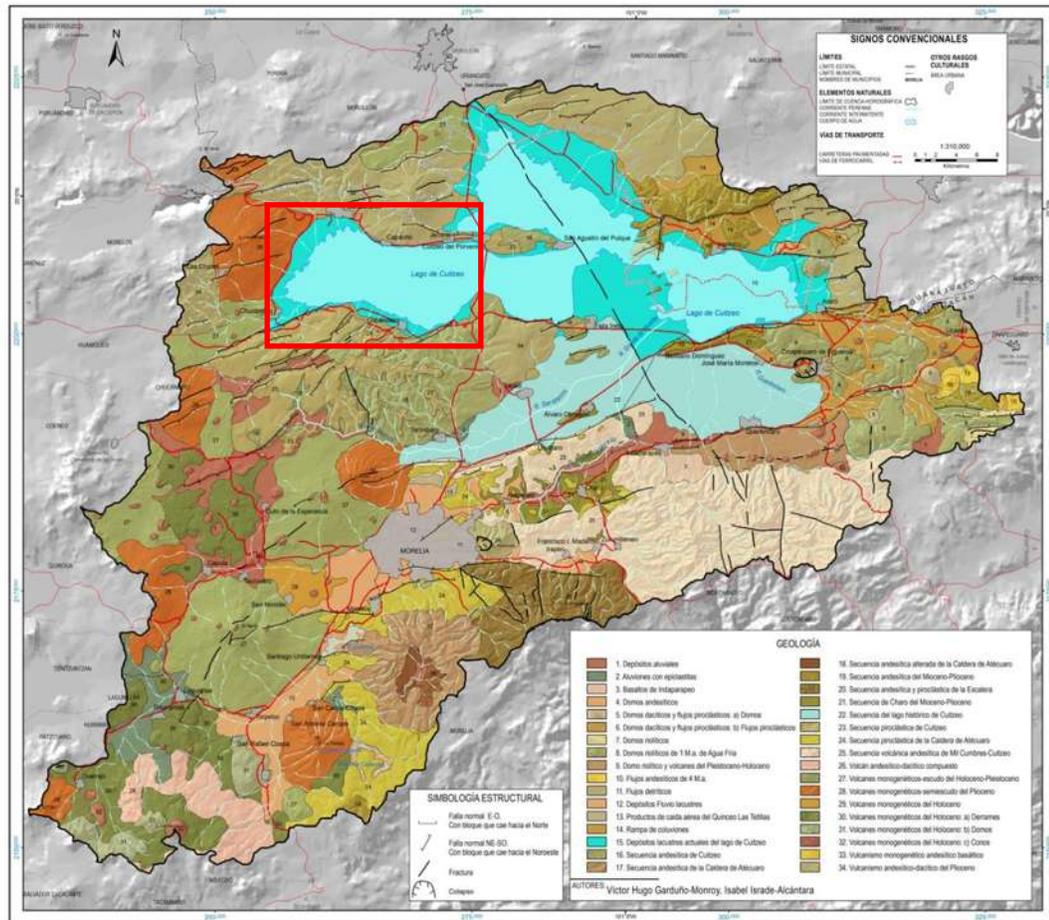


Figura 3. Geología de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Área de estudio: ribera oeste del Lago.

Domo. Se le llama domo al relieve suavemente ondulado y redondeado. Es, en realidad, un anticlinal abombado por las fuerzas internas que elevan los estratos ejerciendo presión hacia arriba en un punto o a lo largo de una línea corta y su composición es de Andesitas y Dacitas.

Domos Monogenéticos. Son pequeños volcanes que tienen una sola expulsión y una existencia corta, en la cuenca del Lago de Cuitzeo se encuentran alineados dentro del sistema Este-Oeste (Noëlle, 2016).

Flujo piroclástico. Son de color rosa (cantera de Morelia) y están cubiertos por secuencias de materiales terrígenos de origen lacustre o fluviolacustre formadas durante el periodo Mio-Pleistoceno (Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, 2010).

7.1.3. Suelos

Los suelos que predominan en la mayor parte de la cuenca del Lago de Cuitzeo son arcillosos, éstos se encharcan y dificultan las labores de labranza, tanto en seco como en húmedo; a pesar de estas condiciones, los suelos son utilizados para la agricultura de temporal y de riego. Los suelos con mejores condiciones tienen el uso forestal, pero el humano los ha introducido en la agricultura provocando erosión (Bravo *et al.*, 2008).

Las unidades de suelos reportados para el área de estudio según Cabrera *et al.* (2010) (Figura 4) son las siguientes:

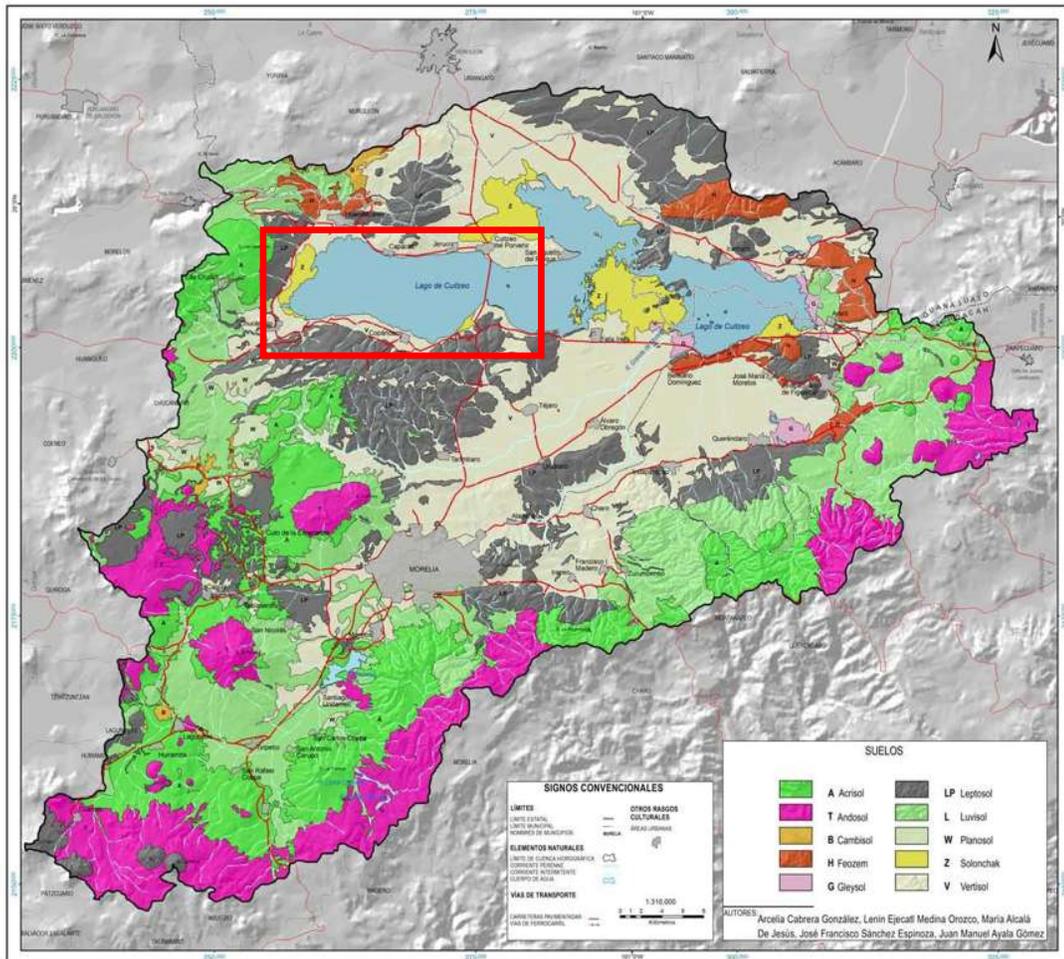


Figura 4. Suelos de la cuenca del Lago de Cuitzeo (Cabrera *et al.*, 2010).

Área de estudio: ribera oeste del Lago.

Vertisol. Se localizan en depresiones y zonas planas entre los 1900 y 2300 m de altitud. Tienen más de 30% de arcillas que se expanden y se contraen formando grietas profundas cuando están secos. Son profundos y fértiles, de uso agrícola y de pastoreo. Son susceptibles al anegamiento, tienen alta adhesividad cuando el suelo está mojado y son muy duros cuando están secos, por lo que es importante un manejo adecuado durante la labranza.

Leptosol. Suelos delgados de 25 cm o menos de espesor limitado por roca dura continua. Se encuentran en las laderas de los cerros y lomeríos con pendiente accidentada y en derrames lávicos. Contienen gran cantidad de gravas, favorable para un buen drenaje. Son un recurso potencial para el pastoreo y el establecimiento de pastizales en estación húmeda; sin embargo, en la estación seca pueden presentar problemas por su baja capacidad para almacenar agua.

Solonchak. Se encuentran principalmente en la ribera del lago y en áreas en donde el agua subterránea asciende, disolviendo y arrastrando sales que se depositan en la superficie del suelo, las cuales se presentan en alto contenido dentro de los primeros 50 cm, afectando el crecimiento de las plantas. Son suelos de poco valor agrícola y se utilizan para pastoreo extensivo.

7.2. Selección de los sitios de estudio

Se realizó un reconocimiento del área de estudio con el fin de identificar las parcelas agrícolas incluyendo aquellas que pertenecían a zonas de sedimentos lacustres incorporados a la agricultura. En cada una de las siguientes 10 localidades de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo se tomaron cuatro muestras de suelo con base en un transecto altitudinal, dando un total de 40 muestras georeferenciadas: Copándaro, San Agustín del Maíz, Santa Rita, El Salitre, Chucándiro, La Estancia, Arúmbaro, Huandacareo, Cuitzeo y San Agustín del Pulque (Figura 5 y Cuadro 3).

7.2.1. Trabajo de campo

En cada sitio de estudio se realizaron cortes de suelo de 30 x 30 x 30 cm y se tomó aproximadamente 1.0 kg de suelo, se etiquetó y se llevó al laboratorio para su posterior tratamiento.

7.2.2. Trabajo de laboratorio

Las muestras de suelo se dejaron secar al aire y en la sombra. Posteriormente, el suelo se trituró y se pasó por un tamiz de 2.0 mm de diámetro para obtener la fracción de tierra fina con la que se realizaron los análisis de suelo y, la determinación de los elementos traza y el metaloide arsénico.

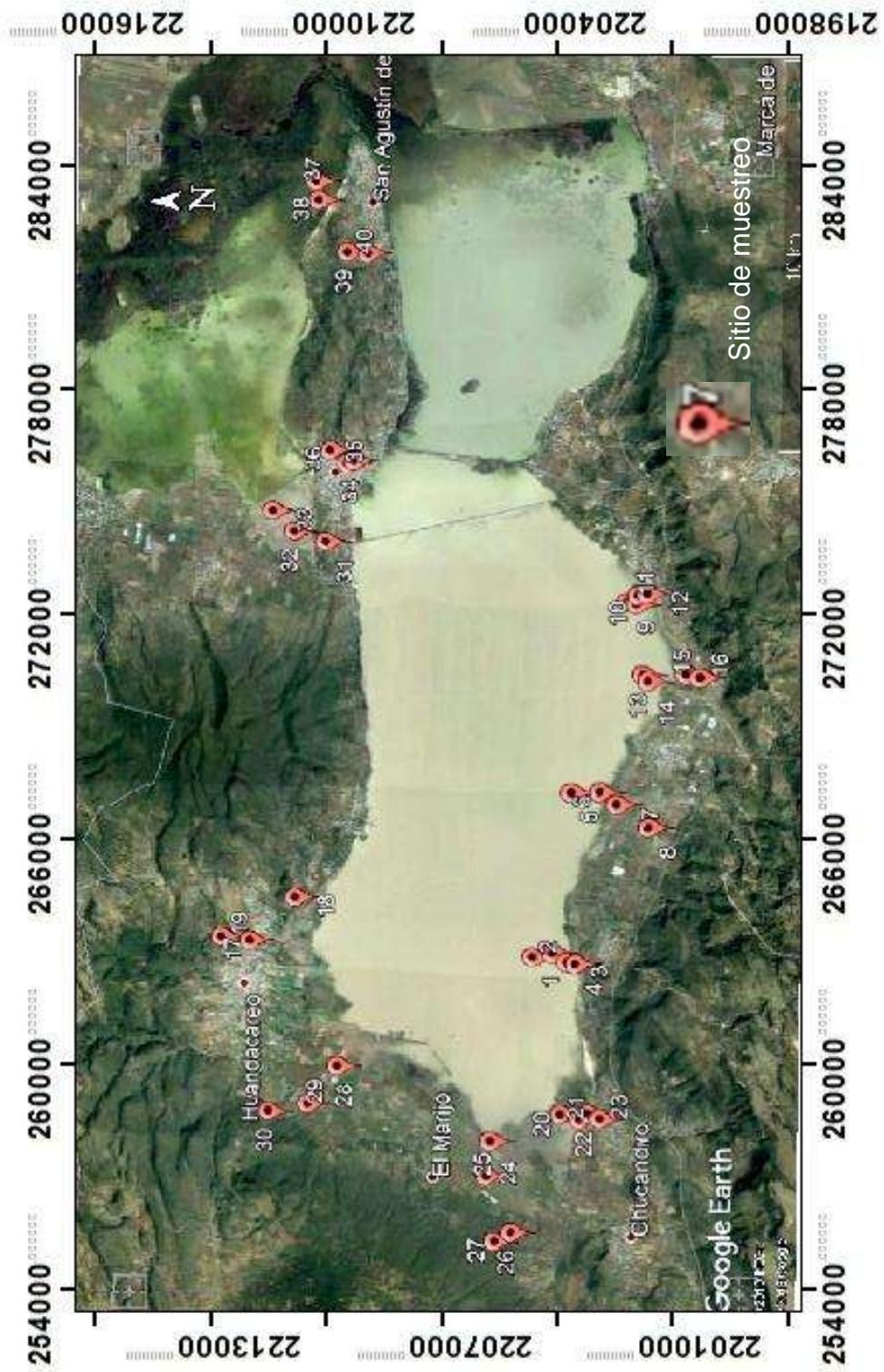


Figura 5. Localización de los sitios de estudio en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Cuadro 3. Georreferencia de los sitios de estudio en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Sitio	Simbología	Localidad	Coordenadas	
			LN	LW
1	SR1	Santa. Rita	19°54'41.7"	101°15'51.6"
2	SR2	Santa. Rita	19°54'22.5"	101°13'19.07"
3	SR3	Santa. Rita	19°54'4.95"	101°13'23.92"
4	SR4	Santa. Rita	19°54'28.20	101°13'24.8"
5	C1	Copándaro	19°53'25.38"	101°13'54.25"
6	C2	Copándaro	19°53'51.7"	101°13'34.80"
7	C3	Copándaro	19°54'22.5"	101°15'58.5"
8	C4	Copándaro	19°54'30"	101°15'57.5"
9	SAM1	S.A del Maíz	19°54'53.5"	101°15'50.1"
10	SAM2	S.A del Maíz	19°53'38"	101°10'34.7"
11	SAM3	S.A del Maíz	19°53'36.6"	101°10'27.6"
12	SAM4	S.A del Maíz	19°53'29.4"	101°10'25.34"
13	A1	Arumbaro	19°54'27.4"	101°11'45.7"
14	A2	Arúmbaro	19°52'59.1"	101°11'38.6"
15	A3	Arúmbaro	19°52'46.4"	101°11'40.4.6"
16	A4	Arúmbaro	19°52'45.81"	101°11'36.73"
17	H1	Huandacareo	19°58'20.3"	101°15'08.3"
18	H2	Huandacareo	19°58'17.2"	101°15'02.7"
19	H3	Huandacareo	19°58'35.2"	101°15'05.7"
20	S1	Salitre	19°54'27.1"	101°18'05.7"
21	S2	Salitre	19°54'30.6"	101°17'59.9"
22	S3	Salitre	19°54'16.3"	101°18'35.7"
23	S4	Salitre	19°53'44.4"	101°18'58.3"
24	Ch1	Chucándiro	19°55'21.0"	101°20'00.8"
25	Ch2	Chucándiro	19°55'22.9"	101°19'44.2"
26	Ch3	Chucándiro	19°55'22.6"	101°20'08.5"
27	Ch4	Chucándiro	19°56'8.47"	101°20'11.71"
28	LE1	La Estancia	19°58'19.9"	101°17'15.3"
29	LE2	La Estancia	19°58'20.8"	101°17'48.4"
30	LE3	La Estancia	19°58'37.4"	101°18'8.8"
31	CE1	Cuitzeo E	19°57'55.2"	101°9'9.8"
32	CE2	Cuitzeo E	19°58'6.7"	101°9'15.8"
33	CE3	Cuitzeo E	19°58'12.6"	101°9'14.9"
34	CS1	Cuitzeo salida	19°57'.57.5"	101°8'17.1"
35	CS2	Cuitzeo salida	19°57'46"	101°7'58.1"
36	CS3	Cuitzeo salida	19°57'29.5"	101°8'9.7."
37	SAP1	S.A del Pulque	19°57'35"	101°4'56.2"
38	SAP2	S.A del Pulque	19°57'28.6"	101°4'56.5"
39	SAP3	S.A del Pulque	19°57'38"	101°5'3.5"
40	SAP4	S.A del Pulque	19°57'27.5"	101°5'19.5"

S. A.: San Agustín, Cuitzeo E: Cuitzeo entrada (Oriente).

7.3. Análisis físicos

Los análisis de suelos se determinaron con base en la Norma Oficial Mexicana de suelos (NOM-023-SEMARNAT-2001) (DOF, 2003) y Muñoz *et al.* (2013):

Color. Por comparación con una carta de colores estándar Munsell, ésta consta de 175 colores ordenados de manera sistemática con base en tres propiedades: matiz, luminosidad e intensidad.

Textura. Por el método de Bouyoucus, el cual se basa en la velocidad de sedimentación de las partículas según la Ley de Stokes.

Densidad aparente. Mediante el método de la parafina con base en el principio de Arquímedes que afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado.

7.4. Análisis químico

7.4.1. Reacción del suelo (pH) y conductividad eléctrica. Se determinaron en una relación suelo agua 1:2.5, se leyeron en un potenciómetro y conductímetro.

7.4.2. Materia orgánica. Por el método de combustión húmeda (Walkley y Black).

7.4.3. Capacidad de intercambio catiónico. Su determinación con basó en la saturación de los sitios de absorción intercambiables con un solo catión (NH_4^+ o Ca^{++}), valorando posteriormente la cantidad total de cationes absorbidos.

7.4.4. Bases intercambiables. La adsorción de iones con desplazamiento de una cantidad equivalente de cationes del suelo hacia la solución, se realiza mediante la saturación del suelo con Acetato de Amonio 1 N. El Ca y Mg se titularon con EDTA complejometría y, Na y K por espectrofotometría de emisión de flama (DOF, 2000).

7.5. Clasificación de propiedades físicas y químicas de los suelos

Las propiedades físicas y químicas de los suelos se clasificaron con base en Muñoz *et al.* (2013) y la Norma Oficial de suelos (NOM-023-SEMARNAT-2001) (DOF, 2001) (Cuadro 4).

7.6. Metales pesados y el metaloide arsénico

Se cuantificó la concentración de los metales pesados Cd, Cr, Ni y Pb así como del metaloide As en la fracción de tierra fina. Se utilizó la técnica de Espectrofotometría de absorción atómica (AAS) de acuerdo con la norma oficial NMX-AA-051-SCFI-2001 (DOF, 2001). El procedimiento para la digestión de muestras se detalla en el Anexo 1.

Cuadro 4. Clasificación de los parámetros físicos y químicos de suelos de acuerdo con Muñoz *et al.* (2013)¹ y la NOM-023-SEMARNAT-2001 (DOF, 2001)².

Clases	Parámetro
Densidad aparente¹	
	$g\ cm^{-3}$
Muy baja	0.5 – 0.75
Baja	0.76 – 0.99
Media	1.0 – 1.25
Alta	1.26 – 1.40
Muy alta	> 1.40
pH²	
Fuertemente ácido	<5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	>8.5
Conductividad Eléctrica a 25°C²	
	$dS\ m^{-1}$
Efectos despreciables de salinidad	<1.0
Muy ligeramente salino	1.1 – 2.0
Moderadamente salino	2.1 – 4.0
Suelo salino	4.1 – 8.0
Fuertemente salino	8.1 – 16.0
Muy fuertemente salino	>16.0
Capacidad de Intercambio Catiónico²	
	$cmol_{(+)}\ kg^{-1}$
Muy baja	>5
Baja	5 – 15
Media	15 – 25
Alta	25 – 40
Muy alta	>40
Materia orgánica²	
	%
Muy baja	< 0.5
Baja	0.6 a 1.5
Media	1.6 a 3.5
Alta	3.6 a 6.0
Muy alta	> 6.0

7.7. Límites permisibles de metales pesados y del metaloide As

Los límites permisibles sobre la concentración de metales pesados y del metaloide As se determinaron con base en la norma oficial NOM-147-SEMARNAT-2004 (DOF, 2007), la agencia ambiental Holandesa (CCE, 2002) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1996) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Límites máximos permisibles de Metales pesados en suelos.

Metal	NOM-147- SEMARNAT-2004 (DOF, 2004)	Agencia ambiental Holandesa (CCE, 2002)	EPA, (1996)
	mg kg ⁻¹		
As	22	29	-
Cd	37	0.80	-
Cu	-	-	30
Ni	1600	50	100
Zn	-	140	400

7.8. Encuestas

Se realizaron encuestas a los pobladores de las comunidades de estudio para obtener información sobre los cultivos y los fertilizantes que utilizan. Lo anterior, con el fin de conocer el tipo de *ET* que entran al suelo al aplicar los fertilizantes así como las enfermedades que padece la gente en la época de estiaje (Cuadro 6).

Cuadro 6. Formato para realizar encuestas a los agricultores en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

FORMATO DE ENCUESTA

Fecha:

Nombre del informante:

Localidad:

Sobre el cultivo

¿Qué cultivo (s) siembra?

¿Cuántos años tiene cultivando lo mismo?

¿Aplica rotación de cultivos?

Sobre el fertilizante

¿Qué nombre tiene?

¿En qué cantidad lo aplica?

¿Con qué frecuencia lo aplica?

Sobre las enfermedades

¿Qué enfermedades se manifiestan en la gente?

¿Tienen alguna relación con los fertilizantes que aplican?

7.9. Distribución espacial de las propiedades físicas, químicas y de los elementos traza

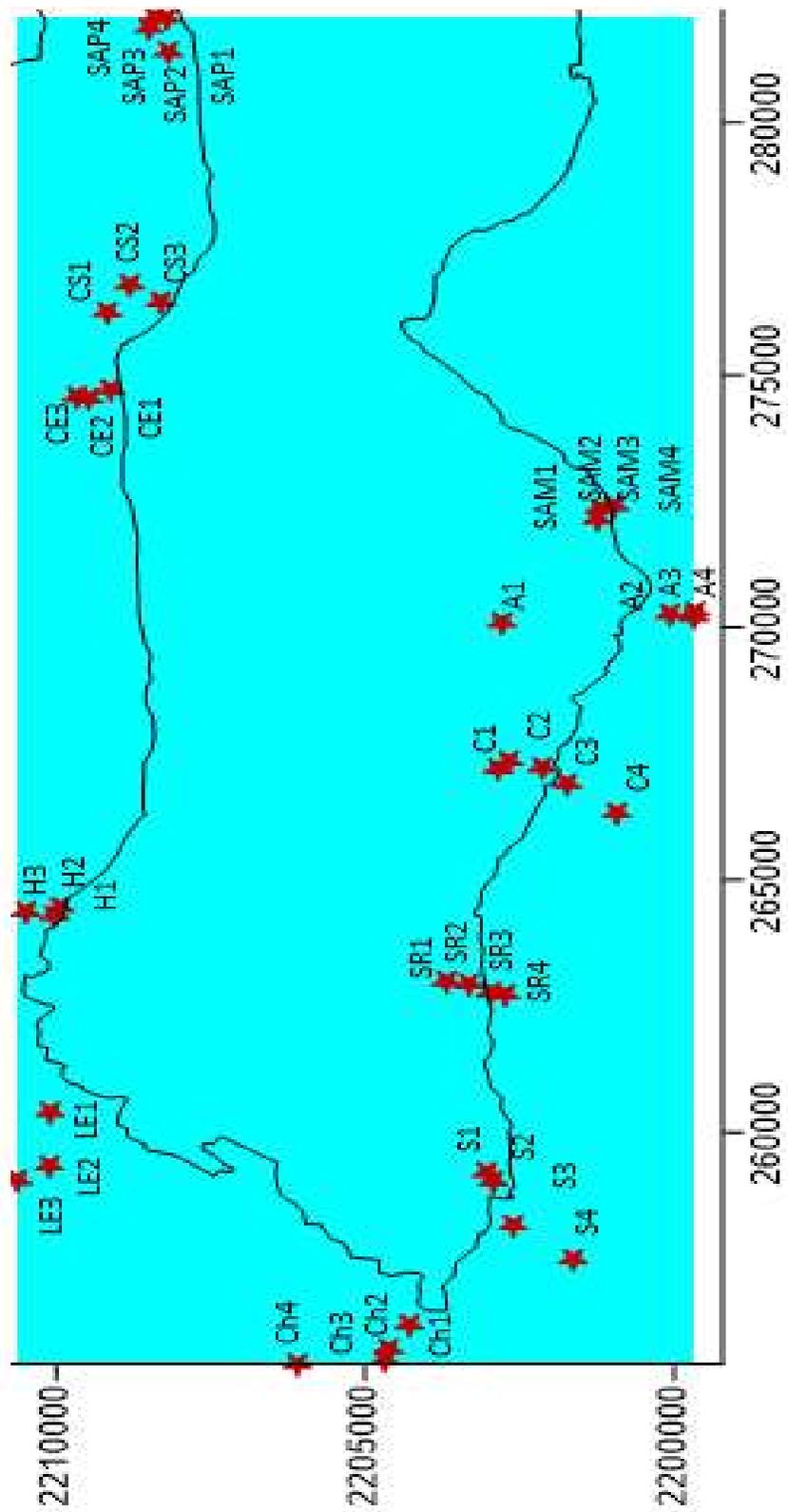
Los resultados obtenidos se ingresaron al programa Surfer Versión 11 para determinar la distribución de las propiedades físicas y químicas así como la de elementos traza.

8. RESULTADOS

En el siguiente apartado se describen los resultados sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos, la concentración de los elementos traza y sobre las encuestas relacionadas con los fertilizantes.

La ubicación y nomenclatura para identificar a los sitios de estudio que se presentan en la Figura 6, servirá de guía para visualizar esta información en todos los mapas de distribución que se muestran en el apartado de resultados. Dichos mapas no llevan la nomenclatura de los sitios de estudio porque el programa utilizado para tal fin carece de la herramienta respectiva.

Para visualizar mejor los 40 sitios de trabajo, el área de estudio se dividió en dos partes: norte y sur en las Figuras (entre la 7 y 32) se aprecia la distribución de dichos sitios.



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo,
 S= Salitre, Ch= Chucandiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 6. Ubicación y nomenclatura de los sitios de estudio

Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades físicas de los suelos se presentan en el Cuadro 7.

Color. Los suelos del área de estudio son variables en color: gris, café y negro. Esto se deben principalmente al origen de los materiales y a las condiciones de drenaje; los colores oscuros también se relacionan con la materia orgánica, y el tono café con los óxidos de Fe (Jaramillo, 2002). Los colores grises están presentes con mayor frecuencia en las parcelas que pertenecen a los sedimentos de la ribera del lago, sin embargo, no se muestra un patrón de distribución definido del color. De acuerdo con Cortés (2015), el color es un parámetro proxy en la evaluación del contenido de elementos traza porque permite obtener un diagnóstico rápido y económico para determinar si un suelo presenta contaminación.

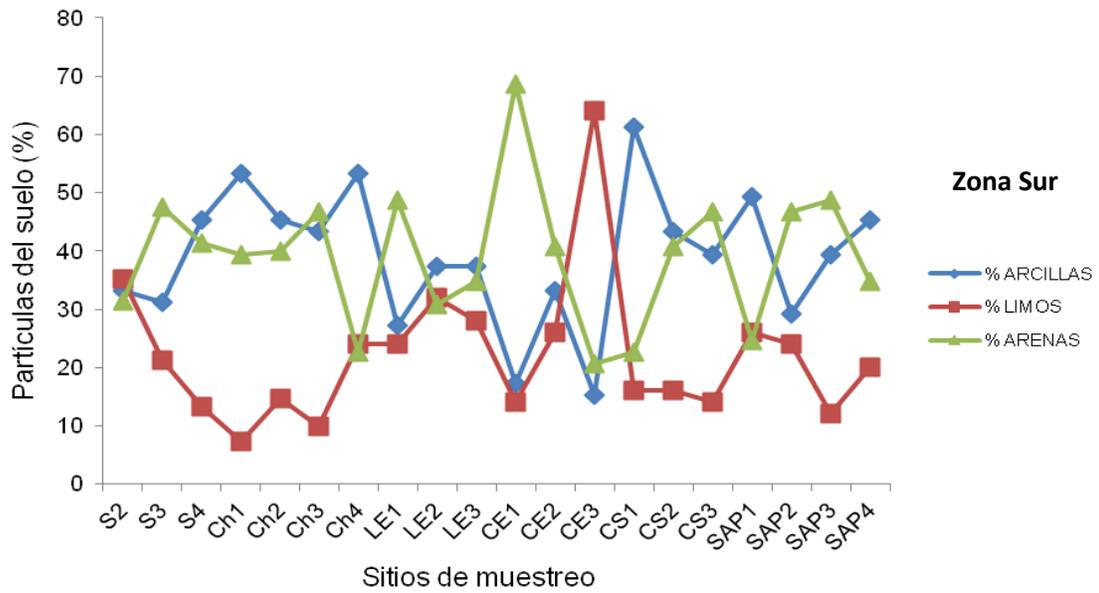
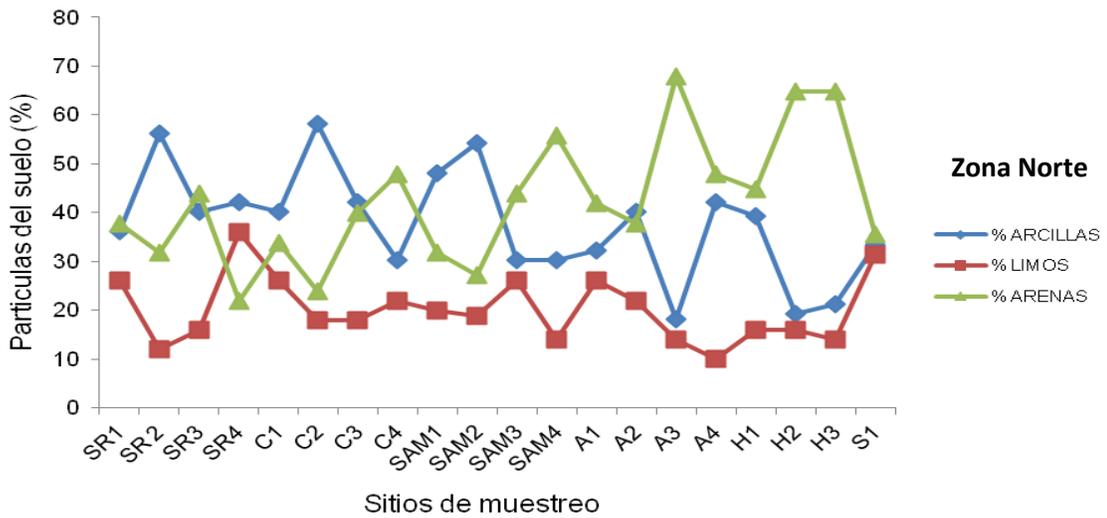
Textura del suelo

El contenido de partículas de arcilla varían de 15% a 61% y corresponden al sitio de Cuitzeo Entrada (CE) y Cuitzeo Salida (CS), respectivamente; la mayoría de los sitios de estudio oscilan entre 30% y 40%. Los limos varían de 10% a 20%, y los de arena entre 30% y 40%; el sitio de Cuitzeo Entrada (CE) alcanza 64% (Figuras 7 y 8).

Cuadro 7. Propiedades físicas de suelos agrícolas en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Muestra	Simbología	Color	Textura			Clase textural	DA gm ⁻³	Clase
			A -	L %	R -			
1	SR1	5Y 3/2 dark olive gray	37.84	26.00	36.16	Franco arcillo arenoso	1.91	MA
2	SR2	2.5Y 2.5/1 black	31.84	12.00	56.16	Arcillo arenoso	1.70	MA
3	SR3	2.5Y 4/1 dark gray	43.84	16.00	40.16	Arcillo arenoso	1.87	MA
4	SR4	5Y 3/1 very dark gray	21.84	36.00	42.16	Arcilla	1.54	MA
5	C1	2.5Y 6/2 light brown gray	33.84	26.00	40.16	Franco	1.64	MA
6	C2	10YR 4/1 dark gray	23.84	18.00	58.16	Arcilla	1.69	MA
7	C3	10YR 6/1 gray	39.84	18.00	42.16	Arcillo arenoso	1.94	MA
8	C4	10YR 4/2 dark grayish brown	47.84	22.00	30.16	Franco	1.63	MA
9	SAM1	10YR 4/2 dark grayish brown	31.84	20.00	48.16	Arcilla	1.73	MA
10	SAM2	10YR 6/1 gray	27.12	18.72	54.16	Arcilla	1.82	MA
11	SAM3	10YR 6/2 light brown gray	43.84	26.00	30.16	Franco arcilloso	1.67	MA
12	SAM4	10YR 4/2 dark grayish brown	55.84	14.00	30.16	Franco arcillo arenoso	1.69	MA
13	A1	10YR 4/2 light brown gray	41.84	26.00	32.16	Arcillo arenoso	1.59	MA
14	A2	10YR 6/2 light brown gray	37.84	22.00	40.16	Arcilla	1.98	MA
15	A3	7.5YR 6/1 gray	67.84	14.00	18.16	Franco arenoso	1.99	MA
16	A4	10YR 5/2 grayish brown	47.84	10.00	42.16	Arcillo arenoso	1.77	MA
17	H1	10YR 5/2 grayish brown	44.72	16.00	39.28	Arcillo arenoso	1.93	MA
18	H2	10YR 4/1 dark gray	64.72	16.00	19.28	Franco arenoso	1.64	MA
19	H3	7.5YR 7/1 light gray	64.72	14.00	21.28	Franco arcillo arenoso	1.64	MA
20	S1	7.5YR 5/1 gray	35.44	31.28	33.28	Franco arcilloso	1.78	MA
21	S2	7.5YR 4/1 dark gray	31.44	35.28	33.28	Franco arcilloso	1.64	MA
22	S3	5YR 6/1 gray	47.44	21.28	31.28	Franco arcillo arenoso	1.66	MA
23	S4	5YR 6/1 gray	41.44	13.28	45.28	Arcilla	1.88	MA
24	Ch1	5YR 5/1 gray	39.44	7.28	53.28	Arcilla	1.98	MA
25	Ch2	5Y 3/1 very dark gray	40.00	14.72	45.28	Arcilla	1.81	MA
26	Ch3	2.5Y 3/1 very dark gray	46.72	10.00	43.28	Arcillo arenoso	2.00	MA
27	Ch4	10YR 4/1 dark gray	22.72	24.00	53.28	Arcilla	1.64	MA
28	LE1	5Y 3/1 very dark gray	48.72	24.00	27.28	Franco arcillo arenoso	1.82	MA
29	LE2	10YR 5/3 brown	30.72	32.00	37.28	Franco arcilloso	1.71	MA
30	LE3	10YR 4/3 brown	34.72	28.00	37.28	Franco arcilloso	1.33	A
31	CE1	7.5YR 4/3 brown	68.72	14.00	17.28	Franco arenoso	1.26	A
32	CE2	10YR 4/1 dark gray	40.72	26.00	33.28	Franco arcilloso	1.27	A
33	CE3	2.5Y 6/1 gray	20.72	64.00	15.28	Franco limoso	1.75	MA
34	CS1	2.5Y 4/1 dark gray	22.72	16.00	61.28	Arcilla	1.22	M
35	CS2	2.5Y 4/1 dark gray	40.72	16.00	43.28	Arcilla	1.53	MA
36	CS3	10YR 6/1 gray	46.72	14.00	39.28	Arcillo arenoso	2.00	MA
37	SAP1	7.5YR 3/1 very dark gray	24.72	26.00	49.28	Arcilla	1.64	MA
38	SAP2	7.5YR 3/1 very dark gray	46.72	24.00	29.28	Franco arcillo arenoso	1.80	MA
39	SAP3	10YR 5/1 gray	48.72	12.00	39.28	Arcillo arenoso	1.62	MA
40	SAP4	10YR 4/1 dark gray	34.72	20.00	45.28	Arcilla	1.77	MA

A= arena, L= Limo y R= arcilla, DA= densidad aparente: A, alta; M, media; MA, muy alta. Localidades= SR: Santa Rita; C: Copándaro; SAM: San Agustín del Maíz; A: Arúbaro; H: Huandacareo; S: Salitre; Ch: Chucándiro; LE: La Estancia; CE: Cuitzeo entrada oriente; CS: Cuitzeo salida; SAP: San Agustín del Pulque.



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucandiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 7. Porcentaje de partículas en suelos agrícolas en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

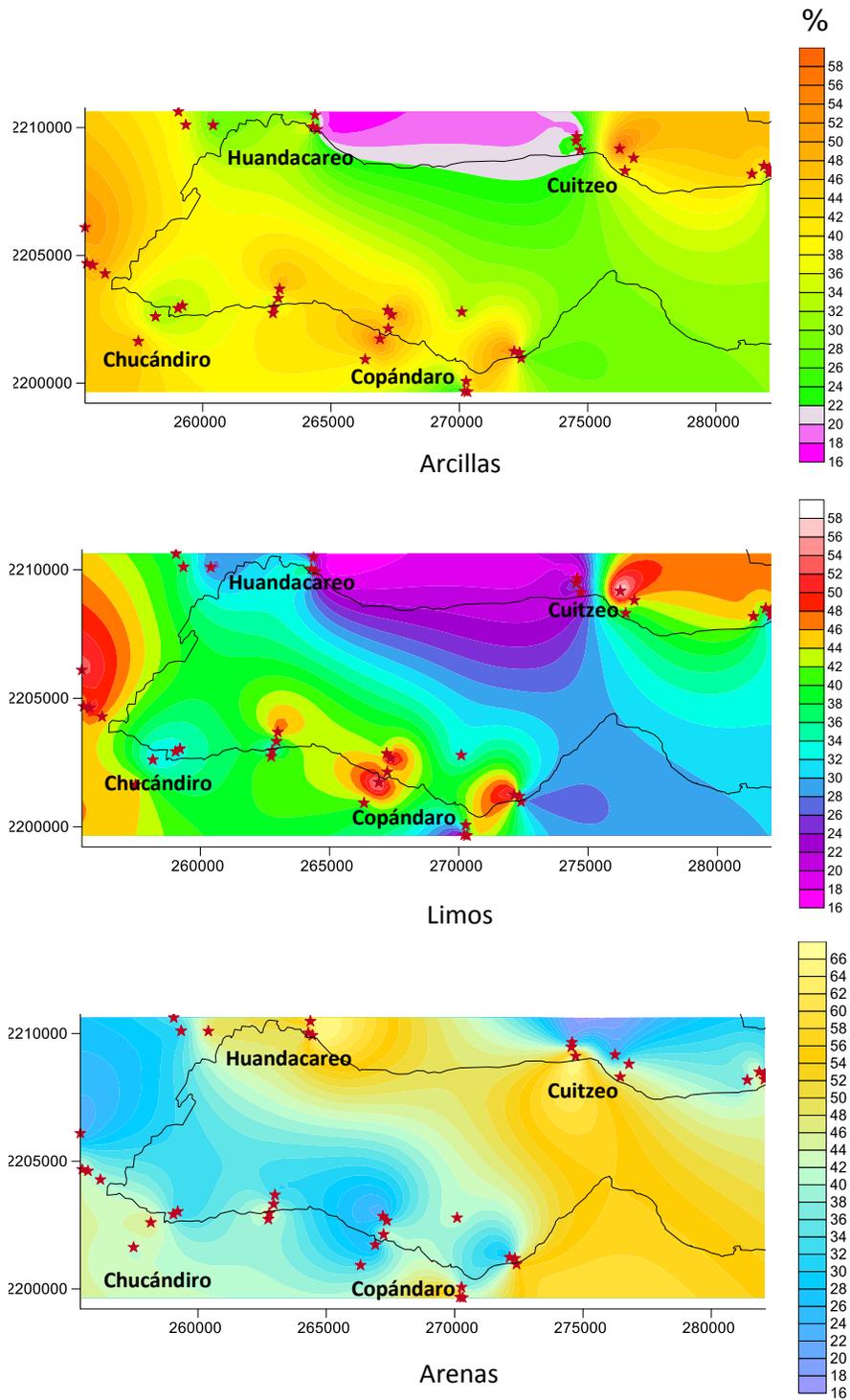
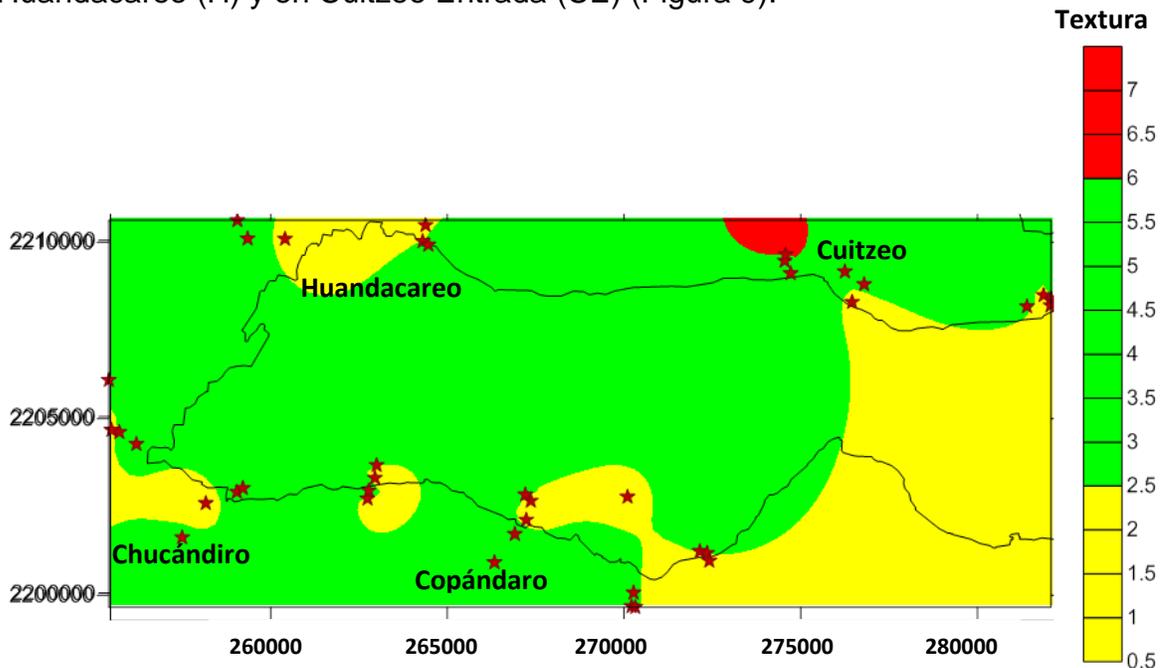


Figura 8. Distribución del porcentaje de partículas en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Las clases de textura que predominan son arcilla, arcillo arenoso y franco arcilloso, principalmente en Copándaro (C) y en Chucándiro (Ch). Los suelos con el mayor contenido de arena son de textura franco arenosa localizados en Huandacareo (H) y en Cuitzeo Entrada (CE) (Figura 9).



1: Franco arcillo arenoso, 2: Arcillo arenoso, 3: Arcilla, 4: Franco, 5: Franco arcilloso, 6: Franco arenoso y 7: Franco limoso

Figura 9. Distribución de la clase textural en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Los suelos arcillosos se asocian con la contaminación de *ET* debido a que la carga positiva de estos es atraída por la carga negativa de las arcillas (Sánchez, 2003). Esta clase de suelos tiene gran capacidad de autodepuración por su alta capacidad de intercambio catiónico que proporciona a su vez, alta capacidad amortiguadora al suelo al retener *ET*, en cambio los suelos arenosos carecen de capacidad para fijar a dichos elementos, los cuales viajan a través de los poros y

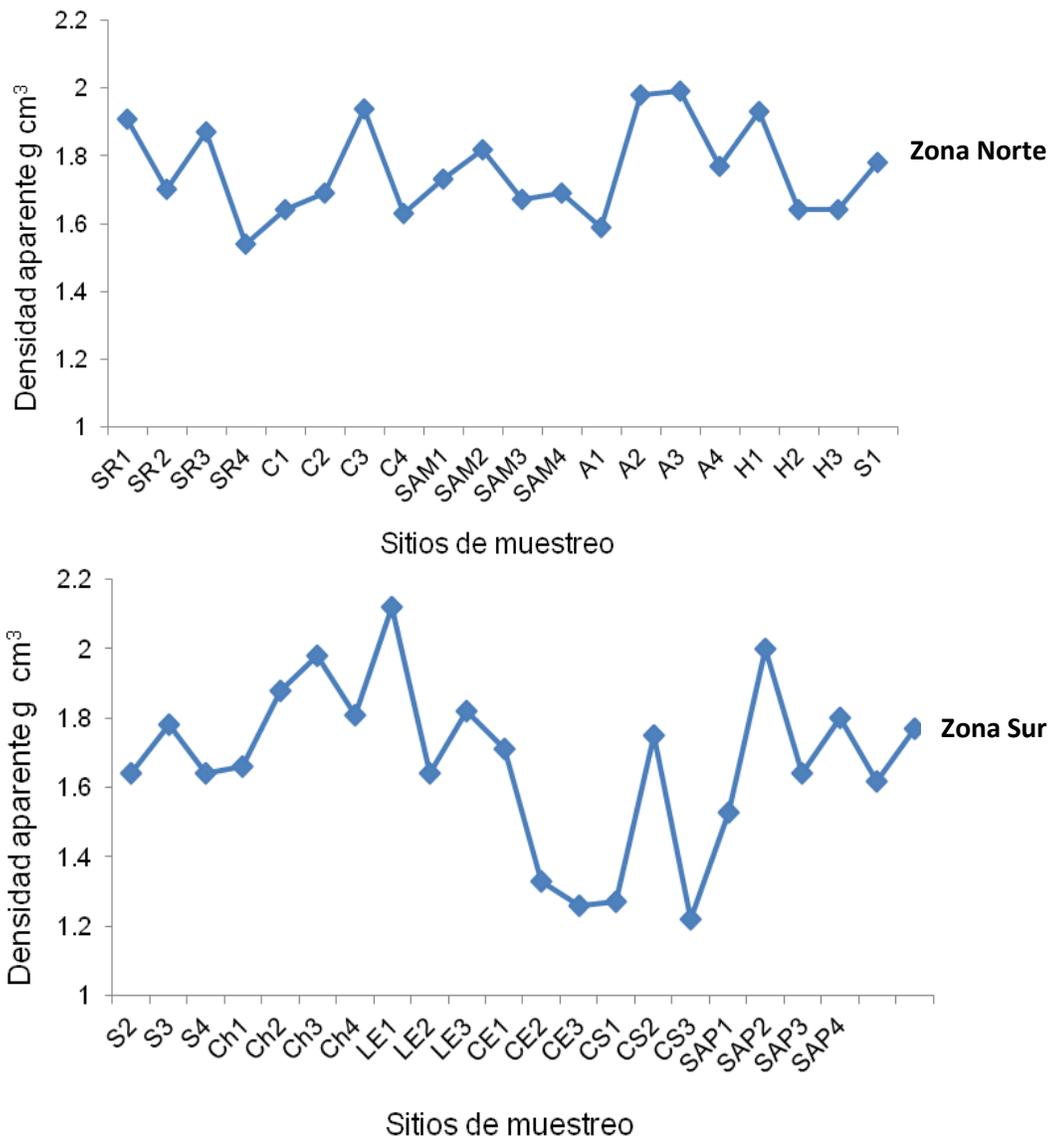
pueden llegar a contaminar a los mantos freáticos (Bautista *et al.*, 2017; Casillas 2011).

Así mismo, los *ET* presentes en los suelos arcillosos pueden ser absorbidos por las raíces de las plantas de siembra en parcelas y llegar a los humanos a través de los alimentos (Bautista *et al.*, 2017).

Densidad aparente

Los sitios de estudio presentan densidad aparente de clase media (1.22 cm^{-3}) a muy alta (1.9 g cm^{-3}) como se observa en la Figura 10. En general, la densidad es alta y se relaciona con los suelos arcillosos, condiciones que limitan las actividades agrícolas porque los suelos están muy compactados en donde la porosidad se reduce, impidiendo a las raíces penetrar para alcanzar el agua y los nutrientes necesarios (Donoso, 1992).

En la distribución espacial de la densidad aparente se observa que el valor más bajo (1.2 g cm^{-3}) corresponde a la clase media y está localizado en San Agustín del Pulque (SAP); en cuanto a la clase muy alta (1.7 g cm^{-3}), se distribuye en la mayoría de los sitios (Figura 11).



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucandiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 10. Densidad aparente en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

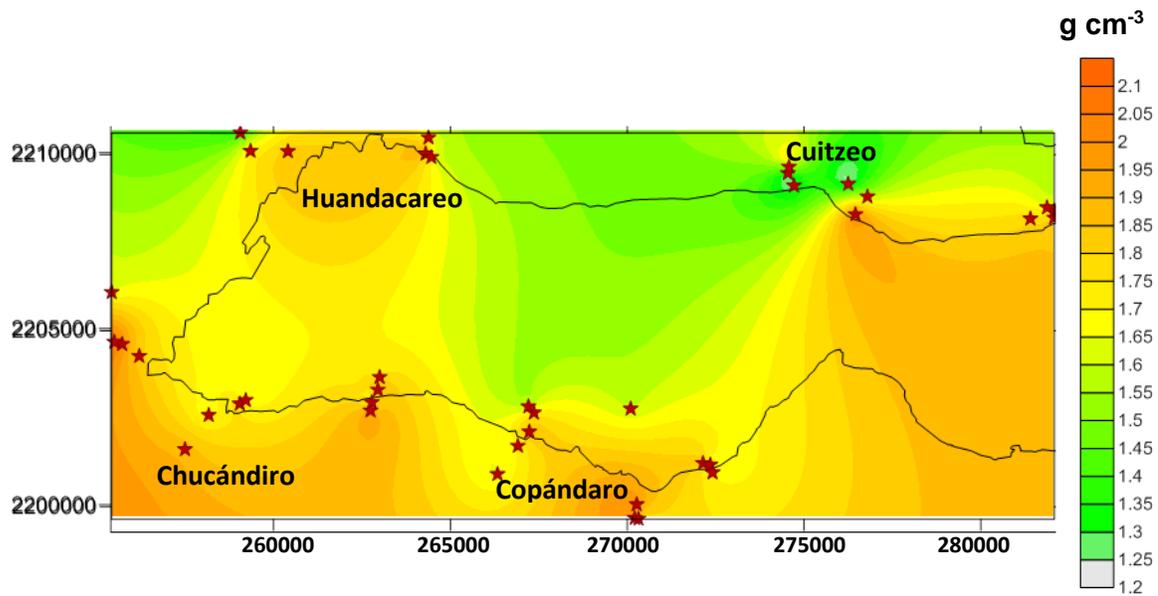


Figura 11. Distribución de la densidad aparente en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Propiedades químicas de los suelos

Las propiedades químicas de los suelos se muestran en el Cuadro 8.

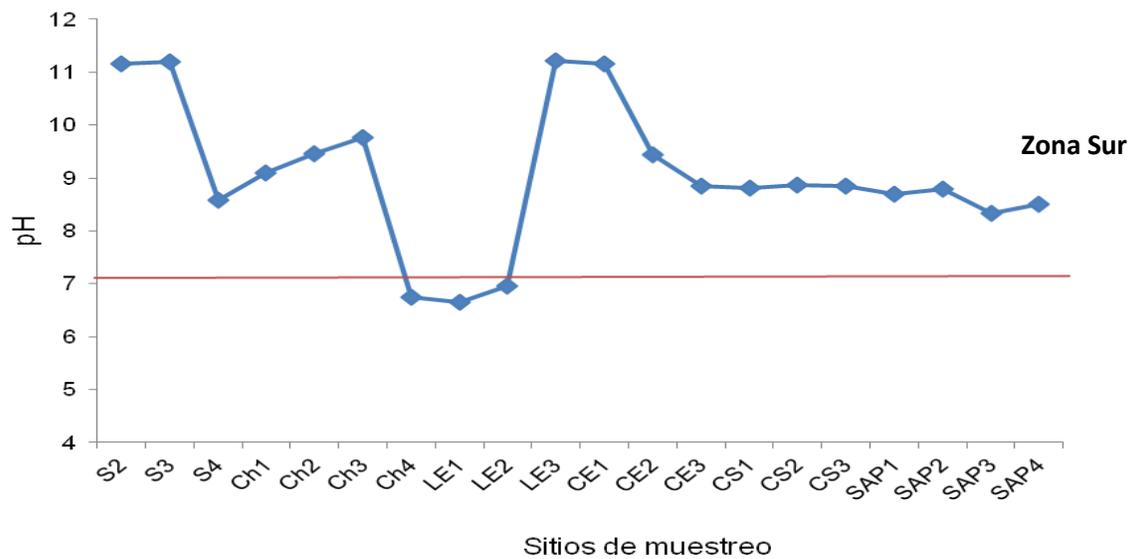
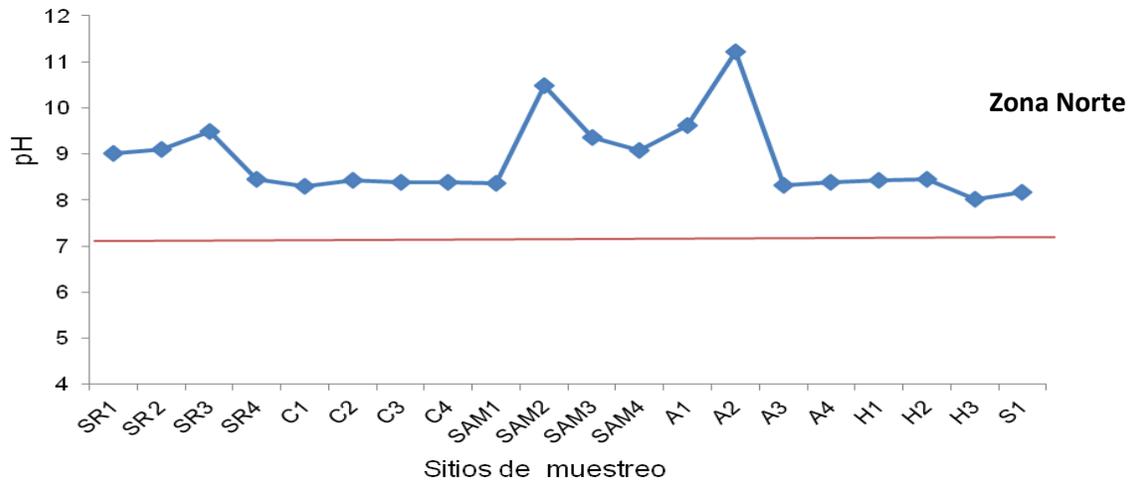
Cuadro 8. Propiedades químicas de suelos agrícolas en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Muestra	pH	CE		MO		K	Na	Ca	Mg	CIC	Clase	
	1:2.5	Clase	dS m ⁻¹	Clase	%	-	-	cmol kg ⁻¹	-	-		
1	9.0	FA	0.8	EDS	4.0	A	0.10	0.23	24.00	12.00	40	A
2	9.0	FA	0.8	EDS	4.2	A	0.04	0.15	52.00	6.00	39	A
3	9.4	FA	1.0	EDS	4.5	A	0.09	0.17	50.00	3.60	40	A
4	8.4	MA	0.3	EDS	4.7	A	0.04	0.43	36.00	4.80	59	MA
5	8.3	MA	0.5	EDS	5.0	A	0.04	0.30	24.00	6.00	65	MA
6	8.4	MA	0.5	EDS	4.7	A	0.09	0.50	26.00	2.40	65	MA
7	8.3	MA	0.5	EDS	4.7	A	0.04	0.15	46.00	4.80	65	MA
8	8.3	MA	0.4	EDS	5.7	A	0.09	0.16	30.00	1.20	60	MA
9	8.3	MA	0.4	EDS	3.8	A	0.04	0.45	24.00	2.40	50	MA
10	10.4	FA	10.1	FS	7.8	MA	0.10	0.25	40.00	3.60	40	A
11	9.3	FA	2.0	MLS	4.0	A	0.04	0.17	30.00	1.20	40	A
12	9.0	FA	0.7	EDS	4.7	A	0.04	0.16	24.00	4.80	42	MA
13	9.6	FA	1.4	MLS	3.0	M	0.04	0.41	24.00	2.40	60	MA
14	11.2	FA	19.0	MFS	2.1	M	0.10	0.30	30.00	4.80	42	MA
15	8.3	MA	0.2	EDS	2.6	M	0.09	0.20	22.00	4.80	45	MA
16	8.3	MA	0.3	EDS	3.5	M	0.10	0.16	40.00	7.20	44	MA
17	8.4	MA	0.2	EDS	3.3	M	0.06	0.49	21.74	9.78	43	MA
18	8.4	MA	0.2	EDS	3.5	M	0.04	0.37	17.39	10.87	40	A
19	8.0	MA	0.2	EDS	9.7	MA	0.03	0.18	14.13	7.61	45	MA
20	8.1	MA	0.1	EDS	3.8	A	0.35	0.45	21.74	9.78	55	MA
21	11.1	FA	11.7	FS	5.9	A	0.05	0.38	22.83	17.39	55	MA
22	11.1	FA	11.8	FS	6.1	MA	0.02	0.28	16.30	11.96	40	A
23	8.5	FA	1.2	MLS	8.5	MA	0.02	0.20	17.39	15.22	36	A
24	9.1	FA	1.4	MLS	6.1	MA	0.02	0.20	31.52	11.96	70	MA
25	9.4	FA	0.9	EDS	8.5	MA	0.04	0.30	21.74	11.96	36	A
26	9.7	FA	0.5	EDS	9.0	MA	0.02	0.23	16.30	25.00	36	A
27	6.7	N	0.6	EDS	7.8	MA	0.06	0.28	18.48	6.52	35	A
28	6.6	N	0.7	EDS	10.9	MA	0.04	0.24	10.87	9.78	35	A
29	6.9	N	0.5	EDS	8.3	MA	0.03	0.19	5.43	8.70	35	A
30	11.2	FA	9.5	FS	9.0	MA	0.04	0.18	19.57	11.96	38	A
31	11.1	FA	8.1	FS	5.9	A	0.07	0.45	16.30	7.61	38	A
32	9.4	FA	0.7	EDS	8.8	MA	0.04	0.19	22.83	31.52	82	MA
33	8.8	FA	1.0	EDS	9.7	MA	0.03	0.19	17.39	26.09	16	M
34	8.8	FA	0.8	EDS	8.0	MA	0.09	0.62	11.96	10.87	30	A
35	8.8	FA	0.8	EDS	10.7	MA	0.04	0.20	14.13	30.43	32	A
36	8.8	FA	0.7	EDS	10.2	MA	0.04	0.17	8.70	58.70	32	A
37	8.6	FA	0.2	EDS	7.3	MA	0.06	0.33	22.83	28.26	42	MA
38	8.7	FA	0.2	EDS	1.1	MB	0.04	0.18	10.87	34.78	46	MA
39	8.3	MA	0.9	EDS	1.1	MB	0.03	0.16	23.91	13.04	45	MA
40	8.5	MA	0.6	EDS	2.8	M	0.04	0.19	10.87	36.96	34	A

pH: FA=Fuertemente alcalino, MA= Moderadamente alcalino, N= Neutro. MO (materia orgánica) y CIC (Capacidad de intercambio catiónico): MA= Muy alta, B= Baja, M= Medio, MB= Muy baja, A= Alta. CE (Conductividad eléctrica): EDS= Efecto despreciable de salinidad, FS= Fuertemente salino, MLS= Muy ligeramente salino, MFS= Muy fuertemente salino (DOF, 2000).

Reacción del suelo (pH). Esta propiedad varía de clase neutra (6.7) a fuertemente alcalina (11.3), predominando éstos últimos, valores que de acuerdo con Sánchez (2003) permiten la disponibilidad de los *ET* como el Zn, Co, Ni y As. Se han reportado pH neutros (7.0) a altamente alcalinos (10) en suelos de la cuenca del Lago de Cuitzeo, favorables para la biodisponibilidad del Zn y del Co (Casillas, 2016; Alfaro, 2010; Villalobos, 2008), valores que coinciden con los encontrados en el presente trabajo.

Se observa en la Figura 12 una línea horizontal roja que indica el valor neutro del pH. Por lo que se aprecia que la mayoría de los sitios están por encima de este valor a excepción de tres sitios en las comunidades de Chucándiro (Ch) y La estancia (LE) en donde el pH es moderadamente ácido.



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucandiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 12. pH en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo

Se observa pH moderadamente ácido en los sitios de la Estancia (LE1 y LE2) y Chucándiro (Ch4), pH fuertemente alcalino en las comunidades de Arúmbaro (A), el Salitre (S) y Cuitzeo (CE y CS). Los pH de 8.4 y 8.9 (moderado a fuertemente alcalino) ocupan la mayor parte de la superficie del área de estudio (Figura 13).

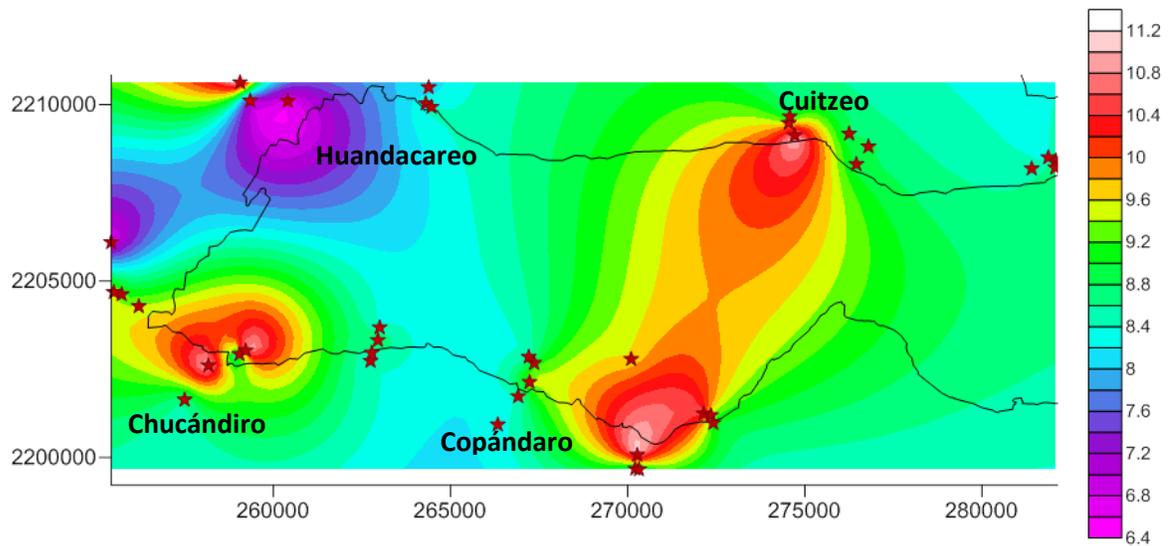


Figura 13. Distribución de pH en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo

Conductividad eléctrica (CE). La mayoría de los sitios tienen efectos despreciables en salinidad (0.201 dS m^{-1} a 1.096 dS m^{-1}) y en menor proporción, existen suelos fuertemente salinos (11.79 dS m^{-1} a 19.05 dS m^{-1}).

La línea roja horizontal en la Figura 14 indica que a partir del valor de 2.0 dS m^{-1} , los suelos son moderadamente salinos (Cuadro 4).

De acuerdo con Sánchez (2003), la salinidad del suelo entre 0.650 dS m^{-1} y 1.150 dS m^{-1} incrementa la movilización del Ni y Zn, además, éstos *ET* aumentan la salinidad y como consecuencia, disminuye la estabilidad del suelo (Crosara, 2012).

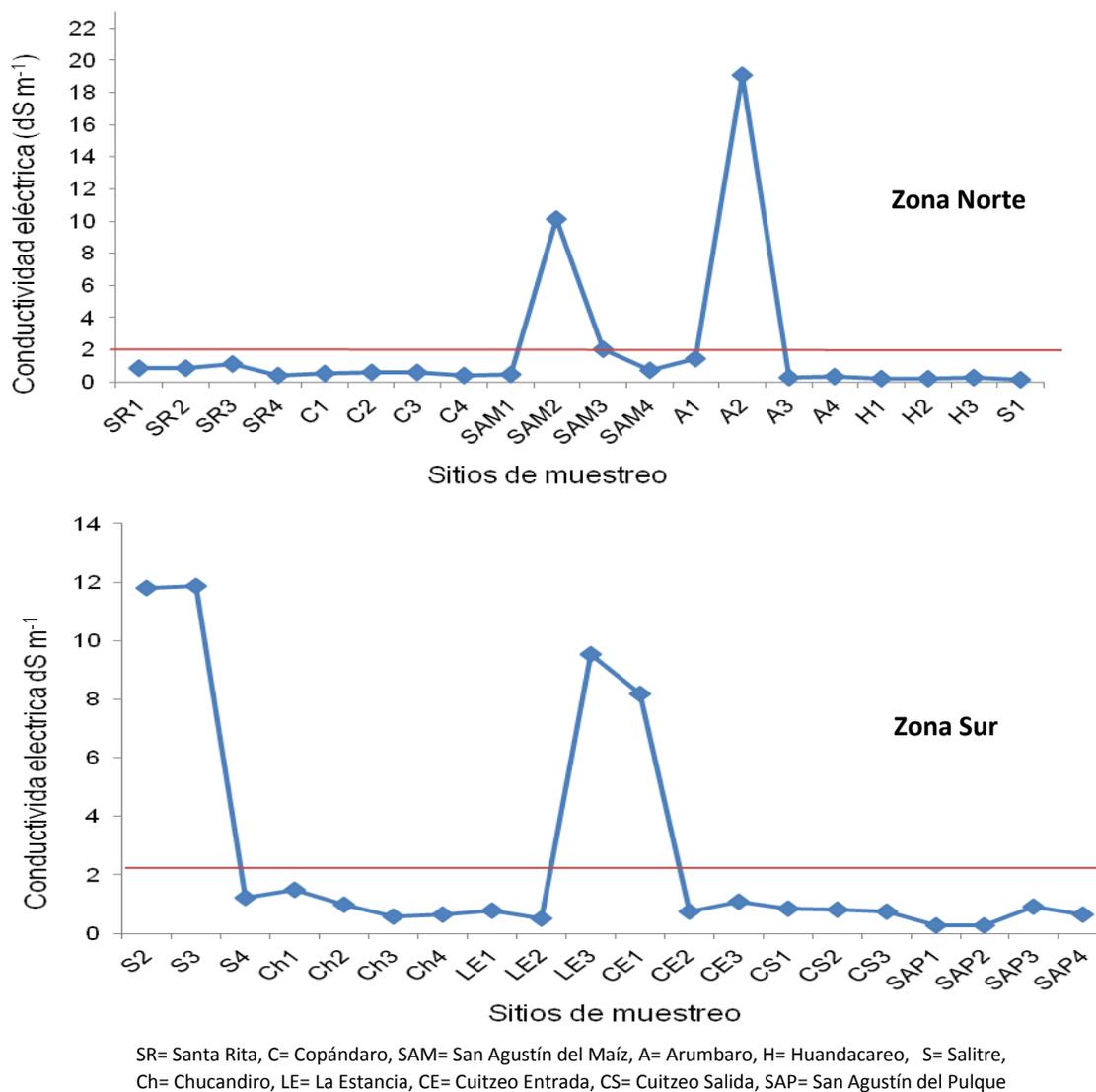


Figura 14 Conductividad eléctrica en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo

La conductividad eléctrica muestra una distribución con mayor abundancia en la clase de efectos despreciables de salinidad (0.2 dS m^{-1}); los suelos fuertemente salinos, ocupan menor superficie y se localizan principalmente en Arúmbaro (A), La estancia (LE) y Cuitzeo entrada (CE) (Figura 15).

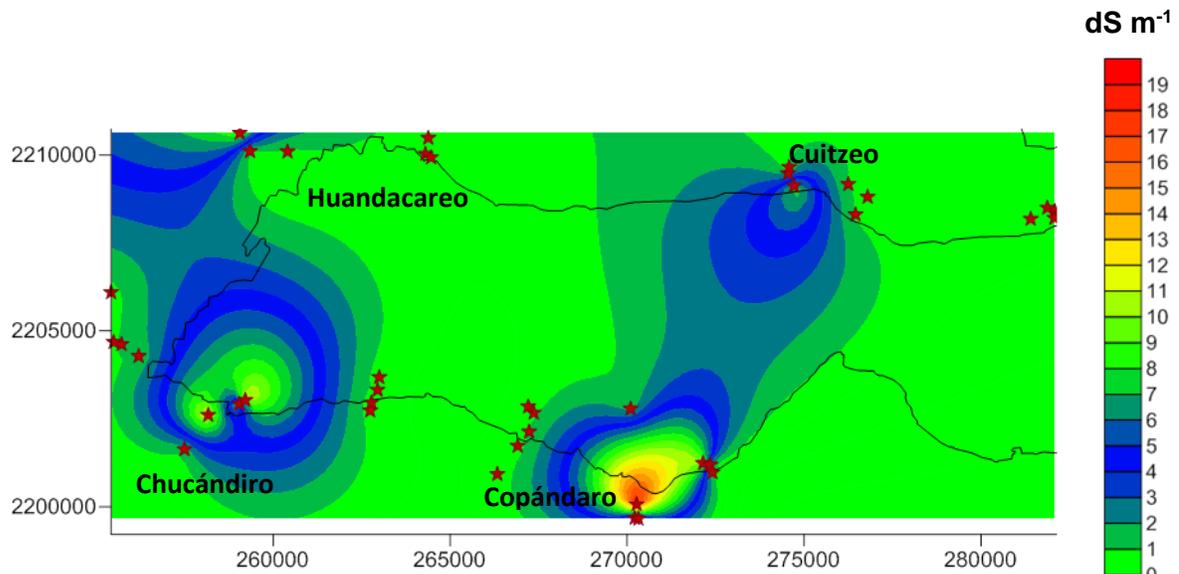


Figura 15. Distribución de la Conductividad eléctrica en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo

Materia orgánica (MO). La MO varía de clase muy baja (0.19%) a muy alta (10.94%) (Figura 16). El alto contenido de MO retiene a los *ET*, ya sea mediante el intercambio catiónico o por la formación de complejos. Por una parte, la MO adsorbe a los *ET* como el Cu y Ni reteniéndolos y evitando su disponibilidad al formar complejos (Jaramillo, 2002; Sánchez, 2003). La formación de los complejos entre la MO y los *ET* es un proceso que interviene en la solubilidad y asimilabilidad de *ET* por las plantas y su toxicidad aumenta cuando forma complejos organometálicos, lo que facilitará su solubilidad, disponibilidad y dispersión (Acosta, 2007).

Por otra parte, valores altos de la CIC, la MO y el pH, proporcionan una alta capacidad amortiguadora al suelo a la resistencia o a de los suelos a cambios en la concentración de metales en solución, es decir, mantiene a los *ET* no disponibles,

esto significa que a mayor capacidad amortiguadora el riesgo a la exposición por ET será menor (Ortiz-Villanueva y Ortiz 2010; Casillas, 2011).

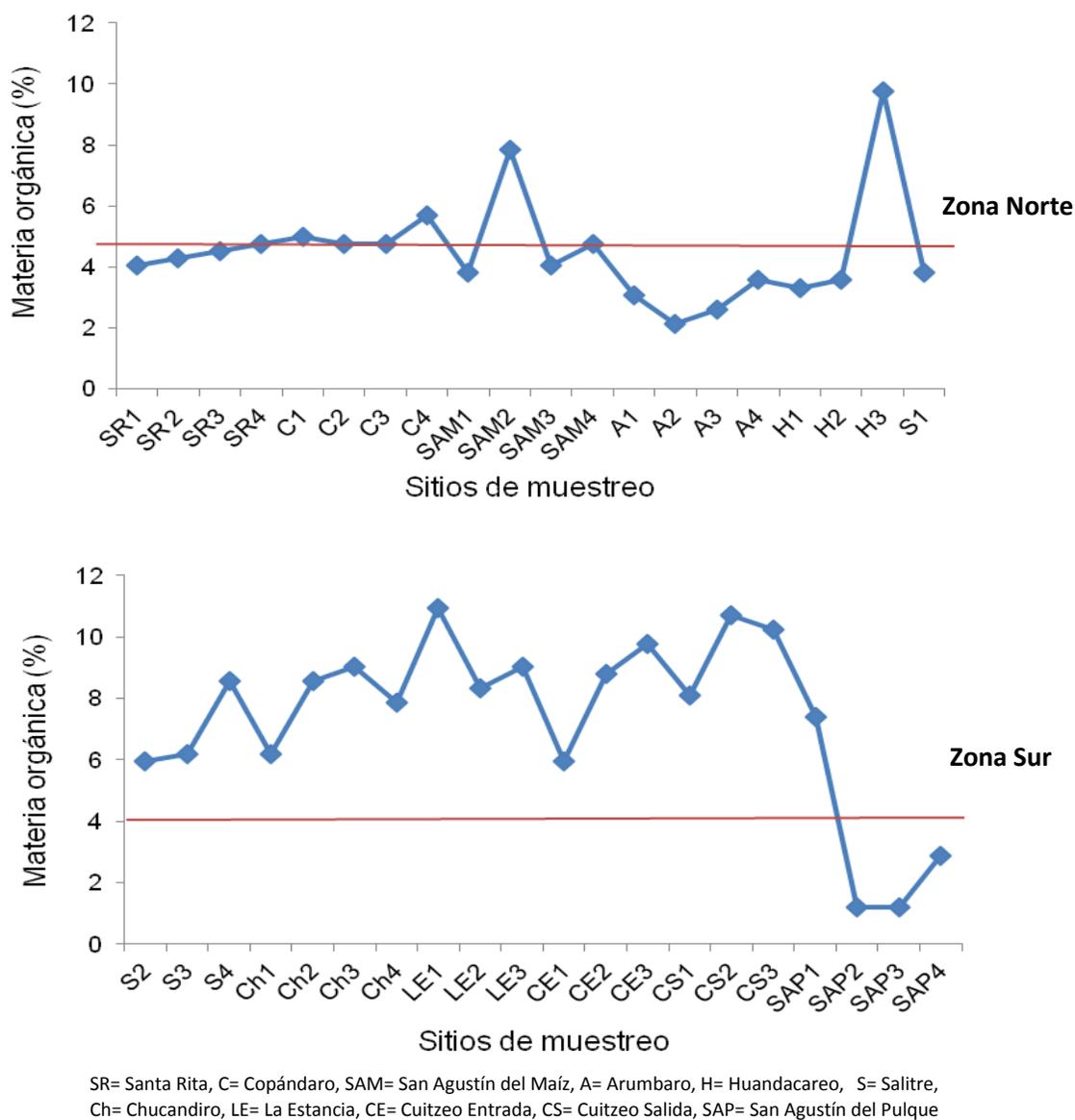


Figura 16. Materia orgánica en suelos agrícolas.

Los sitios de clase alta con valores mayores a 4.5% ocupan la mayor parte de la superficie del área de estudio y los sitios con mayor contenido de MO (10.9%) y

(10.7%) se localizan en La estancia (LE1) y en Cuitzeo salida (CS2), respectivamente.

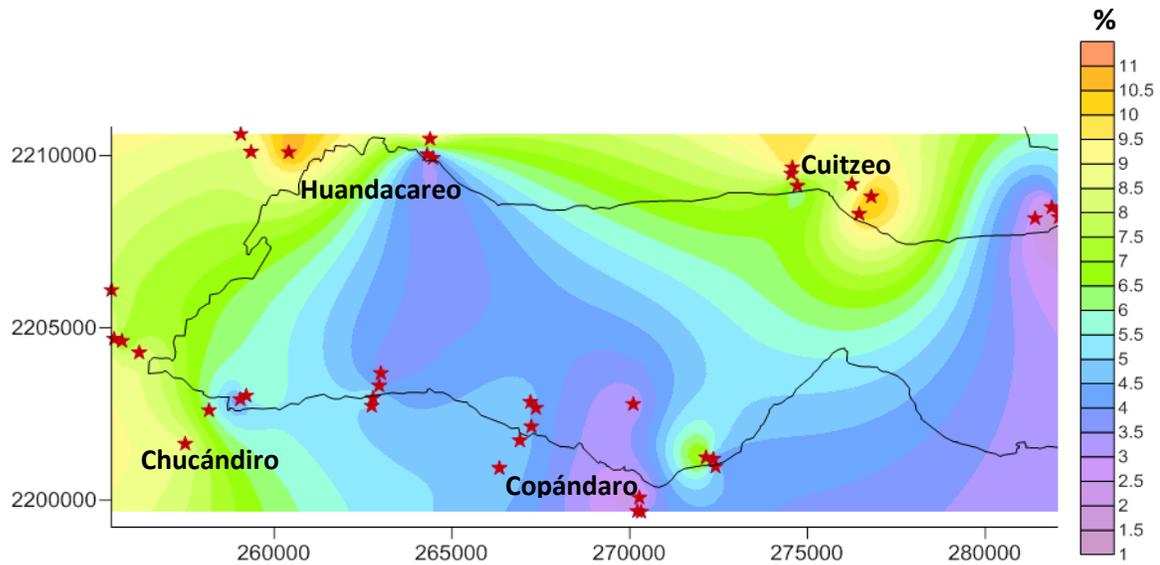
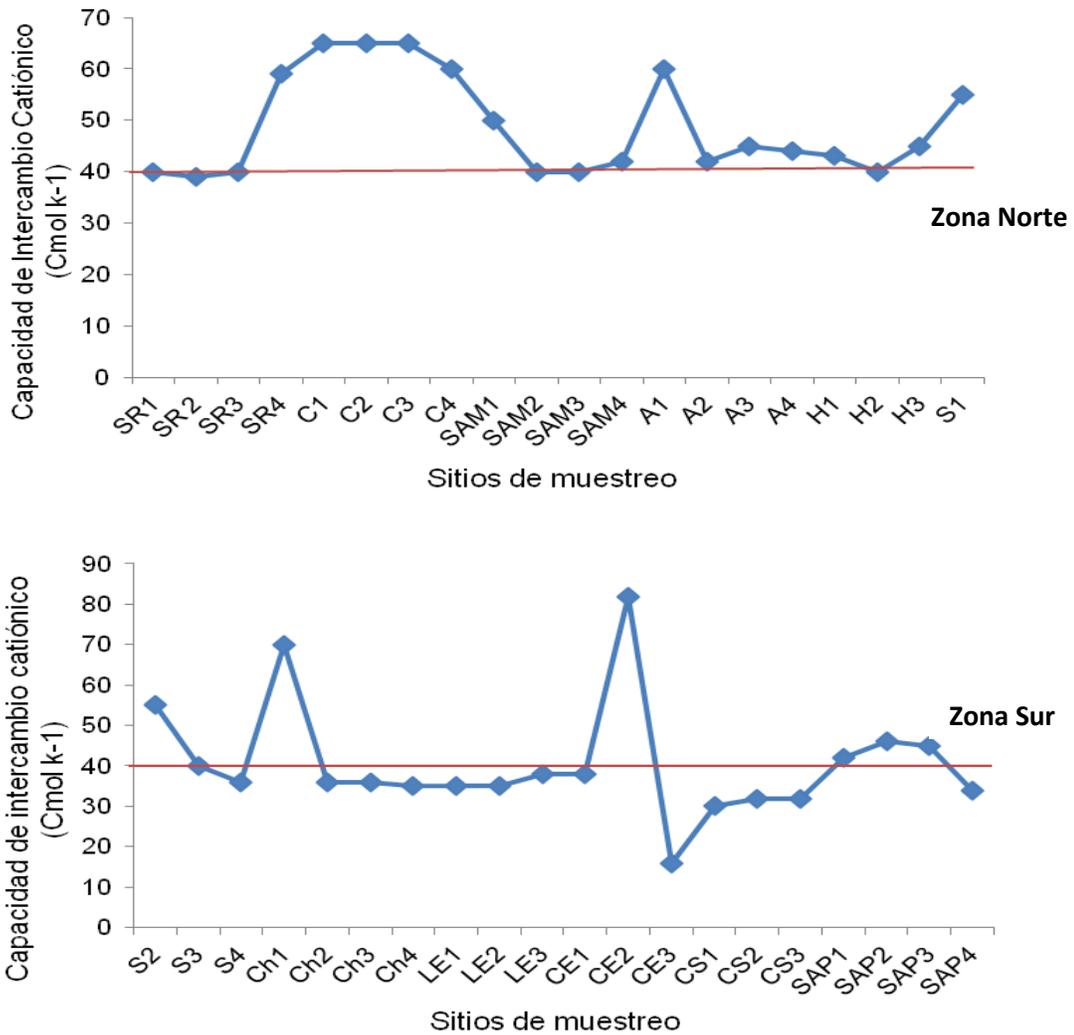


Figura 17. Distribución de materia orgánica en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). La CIC varía de clase media ($16 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$) a muy alta ($70 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$), predominan la concentración de $40 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ (Figura 18). Las clases más altas se encontraron en la comunidad de Chucándiro (Ch). Ortiz-Villanueva y Ortiz (2010) indican que al aumentar la MO también incrementa la CIC, relación que no se presenta en los suelos del presente estudio. Además, los altos valores de CIC en la mayoría de los suelos, proporcionan mayor capacidad al suelo para fijar metales (Ahumada *et al.*, 1999; Sánchez, 2003).



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucandiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 18. Capacidad de intercambio catiónico en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo

La distribución de la CIC, indica que los valores mayores a $34 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ predominan en el área de estudio y el valor más bajo se encuentra en Cuitzeo entrada (CE) (Figura 19).

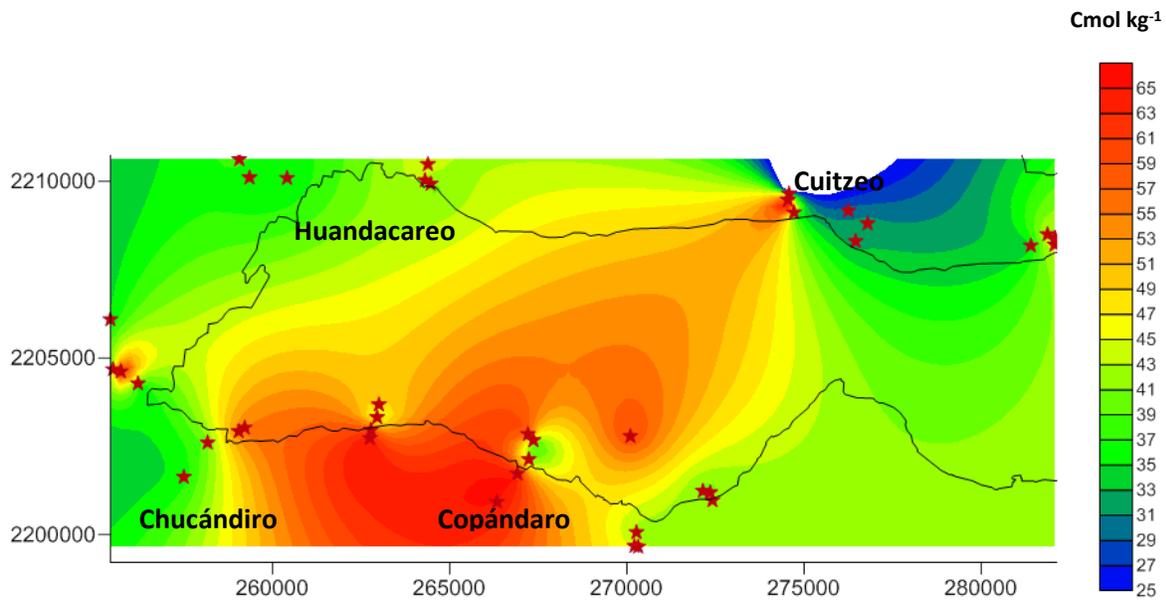
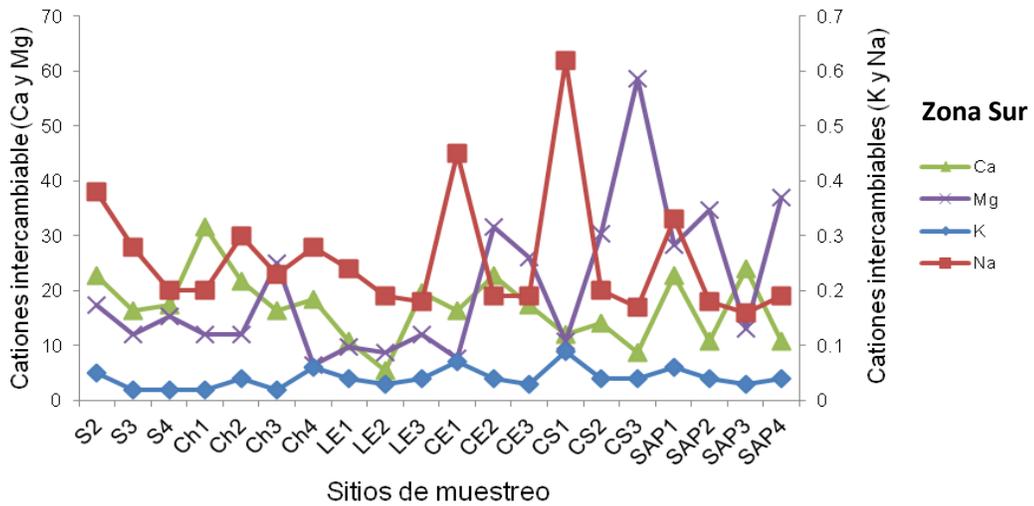
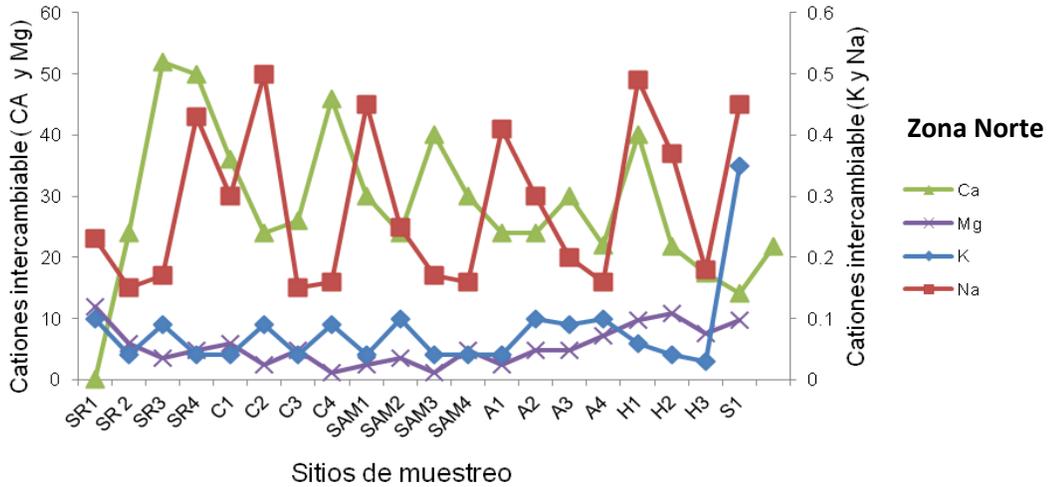


Figura 19. Distribución de la Capacidad de intercambio catiónico en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo

Bases Intercambiables (Ca, Mg, Na y K). Estas constituyen una medida del grado de fertilidad del suelo, son atraídas por las cargas negativas de los coloides del suelo. En el área del estudio. El Na y el K varían de clase muy baja (01 Cmol kg⁻¹ a 0.4 Cmol kg⁻¹ en cambio el Ca y Mg son de clase alta (mayores a 20 Cmol kg⁻¹) (Figura 20). El origen del Ca y del Mg puede deberse al material parental y probablemente a los abonos como el sulfato de amonio y urea que agregan a la tierra.



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucandiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 20. Cationes intercambiables en suelos agrícolas

La distribución espacial de las bases intercambiables se observa en la Figura 21. Para el K, la superficie mayor corresponde a valores menores a 0.7 Cmol kg^{-1} y los más altos pertenecen a Arúmbaro (A) y el Salitre (S). Para el Na, los sitios de San Agustín del Pulque (SAP) presentan los valores más bajos y ocupa menor superficie.

La distribución del Ca con valores altos (mayores a 10 Cmol kg⁻¹) y superficie menor, se presenta en Arúmbaro (A), Copándaro (C) y el Salitre (S), en cambio, el Mg con valores menores a 17 Cmol Kg⁻¹ ocupa mayor superficie.

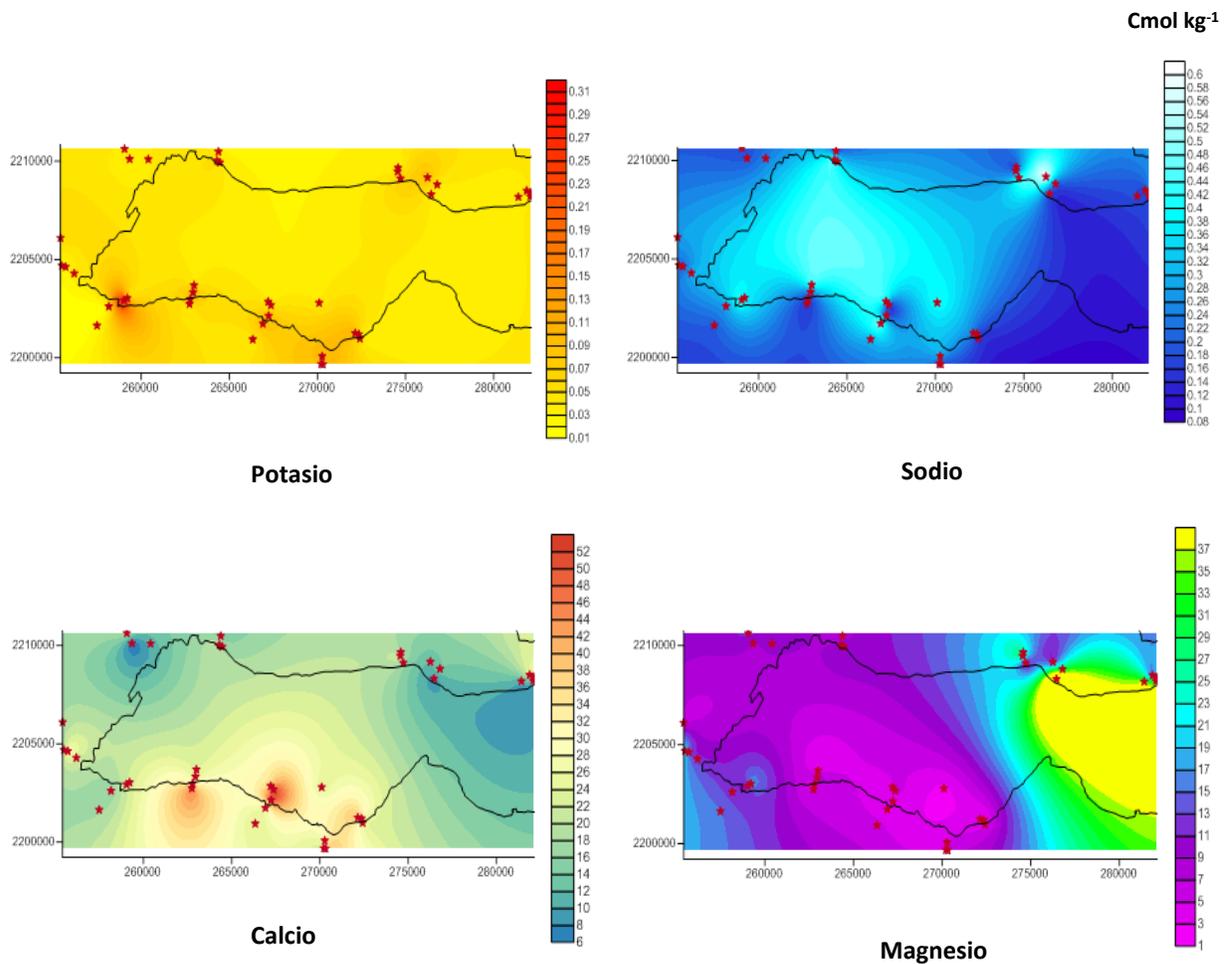


Figura 21. Distribución espacial de cationes en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Elementos Traza

La concentración de *ET* se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Concentración de elementos traza en suelos agrícolas en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

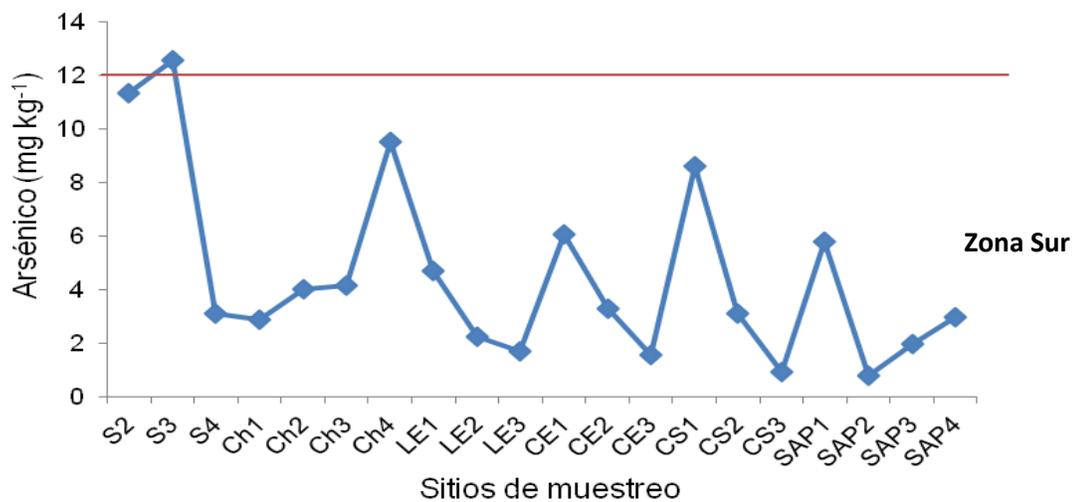
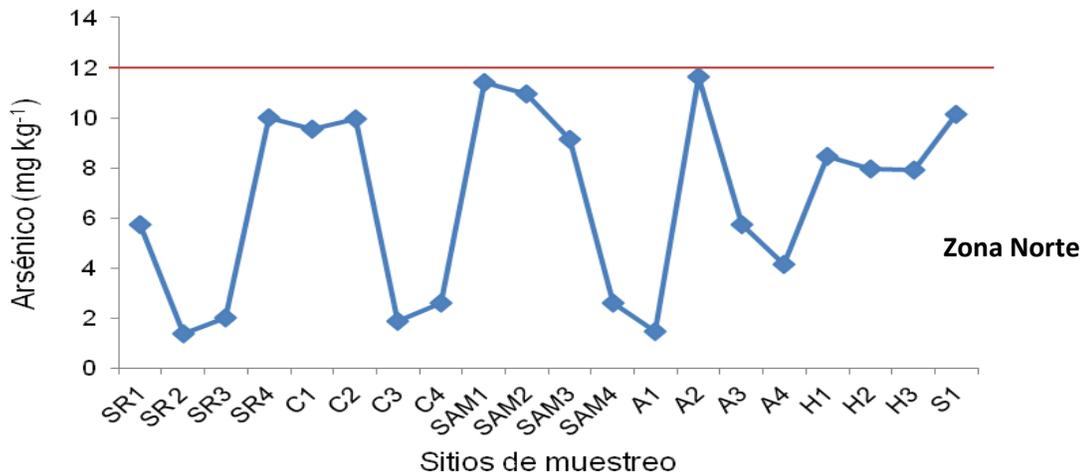
Muestra	Nomenclatura de sitios	As	Cd	Cu	Fe	Ni	Zn
		-	-	mg kg ⁻¹	-	-	-
1	SR1	5.7185	1.7	11.7	12647	15.2	26.4
2	SR2	1.366	1.7	14.5	19153	30.6	38.9
3	SR3	2.014	2.6	15.6	16543	26.4	36.1
4	SR4	10.023	2.7	12.6	18355	29.7	40.7
5	C1	9.560	2.6	14.1	16099	27.7	52.5
6	C2	9.977	2.8	13.0	20475	27.9	39.8
7	C3	1.875	1.8	7.2	12568	21.7	29.1
8	C4	2.616	1.2	9.6	13434	22.7	47.1
9	SAM1	11.412	2.6	12.9	14513	31.5	65.2
10	SAM2	10.949	2.4	9.0	24721	22.0	38.9
11	SAM3	9.144	2.5	8.8	10258	23.5	30.9
12	SAM4	2.616	1.5	10.2	13989	33.5	40.5
13	A1	1.458	0.6	9.1	14549	27.6	40.2
14	A2	11.644	1.3	4.4	8287	19.1	28.1
15	A3	5.718	1.0	12.3	16661	32.0	46.8
16	A4	4.144	0.9	8.8	13568	26.5	39.5
17	H1	8.449	1.3	6.7	13839	15.3	25.1
18	H2	7.940	1.5	3.9	6314	11.4	18.4
19	H3	7.894	1.1	19.7	7542	12.6	49.3
20	S1	10.116	1.3	6.3	8940	10.3	24.4
21	S2	11.319	1.9	9.6	10212	14.2	41.7
22	S3	12.569	1.9	16.2	15726	17.0	41.6
23	S4	3.079	1.3	3.9	6889	10.5	20.0
24	Ch1	2.894	0.8	12.9	14899	28.1	29.9
25	Ch2	4.005	0.2	14.8	9132	10.2	45.1
26	Ch3	4.144	1.3	10.7	9662	16.4	32.6
27	Ch4	9.514	0.8	14.8	25581	18.9	47.8
28	LE1	4.699	1.0	16.2	21328	16.8	52.3
29	LE2	2.245	0.7	11.8	23413	14.8	40.9
30	LE3	1.690	1.9	28.1	11922	17.1	76.5
31	CE1	6.042	0.1	0.6	3103	8.7	15.0
32	CE2	3.264	1.3	10.5	5602	11.7	40.4
33	CE3	1.551	0.6	6.6	4062	6.9	30.7
34	CS1	8.588	1.0	7.3	13854	19.3	49.7
35	CS2	3.079	0.8	3.8	9197	6.9	45.4
36	CS3	0.903	1.1	7.5	6084	14.3	33.1
37	SAP1	5.764	1.7	10.4	6768	10.1	41.6
38	SAP2	0.764	1.4	3.6	6159	5.7	28.6
39	SAP3	1.968	0.2	4.7	6878	6.3	20.9
40	SAP4	2.986	1.0	8.8	5807	12.6	30.9

Localidades= SR: Santa Rita; C: Copándaro; SAM: San Agustín del Maíz; A: Arúbaro; H: Huandacareo; S: Salitre Ch: Chucándiro; LE: La Estancia; CE: Cuitzeo entrada oriente; CS: Cuitzeo salida; SAP: San Agustín del Pulque.

De acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT-2004 (DOF, 2007), la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA, 2006) y la Agencia ambiental Holandesa (CCE, 2002), los límites máximos permisibles de algunos *MP* en suelos se presentan en el Cuadro 5.

Arsénico (As). En general, los sitios estudiados presentan concentraciones de **As** que varían de 0.76 mg kg⁻¹ a 12.56 mg kg⁻¹ (Figura 22). Estas concentraciones están dentro de los límites máximo permisibles por la DOF (2007) y la CCE (2002), la primera con un máximo permisible de 22 mg kg⁻¹ y la segunda, de 29 mg kg⁻¹ en parcelas agrícolas (Cuadro 5).

La baja concentración de **As** es natural, suposición basada en lo reportado por Alfaro *et al.* (2002), Páez (2008) y Kram-Heydrich *et al.* (2010), quienes señalan que el **As** presente en el lago y en manantiales termales localizados en el vaso este del lago, es de origen natural y se debe a su geología. De acuerdo con Casillas (2016), el **As** en suelos varió de 0.003 a 0.009 mg kg⁻¹, concentraciones bajas en comparación con las reportadas en el presente trabajo.



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucándiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 22. Arsénico en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

La distribución espacial del **As** se muestra en la Figura 23. Los valores más bajos se encuentran en San Agustín del Maíz (SAM) y San Agustín del Pulque (SAP); los más altos en Arúmbaro (A), el Salitre (S) y Chucándiro (Ch), en donde el pH es alcalino (7.4 a 8.5), condición favorable que de acuerdo con Galán *et al.* (2010) permite que el **As** sea más móvil, en cambio, los valores que ocupan mayor distribución varían de 4.5 mg kg⁻¹ a 7.5 mg kg⁻¹.

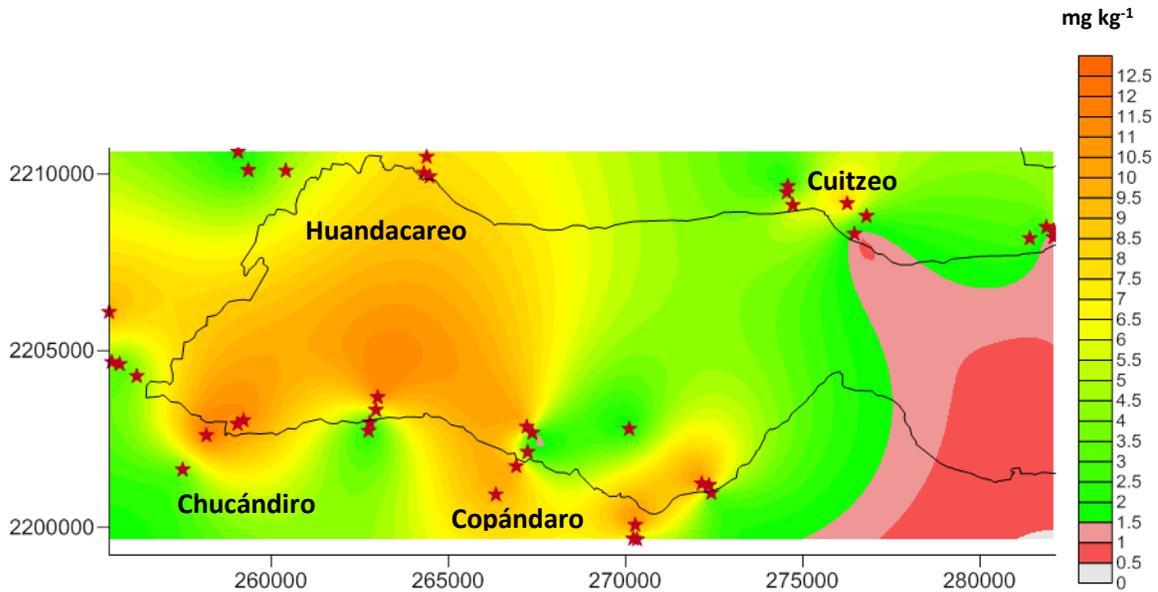
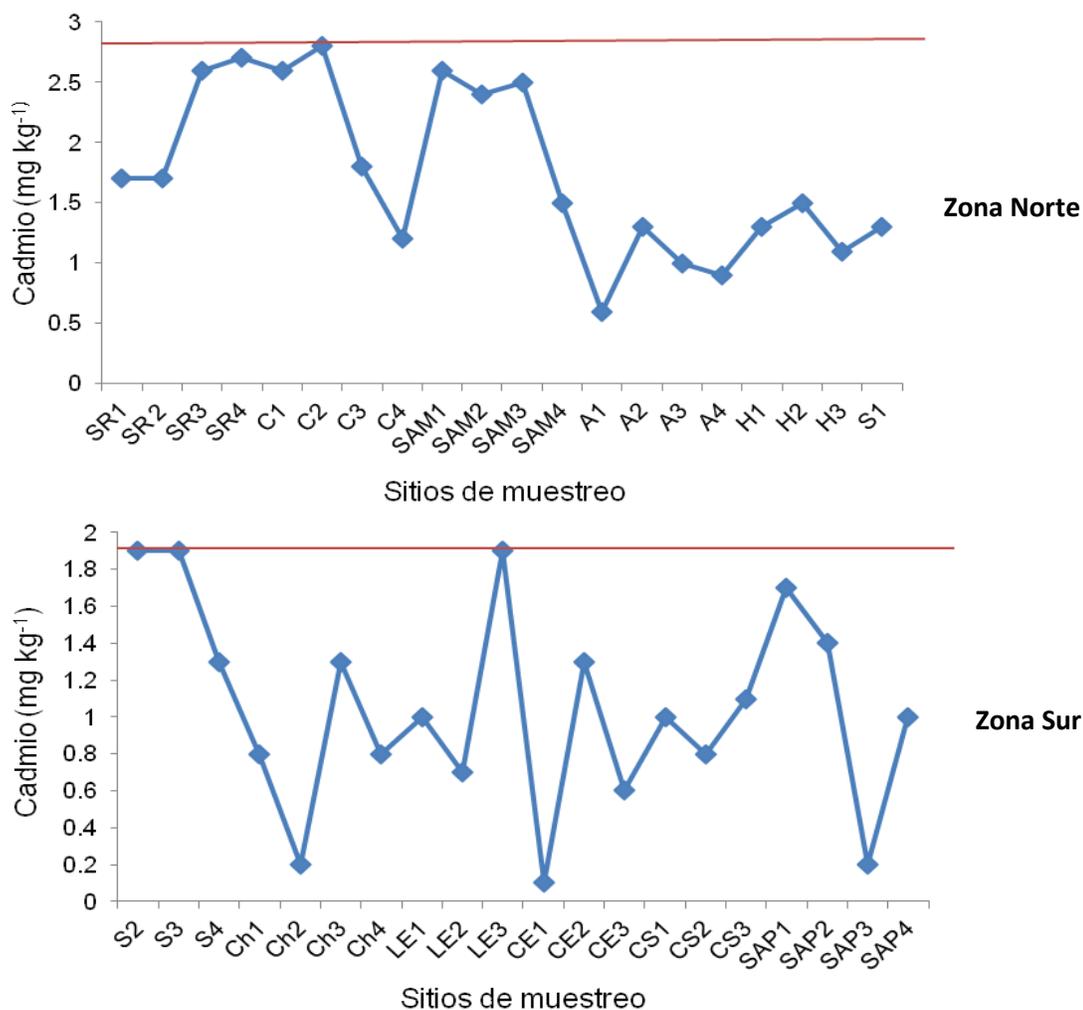


Figura 23. Distribución de Arsénico en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Cadmio (Cd)

El **Cd** varía de 0.1 mg kg^{-1} en Cuitzeo entrada (CE) a 2.8 mg kg^{-1} en Copándaro (C) (Figura 24). Estas concentraciones son mayores a las reportadas por Casillas (2016) que alcanzan valores de 0.215 mg kg^{-1} aunque en ambos casos, no rebasan el límite máximo permisible de 37 mg kg^{-1} para suelos agrícolas establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2007) sin embargo, según con la CCE (2002), el límite máximo permisible de **Cd** es 0.8 mg kg^{-1} , concentración que de acuerdo con los datos del presente estudio, solo 22.5% de los sitios cumple con la normativa y 77.5% sobrepasan el máximo permisible (>0.9 a 2.8 mg kg^{-1}); de los cuales, 17.5% tiene tres veces la concentración permitida (2.4 a 2.8 mg kg^{-1}). La presencia de **Cd** indica que existe toxicidad aunque sea a bajas concentraciones y su presencia puede deberse a las actividades antropogénicas mediante la aplicación de agroquímicos que derivan

en una problemática ambiental, la cual inicia en los suelos siguiendo la cadena trófica hasta llegar al ser humano.



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucandiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 24. Cadmio en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo

La distribución espacial del **Cd** en los sitios de estudio se presenta en la Figura 25. Los valores más altos se localizan en Copándaro (C) y en Santa Rita (SR),

en cambio, los más bajos se encuentran en Cuitzeo (CE y CS), San Agustín del Pulque (SAP) y en la Estancia (LE). El **Cd** afecta a los riñones, los sistemas óseo y respiratorio; además, está clasificado como carcinógeno para los seres humanos (OMS, 2016).

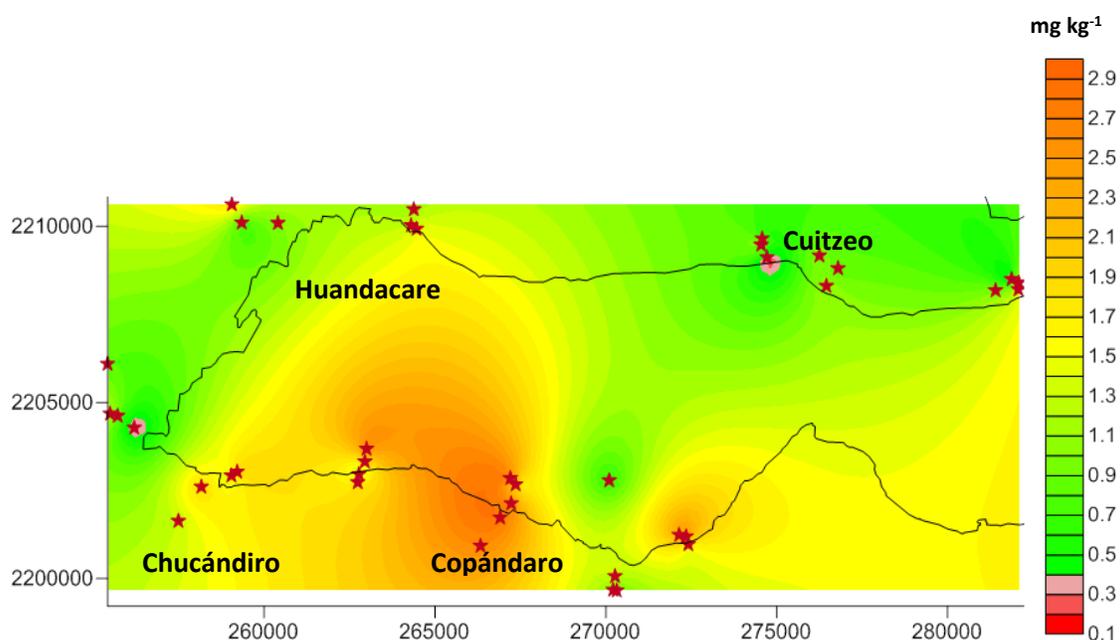
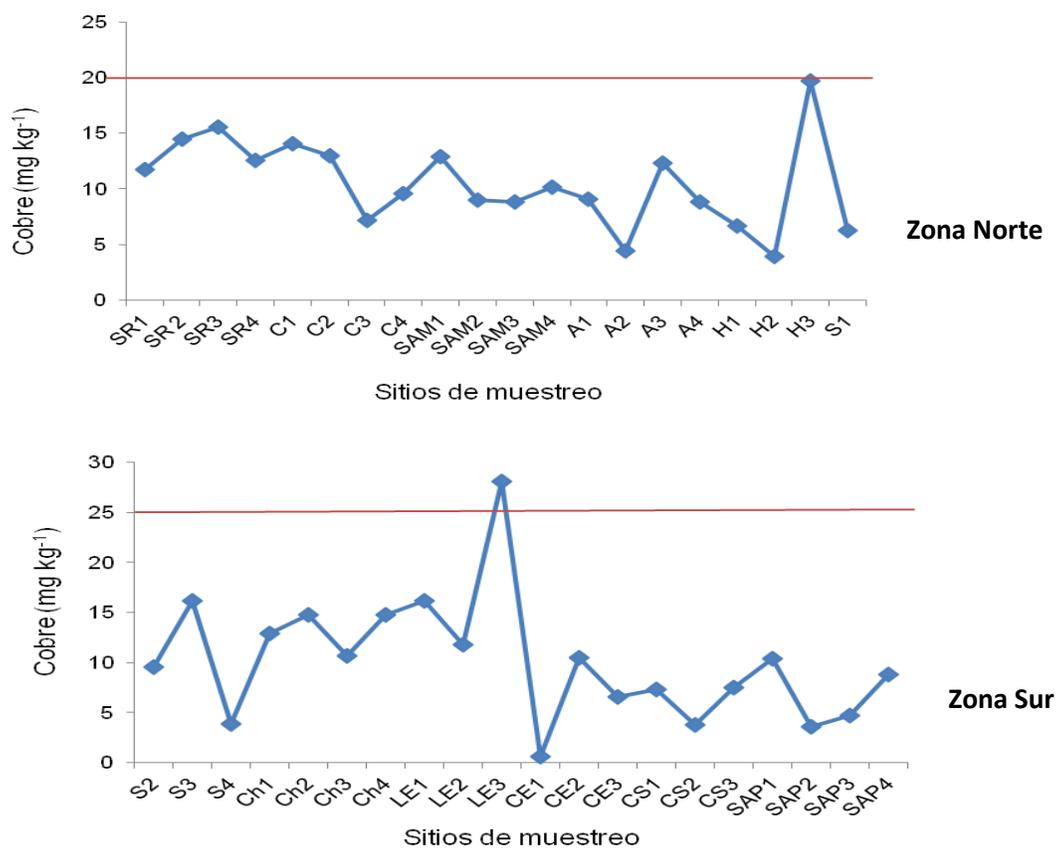


Figura 25. Distribución de Cadmio en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Cobre (Cu)

La concentración de **Cu** varía de 0.6 mg kg⁻¹ a 28.1 mg kg⁻¹ (Figura 26), concentración (5 mg kg⁻¹ a 30 mg kg⁻¹) dentro de lo permitido por la norma EPA (1996). El sitio La Estancia (LE3) tiene 28.1 mg kg⁻¹, cercana al máximo permisible según la norma mencionada, pero no así con lo establecido por Kabata- Pedias y Pedias (1995) quienes establecen que el valor máximo de Cu es de 20 mg kg⁻¹, esto indica que el sitio LE3 rebasa la concentración permitida.

Los síntomas de toxicidad aguda por **Cu** incluyen dolor abdominal, náuseas, vómito y diarrea, los cuales ayudan a prevenir una ingesta y absorción adicional de Cu; signos más graves de toxicidad incluyen daño hepático severo, falla renal, coma y muerte (OMS, 2016).



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucandiro. LE= La Estancia. CE= Cuitzeo Entrada. CS= Cuitzeo Salida. SAP= San Agustín del Pulque

Figura 26. Cobre en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo

La movilidad del **Cu** en el suelo es relativamente baja, esto puede estar influenciado por la materia orgánica y el tipo de arcilla. En México, no se han establecido valores de referencia para el **Cu** con el fin de evaluar la calidad de

los suelos agrícolas ni para generar estrategias enfocadas a la conservación y restauración de estos suelos.

El **Cu** se distribuye en la mayor parte de la superficie del área de estudio con valores menores a 9.0 mg kg^{-1} ; los más altos se localizan en los sitios La estancia (LE3), Huandacareo (H3) y en el Salitre (S3) (Figura 27).

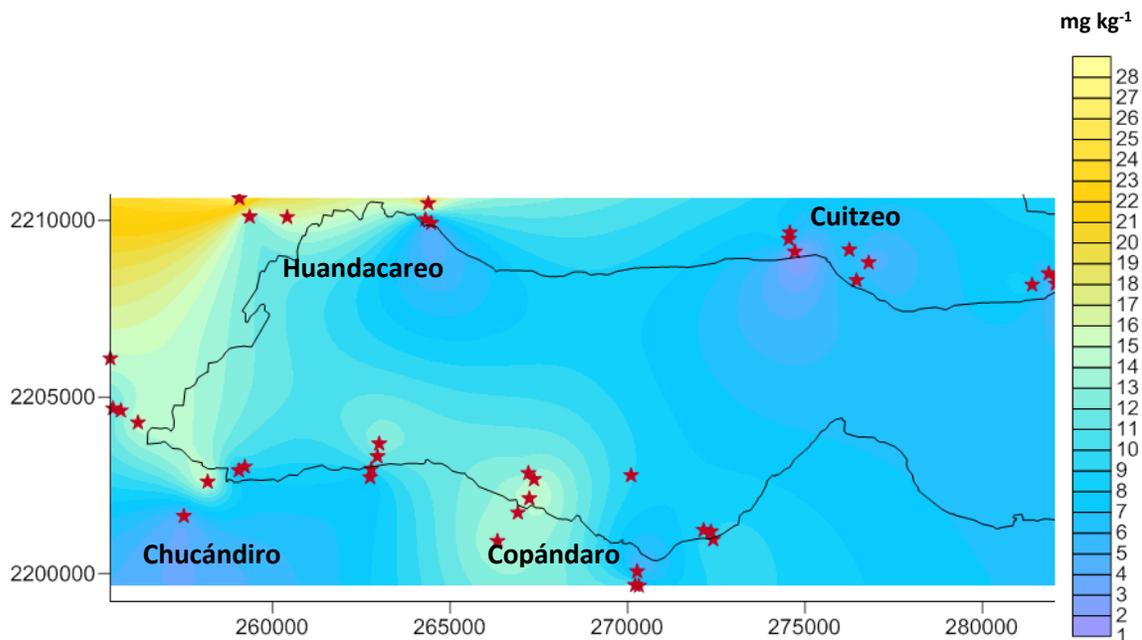


Figura 27. Distribución de Cobre en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

Hierro (Fe)

El **Fe** se encuentra en los sitios de estudio en concentraciones que oscilan de 3103 a $25\,581 \text{ mg kg}^{-1}$ (Figura 28). En general, estas concentraciones son altas y se carece de valores de referencia en las normas oficiales para evaluar los resultados mencionados. De manera regular al **Fe** se le relaciona con la composición geológica de los suelos (rocas volcánicas fracturadas, depósitos

fluviolacustres y aluviales) (Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, 2010). En estudios químicos de sedimentos, relacionan la presencia del **Fe** con la contaminación por hidrocarburos (Beg *et al.*, 2001). Se ha reportado que el río Grande de Morelia contiene alta concentración de **Fe** en la columna de agua, la cual puede estar entrando al lago de Cuitzeo; además de que el **Fe** puede ser de origen natural, aunque su dinámica en el suelo depende del tipo y cantidad de arcillas, y de la materia orgánica (Villalobos *et al.*, 2010).

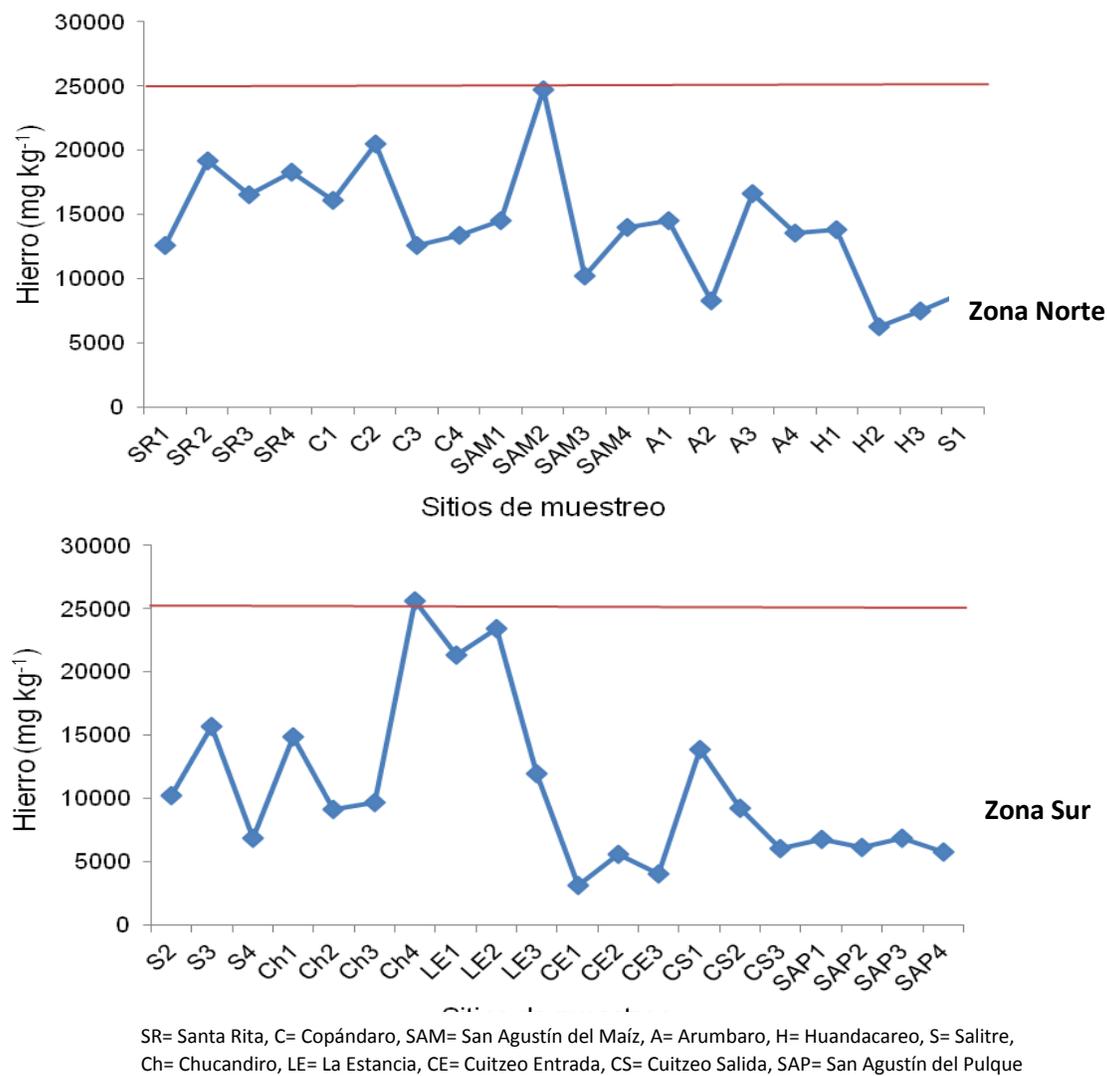


Figura 28. Hierro en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

La concentración de **Fe** con los valores mayores a 23 000 mg kg⁻¹ se localiza en San Agustín del Maíz (SAM2), Chucándiro (Ch4) y la Estancia (LE2), y los menores a 10 000 mg kg⁻¹ se distribuyen en poca superficie del área de estudio (Figura 29).

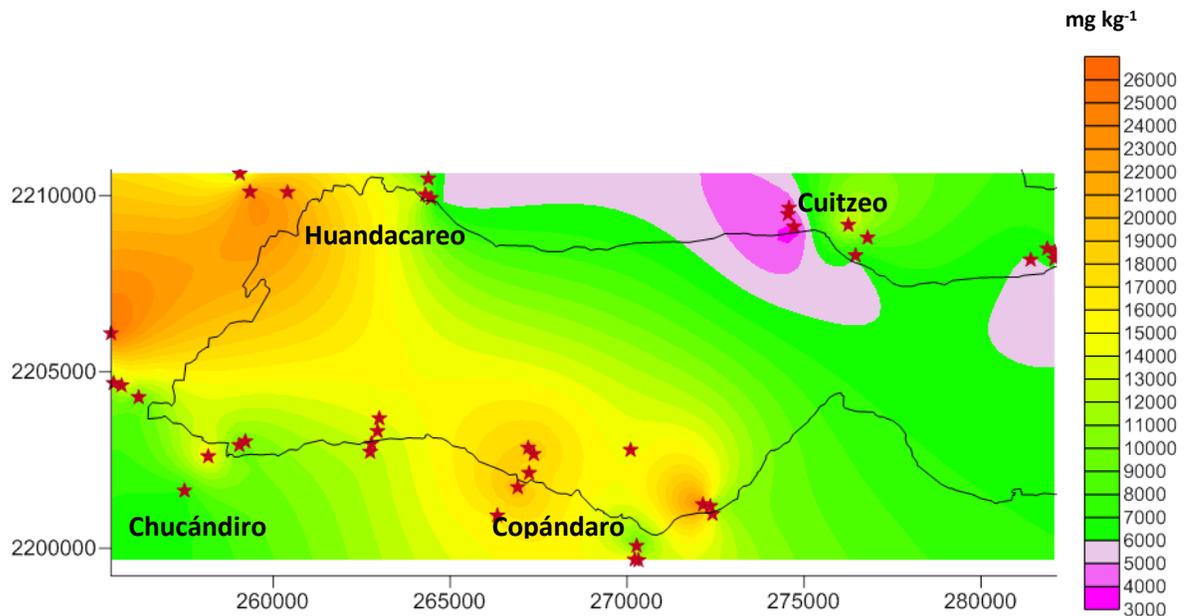
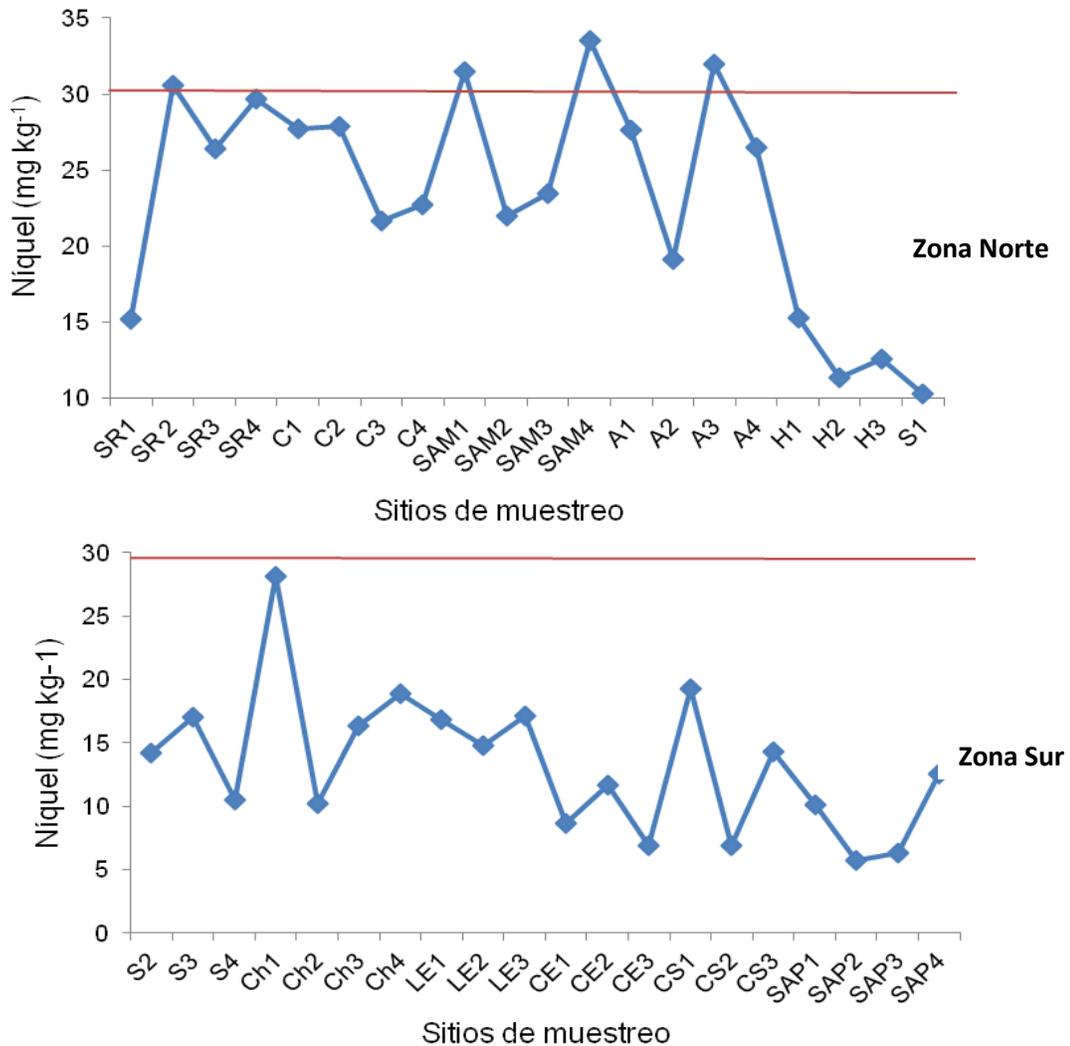


Figura 29. Distribución de Hierro en suelos agrícolas en la ribera oeste del Lago de Cuitzeo

Níquel (Ni)

La concentración del **Ni** varía de 5.7 mg kg⁻¹ a 33.5 mg kg⁻¹ (Figura 30) que de acuerdo con la CCE (2002) y la EPA (1996), están dentro de los límites máximos permisibles (50 y 100 mg kg⁻¹) (Cuadro 5), respectivamente. El **Ni** cumple funciones bioquímicas en lo seres vivos, sin embargo, cuando la concentración oscila de 10 a 100 mg kg⁻¹, es tóxico (EPA, 1996). De acuerdo estos últimos valores, únicamente los sitios CE1, CE3, CS2, SAP2 y SAP3 estarían libres de toxicidad.



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucandiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 30. Níquel en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

En la distribución espacial del **Ni** se observa que la concentración más alta se presenta en Santa Rita (SR), San Agustín del Maíz (SAM) y Arúmbaro (A), en cambio, las más bajas se localizan en Huandacareo (H), Cuitzeo (CE y CS) y San Agustín del Pulque (SAP). La mayor superficie del área de estudio tiene de 15 mg kg⁻¹ a 23 mg kg⁻¹ (Figura 31).

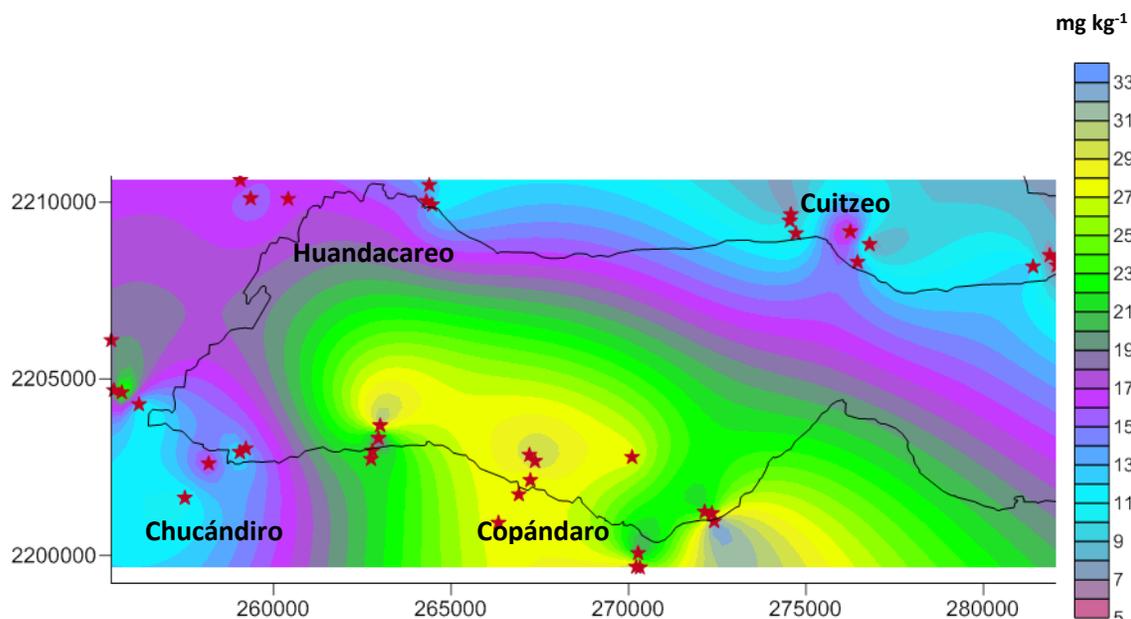
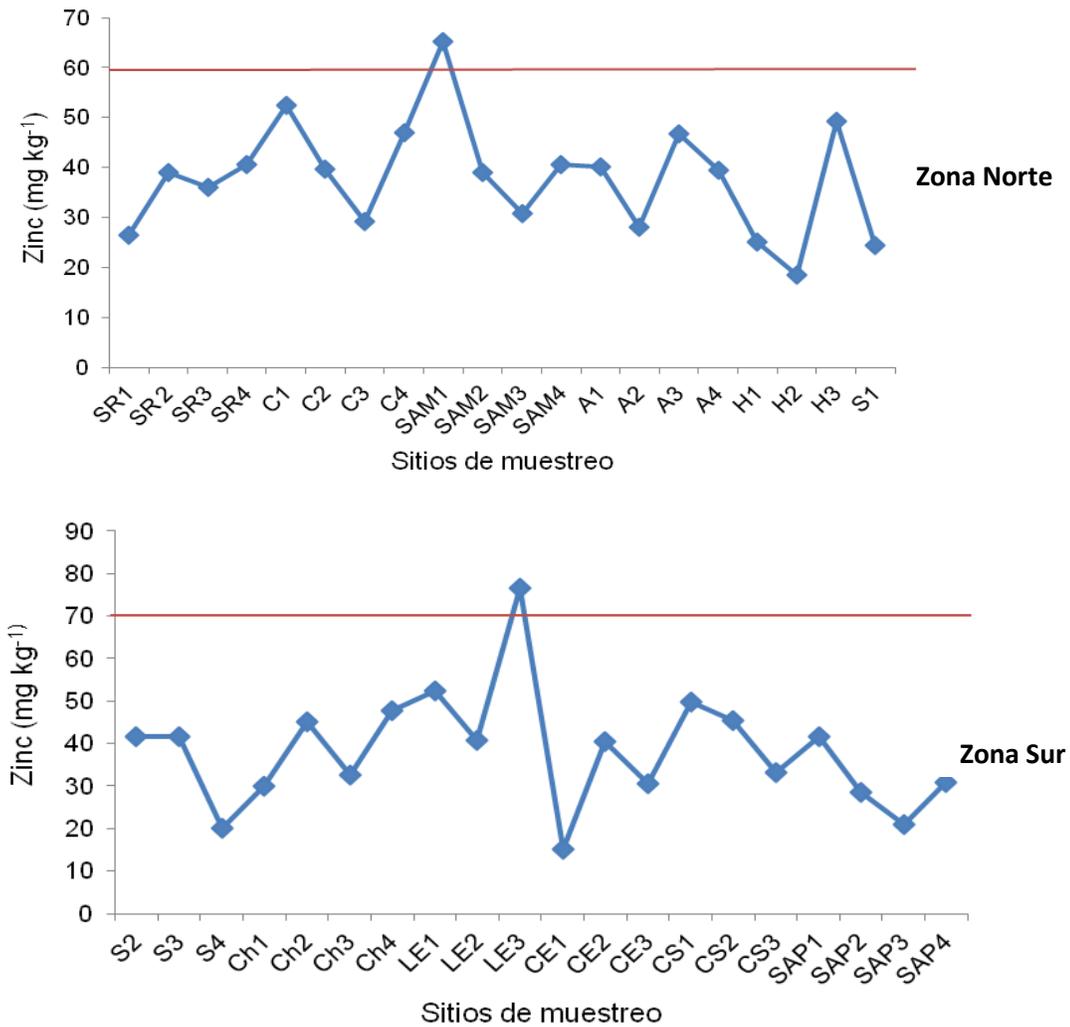


Figura 31. Distribución de Níquel en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

El Zinc (Zn)

Los sitios agrícolas muestreados alcanzan valores de **Zn** que varían de 15 mg kg⁻¹ a 76.5 mg kg⁻¹ (Figura 32). Concentración muy por debajo de los límites máximos permisibles de la CCE (2002) que son de 140 mg kg⁻¹. Los resultados de **Zn** en el presente estudio también se encuentran en el rango indicado por Kabata–Pendias (2004) para suelos agrícolas (10 y 100 mg kg⁻¹). El **Zn** forma parte de los elementos esenciales para las plantas, es un elemento de poca movilidad dentro de la planta, pero con numerosas funciones críticas. La estructura y funcionalidad de muchas enzimas dependen de la presencia de **Zn** en la planta. Casi 2800 proteínas dependen del **Zn** para sintetizarse y actuar (Cakmak, 2015). Sin embargo, en concentraciones superiores a 400 mg kg⁻¹ es tóxico (EPA, 1996).



SR= Santa Rita, C= Copándaro, SAM= San Agustín del Maíz, A= Arumbaro, H= Huandacareo, S= Salitre, Ch= Chucandiro, LE= La Estancia, CE= Cuitzeo Entrada, CS= Cuitzeo Salida, SAP= San Agustín del Pulque

Figura 32. Zinc en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

La concentración más alta de **Zn** (65.2 mg kg⁻¹ y 76.5 mg kg⁻¹) se distribuye en puntos de La Estancia (LE3) y San Agustín del Maíz (SAM1), respectivamente. Los valores más bajos (18.4 mg kg⁻¹ y 15 mg kg⁻¹) se localizan en Huandacareo (H2) y Cuitzeo entrada (CE1), respectivamente (Figura 33). La concentración del Zn que ocupa mayor superficie oscila de 34 mg kg⁻¹ a 49 mg kg⁻¹.

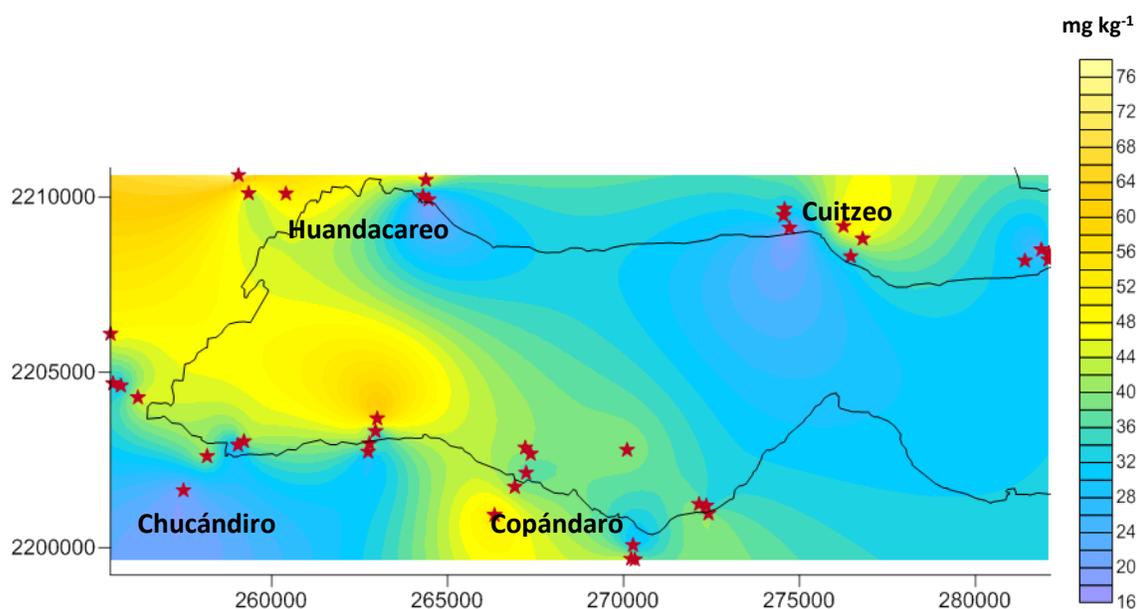


Figura 33. Distribución de Zinc en suelos agrícolas de la ribera oeste del Lago de Cuitzeo.

ENCUESTAS

El resultado de las encuestas realizadas a los agricultores del área de estudio relacionadas con el tipo de cultivo y con los fertilizantes que aplican, se muestra en el Cuadro 10, en donde se observa que 70% de los agricultores usan la urea y el sulfato de amonio como fertilizantes, y le da una rotación al cultivo. Además, mencionan que los principales problemas de salud por las tolveneras en la época de estiaje son infecciones de ojos y garganta. De acuerdo con Casillas (2016) las enfermedades gastrointestinales, respiratorias y dermatológicas que aquejan a la población humana del municipio de Copándaro se relacionan con **As, Cr, Ni y Zn** encontrados en Copándaro, Santa Rita y San Agustín del Maíz.

El aporte de *ET* en suelos agrícolas puede ocurrir a través del depósito atmosférico, del riego y de las aplicaciones de fertilizantes y plaguicidas.

Cuadro 10. Resultados de las encuestas.

Localidad	Cultivo	Fertilizante	Rota cultivo	Infecciones
Arúmbaro	Cilantro, cebolla, acelga, repollo y flor nube	Furaran, urea, SA y orgánico	Si	Ojos
Copándaro	Cebolla y repollo	SA y urea	Si	Ojos y garganta
Cuitzeo	Maíz	Urea	No	Ojos y garganta
Chucándiro	Maíz y garbanzo	SA	Si	Garganta
Huandacareo	Maíz y sorgo		No	Garganta y ojos
La Estancia	Maíz y sorgo	SA y urea	Si	
San Agustín del maíz	Maíz, frijol y flor roja	SA y urea	Si	Garganta
San Agustín del Pulque	Maíz	Urea	No	Ojos
Santa Rita	Pepino, tomate y cebolla	Fosfonitrato SA Nitrato	Si	Garganta
Salitre	Maíz y avena	SA y urea	Si	Ojos

SA= sulfato de amonio

El suelo se puede contaminar con *ET* a través de la aplicación de fertilizantes como la urea, sulfato de amonio, los fosfatos, estiércol y purines, entre otros. Los fertilizantes minerales aportan concentraciones altas de **Cd** y moderadas de **Cu**. En el Cuadro 11 se indica el aporte de *ET* al suelo de acuerdo con el tipo de fertilizante.

Cuadro 11. Concentración de *ET* en fertilizantes (Wilcke y Dohier, 1995)

fertilizante	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
			mg kg ⁻¹			
Urea	0.15	0.66	0.38	0.48	0.36	2.4
Sulfato de amonio	0.06	10.7	2.40	5.40	0.77	1.6
Superfosfato	20.8	224	21.4	31.3	7.2	380
Nitrógeno	0.10	6.60	5.20	10.4	1.0	4.0

De acuerdo con el aporte de los *ET* por los fertilizantes, éstos se pueden relacionar la concentración de **Cd**, **Cu**, **Ni** y **Zn**. La concentración de estos elementos es más alta que las reportadas por Casillas (2016) en suelos que no son agrícolas, por lo que, se considera que los fertilizantes pueden ser la fuente de aporte de dichos elementos en los suelos agrícolas al oeste de la ribera del Lago de Cuitzeo.

9.- CONCLUSIONES

Los suelos de uso agrícola en las comunidades de la ribera oeste de la Cuenca del Lago de Cuitzeo presentan concentraciones de elementos traza dentro de los valores de la normativa NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, los cuales se relacionan con los contenidos de MO, CIC, pH y el uso de fertilizantes inorgánicos.

El **Cd** rebasa el límite máximo permisible de acuerdo con la normatividad de la Agencia ambiental Holandesa.

La actividad agrícola intensiva que se presenta en la zona de estudio (hasta tres ciclos por año) influye de manera directa en la presencia de *ET* que se acumulan en los sitios de estudio.

10. RECOMENDACIONES

Abordar estudios relacionados con los efectos de los *ET* en los sistemas agrícolas y sus posibles transferencias a las plantas que podría derivarse en problemas de salud pública en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Realizar un estudio a detalle en la parte de las comunidades en donde hizo falta muestreo en este trabajo, para contar con un panorama más amplio.

Monitorear los suelos agrícolas, ya que el uso constante de fertilizantes puede ocasionar un aumento en la concentración de *ET* hasta causar problemas de salud en las personas que consuman los cultivos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Abollino O, Aceto M., Malandrino M., Mentasti E., Sarzanini C., Petrella F. 2002. Heavy metals in agricultural soils from Piedmont, Italy. Distribution, speciation and chemometric data treatment.
- Acosta A. M. 2007. Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Tesis para obtener el grado de biólogo.
- Ahumada I., Mendoza, J., Ascar. L. 1999. Sequential extraction of heavy metals in soils irrigated with wastewater. *Commun. Soil Sci Plant Anat.*
- Alfaro R., V. Martínez, N. Segovia, M.B.E. López, M.A. Armienta, P. Peña, J. Rangel y J. L. Seidel. 2002. Radon behavior in springs and wells around Cuitzeo Lake, Lerma River Basin, Mexico. *Geofísica Internacional*, 41 (4): 439-445.
- 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.
- Bravo E., M., F. Oliva G., E. Patrón R., Mendoza C., Camacho, G. B., & López, E. G. 2008. La cuenca del lago de Cuitzeo: problemática, perspectiva y retos hacia el desarrollo sostenible. *Fondo Editorial Morevallado. Morelia, Michoacán, México.*
- Bautista, Z. F. 1999. Introducción al Estudio de la Contaminación del Suelo por Metales Pesados. Ediciones de La Universidad Autónoma de Yucatán.
- Bautista F., Campuzano. E., Delgado C, y Goguitchaichvili A. 2017. Índices de sorción de metales pesados en suelos urbanos: el caso de Morelia, Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.*
- Beg M.U., Al-Muzaini S., Saeed T., Jacob P.G., Beg K.R., Al-Bahloul M., Al-Matrouk K., Al-Obaid T. y Kurian A. 2001. Chemical contamination

and toxicity of sediment.

- Cabrera A., L. E. Medina, M. Alcalá, J. F. Sánchez y J. M. Ayala. 2010. Suelos. pp 42-45. *In*: Cram S., L. Galicia, I. Israde-Alcántara. Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socio ambiental.
- Casillas, C. M. 2011. Caracterización y análisis espacial de las propiedades de suelos urbanos contaminados por metales pesados.
- Casillas, C. M. 2016. Metales pesados y su impacto en la población humana del municipio de Copándaro, Michoacán. Tesis de Maestría en Geociencias y Planificación del territorio. UMSNH.
- Cakmak, I. 2015. Zinc para la Producción Global Sustentable de Cultivos y mejores Dietas Nutricionales. Conferencia del Curso Internacional de Nutrición de Cultivos. Intagri.
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 2002. Canadian Environmental Quality Guidelines; updated.
- Córtés E., J. L. 2015. Color de polvos urbanos como indicadores de contaminación por elementos potencialmente tóxicos el caso de Ensenada, Baja California. Tesis de Maestría. U.M.S.N.H.
- Crosara A. 2012. El suelo y los problemas ambientales. Disponible <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Suelos%20y%20problemas%20ambientales.pdf>.
- Cira M., J. E. 2012. Estudio de contaminación por metales pesados en suelos agrícolas de la Piedad Mochoacán, México.
- Delgado C., I. Israde, F. Bautista, A. Gogichaishvili, C. Márquez, R. Cejudo, J. Morales, I. González. 2015. Metales pesados en suelos urbanos de Morelia, Michoacán: influencia del uso de suelo y del tipo de vialidad.

- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2001. 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.
- DOF. 2007. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Domènech X. Y J. Pera. 2006. Química ambiental de sistemas terrestres. Editorial Reverte.
- Donoso Z., C. 1992. Ecología forestal. Editorial Universitaria, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Galán, E., H., Romero., A., B. 2010. Contaminación de suelos por metales pesados. Departamento de Cristalografía, Minerología y Química Agrícola.
- Garduño-Monrroy V.H. e Israde-Alcántara I. 2010. Geología. Capítulo 1. Características físicas. *In*: Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su Geografía y Entorno Socioambiental. ISBN: 978-607-02-1830-9.
- González M., V. 2018. Disponibilidad de metales traza en suelo y agua de la comunidad de Capula, Michoacán.
- Hernández O. G., M. A. Segura C., L. C. Álvarez G. P., R. A. Aldaco N., M. Fortis H. y G. González C. 2013. Comportamiento del arsénico en suelos de la región lagunera de Coahuila, México.
- Jaramillo J, D. F. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Medellín. 613 pp.
- Kabata-Pedias, A., Pedias H., 1995. Trace Elements in Soils and Plants.
- Kram-Heydrich S., C. Ponce de León, P. Fernández-Kabata-Pendias A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*. 122(2):143-149.

- Méndez, J. P., C.A. Ramírez G., A.D. Gutiérrez R., F. P. García. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10: 29 - 44.
- Moreno, J. R., & A. N. Retana. 1995. Flora y vegetación acuáticas del lago de Cuitzeo, Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana* (31), 1-17.
- Muñoz, I. D. J, A. Soler A., F López G., M. M. Hernández. 2013. Edafología manual de métodos de análisis de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de estudios superiores Ixtacala, ISBN:978-607-02-3877-2.
- Noélla M. 2017. Los 3.000 volcanes monogenéticos mexicanos, causa de estudio y atención. Entrevista. Disponible en: <https://www.efe.com/efe/america/mexico/los-3-000-volcanes-monogeneticos-mexicanos-causa-de-estudio-y-atencion/50000545-2894588>
- Ortíz–Villanueva, B., C. A. Ortiz S. 2010. Edafología. 7ª ed. en español. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. México, D. F. V. A Gómez C. (Ed).
- Páez A. 2008. Evaluación de la concentración de arsénico y calidad del agua subterránea en función de su manejo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Perez G., F. V., Morales, V. M. C. 1999. La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México. Texas Center for Policy Studies.
- Rangel M. E. A, L. E. Montañez H., M. P. Luévanos E. y N. Balagurusamy, 2015. Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos.
- Rico R. A y H. Del Castillo. 2005. La ingeniería de los suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Limusa Noriega editores. Volumen 1. ISBN: 968-18-0054-0. Disponible en:

https://books.google.com.mx/books?id=rU_pA257zUEC&pg=PA106&dq=andesita&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi808vehpLLAhWGSiYKHYq3BR0Q6AEIJzAC#v=onepage&q&f=false.

- Romero, 2009. Contaminación por metales pesados, Bolivia. Scientific Electronic Library Online Viceministerio de Ciencia y Tecnología.
- Rodríguez G. N., M.A. Segura C., J. A. Orozco V., M. Fortis H., P. Preciado R., J. Olague R. y P. Yescas C. 2017. Arsénico edáfico y su distribución en el distrito de riego 017: uso de métodos de interpolación.
- Sánchez B., M. I. 2003. Determinación de metales pesados en suelos de Medina del campo (Valladolid). Contenidos extraíbles, niveles fondo y de referencia. Tesis de Doctorado. Universidad de Valladolid. Disponible en: http://bvc.s3.dev.cervantesvirtual.com/pdfparser/00101_48e-82b2-11df-acc7-002185ce6064.pdf (Revisado el 20 de junio de 2018).
- Siebe, C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo, México. Revista internacional de contaminación ambiental, 10:15 - 21.
- US-EPA. 1996. Soil screening guidance: technical background document. EPA/540/ R-95/128. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, p A-5
- Valdés F., 1999. La contaminación por metales pesados en torreón, Coahuila, México. En Defensa del Ambiente, A.C.Torreón, Coahuila.
- Valenzuela A. 2014. Residuos de plaguicidas organoclorados en suelos agrícolas. *Terra Latinoam* [online]. 2014, vol.32, n.1, pp.1-11. ISSN 2395-8030.
- Villalobos B. 2008. Contenido de metales pesados en agua y sedimentos en la desembocadura del río grande de Morelia en el lago de Cuitzeo. Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

- Villalobos-Castañeda B., R. Alfaro-Cuevas, R. Cortés-Martínez, V. Martínez-Miranda y L. Márquez-Benavides. 2010. Distribution and Partitioning of iron, zinc, and arsenic in surface sediments in the grande river mouth to Cuitzeo lake, México. Springer Science. *Eviron Monit Assess* (2010) 166:331-346. DOI 10.1007/10661-009-1005-7.
- Vidal R., 2010. Clima pp 24-27 *in*: Cram S., L. Galicia. e I. Israde. Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental.
- Villanueva, S., A. Botello V. 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y El Caribe Mexicano: una revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 8: 47-61.
- Wilcke, W. H. Dohler. 1995. Schwermetalle in der Landwirtschaft (Farming and heavy metals) Kuratorium fur Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Darmstadt Germany.

ANEXOS

Anexo 1. Digestión ácida (método Epa 3050 B)

DIGESTIÓN ÁCIDA PARA SEDIMENTOS

Material y equipo

Recipientes de digestión manta de calentamiento

Matraces de bola de 250 mL, embudo de vidrio

Refrigerante, probeta de 100 mL

Mangueras, matraz aforado de 100 mL

Bomba para agua, pipetas volumétricas (5 y 10 mL)

Horno de secado, pipetas (1, 5 y 10 mL)

Termómetro (0 a 200 °C), soporte universal

Papel filtro Whatman No. 40, espátula

Balanza analítica Perilla para pipetear

Reactivos

Agua desionizada

HNO₃ de alta pureza

H₂O₂ al 30%

HCl de alta pureza

Procedimiento

1. Pesar 1 g de sedimento seco y transferirlo al recipiente de digestión.
2. Preparar HNO₃ 1:1 (5 mL de agua desionizada y 5 mL de HNO₃), añadir 10 mL de HNO₃ 1:1, mezclar ligeramente el sedimento y cubrir con el aparato de reflujo.

3. Calentar la muestra a 95 ± 5 °C en reflujo y una vez controlada la temperatura esperar 10 min sin permitir ebullición. Dejar enfriar la muestra.
4. Una vez enfriada la muestra, añadir 5 mL de HNO_3 , calentar en reflujo durante 30 min, si se generan humos color café, se debe repetir este paso las veces que sean necesarias hasta no generar humos cafés.
5. Evaporar la solución hasta aproximadamente 5 mL sin ebullición o calentar a 95 ± 5 °C sin ebullición durante 2 h. Mantener siempre cubierta la muestra con solución en el recipiente.
6. Terminado el paso anterior dejar enfriar y, añadir 2 mL de agua desionizada y 3 mL de H_2O_2 al 30%, calentar en reflujo, teniendo cuidado de no calentar demasiado para evitar efervescencia excesiva y disminuir pérdidas. Calentar hasta que no haya efervescencia y enfriar el recipiente.
7. Una vez enfriado el recipiente, continuar añadiendo H_2O_2 al 30% en alícuotas de 1 mL con calentamiento hasta que la efervescencia sea mínima y la apariencia de la muestra no cambie.
8. **NOTA:** No añadir más de 10 mL de H_2O_2 al 30%.
9. Terminado el paso anterior dejar enfriar, añadir 10 mL de HCl y calentar en reflujo durante 15 min.
10. Después del paso anterior, enfriar la muestra, filtrarla con papel Whatman No. 40 recibiendo el líquido en un matraz aforado de 100 mL y llevar al volumen con agua desionizada.