



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS PUEBLA

POSTGRADO DE ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

Determinación de la concentración de metales pesados en agua, suelo y cultivos regados con agua de la Presa Manuel Ávila Camacho

NELLI NATALIA LARENAS BAZÁN

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

PUEBLA, PUEBLA

2010



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

CAMPUE- 43-2-03 ANEXO

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe **Nelli Natalia Larenas Bazán** alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del Profesor **Dr. Mario A. Tornero Campante** por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **Determinación de la concentración de metales pesados en agua, suelo y cultivos regados con agua de la Presa Manuel Ávila Camacho** y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, el Consejero o Director de Tesis y la que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Puebla, Puebla 26 de noviembre de 2010.

Nelli Natalia Larenas Bazán

Firma

Dr. Mario A. Tornero Campante

Vo. Bo. Profesor Consejero o Director de Tesis

La presente tesis, titulada: **Determinación de la concentración de metales pesados en agua, suelo y cultivos regados con agua de la presa Manuel Ávila Camacho**, realizada por la alumna: **Nelli Natalia Larenas Bazán**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. MARIO A. TORNERO CAMPANTE

ASESOR:



DR. ENGELBERTO SANDOVAL CASTRO

ASESOR:



DR. JOSÉ VÍCTOR TAMARÍZ FLORES

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN AGUA, SUELO Y CULTIVOS REGADOS CON AGUA DE LA PRESA MANUEL ÁVILA CAMACHO

Nelli Natalia Larenas Bazán, MC.

Colegio de Postgraduados, 2010

RESUMEN

La presa Manuel Ávila Camacho se construyó para aprovechar los escurrimientos de los ríos Atoyac y Alseseca, con propósitos de riego. La contaminación de estos ríos tiene su origen en las descargas de aguas residuales urbanas e industriales, y el uso de aguas residuales no tratadas para la irrigación de cultivos agrícolas, ha contribuido en la contaminación de suelos y plantas por metales pesados (MP), lo cual representa un riesgo para la salud humana y animal. En este sentido, el objetivo de la investigación consistió en la determinación de la concentración de MP, características físicas y químicas en agua residual y suelo, así como la concentración de MP en cultivos de maíz y alfalfa ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo. Se seleccionaron ocho sitios de muestreo y un testigo (agua de pozo) para el análisis de agua, los cuales se ubican sobre el canal principal y canales secundarios, y se seleccionaron cinco sitios para el análisis de suelo y planta. El análisis de MP (Pb, Cd, Ni, Cu, Zn y Fe) en agua residual, suelo y planta se realizó por espectrofotometría de absorción atómica, también se analizaron pH, C. E., Cl⁻, PO₄, SO₄⁻, Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, textura y materia orgánica. El trabajo de investigación permitió identificar la presencia de MP (Pb, Ni, Cu, Zn y Fe) en agua, suelo y cultivos de maíz y alfalfa, los cuales se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, a excepción de Pb en cual rebasa los límites establecidos en norma en cultivos de maíz y alfalfa, y si se consumen productos contaminados por éste metal puede ocasionar efectos adversos en el ser humano.

Palabras clave: contaminación, metales pesados, agua, suelo, planta.

DETERMINATION OF THE CONCENTRATION OF HEAVY METALS IN WATER, SOIL AND CROPS IRRIGATED WITH WATER OF THE MANUEL ÁVILA CAMACHO DIKE

Nelli Natalia Larenas Bazán, MC.

Colegio de Postgraduados, 2010

ABSTRACT

The Manuel Ávila Camacho dike was built for take advantage glide of Atoyac and Alseseca rivers, with irrigation purpose. The pollution of these rivers has their origin in the residual water discharge proceeding of industrial and domestic use, and the use residual water without treatment to use to farming irrigation, contributes in soils and plants contamination by heavy metals (HM), represent in human health and animal risk. In this sense, the objective was consist in the concentration determination of HM, physical and chemical characteristic in soil and residual water, so HM concentration in corn and alfalfa farming in one, two and tree modulates Watering District 030 Valsequillo. Eight sampling places and a witness were selected (well water) for water analysis, which are located on the main channel and secondary channels, and five places were selected for soil and plant analysis. The HM analysis (Pb, Ni, Cu, Zn y Fe) in residual water, soil and plant, was made by atomic absorption spectrophotometry, also pH, C. E., Cl^- , PO_4 , SO_4^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , texture and organic matter. The investigation allowed identifying presence of HM (Pb, Ni, Cu, Zn y Fe) in water, soil and in corn and alfalfa farming and are according to the maximum limits established in standard, to exception Pb who surpasses the limits in norm by corn and alfalfa farming, and if they waste away products contaminated by this metal it can cause adverse effects in the human health.

Key words: pollution, heavy metals, water, soil, plant.

DEDICATORIA

Dedico ésta tesis a mi hijo:

Emilio Méndez Larenas

La persona que le ha dado luz a mi vida, quien es mi inspiración y la fuerza para seguir adelante, quien llena de alegría mis días, y quien simplemente llena de amor de mi vida.

Te quiero no por lo que eres, sino por lo que soy cuando estoy contigo.
Te quiero no por lo que has hecho de ti, sino por lo que estás haciendo conmigo.
Te quiero por lo que has hecho sin un toque, sin una palabra, sin una seña, lo has hecho, primero por ser tu y, después de todo, quizá porque me amas.

AGRADECIMIENTOS

A los millones de mexicanos (as) que pagan impuestos, quienes, a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Colegio de Postgraduados, han financiado parte de mi información.

Agradezco al Colegio de Postgraduados por darme la oportunidad de realizar mis estudios de grado en sus instalaciones, así como la experiencia compartida con los doctores del colegio.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (CONCYTEP) por el apoyo económico brindado, gracias a la Beca-Tesis CONCYTEP 2010 otorgada para concluir el presente trabajo de investigación.

A los miembros de mi Consejo Particular, quienes me han apoyado para desarrollar el presente trabajo de investigación, y que gracias a su paciencia, tiempo y dedicación he logrado una de la metas de mi vida, que es el desarrollo profesional y personal.

A mi mamá, la Sra. Socorro Bazán Esquivel quien ha sido un gran apoyo durante toda mi vida, y al Sr. Héctor Nava Vélez quien ha sabido ser más que un padre para mí, quien a parte de todo, es mi mejor amigo.

A la persona que ha sido mi apoyo desde hace cinco años, de quien he aprendido y con quien he compartido los momentos más importantes de mi vida, quien siempre estará en mi mente y en mi corazón, Oscar Méndez Zepeda.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN GENERAL | 1 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 4 |
| 2. OBJETIVOS | 6 |
| 2.1 Objetivo general..... | 6 |
| 2.2 Objetivos específicos | 6 |
| 3. HIPÓTESIS | 6 |
| 3.1 Hipótesis general | 6 |
| 3.2 Hipótesis específicas | 7 |
| 4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| 4.1 Definición de conceptos..... | 9 |
| 4.2 Aguas residuales | 9 |
| 4.3 Suelo..... | 23 |
| 4.4 Metales pesados en planta | 30 |
| 5. MATERIALES Y MÉTODOS GENERALES | 35 |
| 5.1 Ámbito de la zona de estudio..... | 35 |
| 5.2 Fuentes de obtención de información | 39 |
| 5.3 Métodos para el análisis de agua residual..... | 39 |
| 5.4 Métodos para el análisis de suelo..... | 40 |
| 5.5 Metodología empleada para el análisis de metales pesados totales en planta..... | 40 |
| 5.6 Análisis estadístico | 40 |
| CAPÍTULO I. DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DE METALES PESADOS EN AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA PRESA MANUEL AVILA CAMACHO | 41 |
| ABSTRACT | 42 |
| INTRODUCCIÓN..... | 43 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 45 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 51 |
| CONCLUSIONES | 65 |

| | |
|---|------------|
| LITERATURA CITADA | 67 |
| CAPÍTULO II. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SUELO Y CULTIVOS REGADOS CON AGUA DE LA PRESA | |
| MANUEL ÁVILA CAMACHO | 70 |
| ABSTRACT | 71 |
| INTRODUCCIÓN..... | 72 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 75 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 82 |
| CONCLUSIONES | 114 |
| LITERATURA CITADA | 117 |
| DISCUSIÓN GENERAL..... | 122 |
| CONCLUSIONES GENERALES | 127 |
| ESTRATEGIA PROPUESTA..... | 130 |
| LITERATURA GENERAL CITADA | 136 |

ÍNDICE DE CUADROS

| Cuadro | Página |
|---|---------------|
| 1 Contaminantes presentes en aguas residuales..... | 12 |
| 2 Características Limnológicas de la presa Manuel Ávila Camacho | 14 |
| 3 Contaminantes comunes de tipo físico, químico y biológico | 16 |
| 4 Concentraciones naturales y seguras en suelos y vegetales de elementos tóxicos | 26 |
| 5 Metales pesados esenciales y/o tóxicos para vegetales y/o animales | 32 |
| 6 Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de agua residual | 47 |
| 7 Periodicidad de muestreo de agua residual | 48 |
| 8 Características físicas y químicas del agua residual que circula sobre el canal principal comparado con el testigo | 51 |
| 9 Clasificación del agua de riego..... | 51 |
| 10 Características físicas y químicas del agua residual que circula sobre los canales secundarios comparado con el testigo..... | 53 |
| 11 Concentración de metales pesados totales en agua residual que circula sobre el canal principal comparado con el testigo..... | 57 |
| 12 Límites máximos permisibles de metales pesados en aguas residuales | 57 |
| 13 Concentración de metales pesados totales en agua residual que circula sobre los canales secundarios comparado con el testigo | 60 |
| 14 Análisis de correlación de Pearson entre la Cortina y los sitios ubicados sobre canales secundarios..... | 64 |
| 15 Fechas de muestreo de suelo | 76 |
| 16 Fechas de muestreo de planta | 80 |
| 17 Textura de los suelos estudiados | 82 |
| 18 Propiedades químicas de los sistemas de producción estudiados..... | 83 |

| | |
|---|-----|
| 19 Límites máximos permisibles de propiedades químicas en suelo | 83 |
| 20 Concentración promedio de metales contaminantes disponibles en el suelo a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm) y su comparación con la Norma Oficial Mexicana y Kabata-Pendias (2004) | 88 |
| 21 Concentración promedio de micronutrientes disponibles en el suelo a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm) y su comparación con la Norma Oficial Mexicana y Kabata-Pendias (2004) | 91 |
| 22 Concentración de metales pesados (mg kg^{-1}) en plantas de maíz..... | 95 |
| 23 Concentración de metales pesados (mg kg^{-1}) en plantas de alfalfa | 95 |
| 24 Concentración de metales pesados (mg kg^{-1}) en plantas según Kabata-Pendias (2004) y Mortuedt (1983)..... | 96 |
| 25 Análisis de correlación de Pearson de materia orgánica y metales pesados disponibles en suelo..... | 105 |
| 26 Análisis de correlación de Pearson entre metales pesados disponibles en el suelo a 0-30 cm y 30-60 cm de profundidad y cada sitio de muestreo..... | 106 |
| 27 Análisis de correlación de Pearson entre micronutrientes disponibles en el suelo a 0-30 cm y 30-60 cm de profundidad y cada sitio de muestreo..... | 108 |
| 28 Análisis de correlación de Pearson entre los metales pesados disponibles en suelo y los metales pesados totales en cultivos de maíz | 109 |
| 29 Análisis de correlación de Pearson entre los metales pesados disponibles en suelo y los metales pesados totales en cultivo de alfalfa | 112 |
| 30 Matriz de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas | 134 |
| 31 Planteamiento de la estrategia | 135 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Página |
|---|---------------|
| 1 Ubicación geográfica de la zona de estudio | 36 |
| 2 Ubicación geográfica de los sitios de muestreo | 45 |
| 3 Sitios de muestreo de agua en la región de Tecamachalco | 46 |
| 4 Resultados obtenidos de pH y C.E. de cada uno de los sitios | 55 |
| 5 Concentración de metales pesados en agua residual que circula sobre el canal principal | 59 |
| 6 Concentración de metales pesados en agua residual que circula sobre los canales secundarios | 63 |
| 7 Ubicación de la zona de estudio de suelo y planta | 76 |
| 8 Sistemas de producción donde se muestreo suelo y planta | 77 |
| 9 pH en los sistemas de producción | 84 |
| 10 Conductividad eléctrica en los sistemas de producción | 85 |
| 11 Materia orgánica en los sistemas de producción | 86 |
| 12 Concentración de metales pesados disponibles en el suelo a 0-30 cm de profundidad | 93 |
| 13 Concentración de metales pesados disponibles en el suelo a 30-60 cm de profundidad | 94 |
| 14 Concentración de plomo (Pb) en materia seca (maíz) | 97 |
| 15 Concentración de plomo (Pb) en materia seca (alfalfa) | 98 |
| 16 Concentración de níquel (Ni) en materia seca (maíz) | 99 |
| 17 Concentración de níquel (Ni) en materia seca (alfalfa) | 100 |
| 18 Concentración de cobre (Cu) en materia seca (maíz) | 101 |
| 19 Concentración de cobre (Cu) en materia seca (alfalfa) | 101 |
| 20 Concentración de zinc (Zn) en materia seca (maíz) | 102 |
| 21 Concentración de zinc (Zn) en materia seca (alfalfa) | 103 |
| 22 Concentración de hierro (Fe) en materia seca (maíz) | 104 |
| 23 Concentración de hierro (Fe) en materia seca (alfalfa) | 104 |

INTRODUCCIÓN GENERAL

En México, uno de los principales problemas en la agricultura es la contaminación del suelo, debido al empleo indiscriminado de agroquímicos, así como el uso de aguas residuales no tratadas, las cuales incrementan el contenido de metales pesados en el suelo, que al no ser degradados química ni biológicamente persisten en el medio acumulándose en el sistema agua-suelo-planta (Boluda y Boluda, 1995; Clemente *et al.*, 2005).

Los metales pesados son un conjunto de elementos que presentan como característica común su elevada densidad. Algunos metales son esenciales para las plantas, animales y seres humanos, sin embargo la presencia de otros metales pesados no esenciales, pueden llegar a limitar el crecimiento vegetal y/o ser tóxicos para las plantas, animales y seres humanos. Las plantas han desarrollado mecanismos altamente específicos para absorber, traslocar y acumular nutrientes, pero algunos metales no esenciales para los vegetales son absorbidos, traslocados y acumulados en la planta debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos requeridos (Lasat, 2000).

Desde el punto de vista de los seres vivos, hay metales pesados que son nutrientes esenciales (Fe, Mn, Zn, Cu y Mo), elementos benéficos en ciertas circunstancias (Ni, Cr, V, Ti, etc) y elementos que, por ahora, no se consideran que tengan funciones en los seres vivos (Cd, Hg, Pb, etc) (Oliver, 1997).

Las principales vías de entrada de los metales a las plantas son el aire, el agua y el suelo, siendo las plantas un punto de conexión importante entre la parte abiótica y biótica del ecosistema en la transferencia de metales (Nriagu, 1990). Los principales peligros ambientales de la transferencia de metales pesados desde el suelo a las plantas son la entrada de los metales en la cadena trófica, la pérdida de cobertura vegetal o cosecha por su fitotoxicidad y la absorción de metales desde el suelo por plantas tolerantes, que pueden producir efectos tóxicos en la

flora y la fauna. Por lo tanto, además del suelo las plantas son un elemento importante en los procesos de contaminación (Kabata- Pendias, 2004).

La ingestión de alimentos y bebidas es una fuente importante en la entrada y asimilación de metales tóxicos y esenciales, en los seres humanos. El contenido excesivo de metales pesados en el cuerpo humano puede desvirtuar algunas funciones inmunológicas, presentando problemas gastrointestinales, hemorragias, vómito y dolores de cabeza (Gupta y Gupta, 1998). También pueden causar intoxicación masiva, esterilidad, abortos e hipertensión (Oliver, 1997).

La diferencia de absorción de metales puede ser atribuida a la capacidad de retención del metal por el suelo y a la interacción planta – raíz – metal (Martínez *et al.*, 1998; Walter y Lin, 2008). El comportamiento de la planta frente a los metales pesados depende de cada metal (Méndez *et al.*, 1998).

Po lo anterior, la calidad del agua de riego agrícola es determinante de la calidad de los productos que se obtengan de esta actividad. La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso de su entrada en la cadena alimentaria, la pérdida de cobertura vegetal o cosecha por su fitotoxicidad, así como la absorción y posterior acumulación dependen del movimiento de los metales desde la solución del suelo a la raíz de la planta (Lacour *et al.*, 2001; Rattan *et al.*, 2005). Después de la absorción por los vegetales, los metales están disponibles para los herbívoros y humanos directamente o a través de la cadena alimentaria (Alloway, 1995). La aplicación de aguas residuales en zonas agrícolas por periodos largos de tiempo puede llegar a ser considerada de alto grado de incidencia en la contaminación del suelo y planta.

La NOM-001-SEMARNAT-1996, establece que los metales pesados en concentraciones por encima de determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, flora o fauna.

En la capital del Estado de Puebla, que se encuentra ubicado en la región central de México, se construyó la presa Manuel Ávila Camacho durante los años 1941-1946, para captar aguas de los Ríos Atoyac y Alseseca, así como aguas pluviales, de uso doméstico e industriales, con la finalidad de utilizar esta agua para riego en el Distrito de Riego 030 Valsequillo.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, en la región de Tecamachalco, que se localiza al sureste del Estado de Puebla, a 56.7 Km de la capital de la entidad. En esta región se ha utilizado el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho durante años para la irrigación de hortalizas, forrajes, cultivos básicos y frutales, ya que esta zona se caracteriza por ser semiárida, y la escasez de agua se hace presente con el tiempo. Por lo anterior, los agricultores de la zona se han visto en la necesidad de utilizar esta agua para asegurar el riego de los cultivos anuales.

Los cultivos de mayor relevancia en la zona de estudio son maíz y alfalfa, y de acuerdo con lo establecido por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), durante el 2008 la superficie sembrada fue de 9,492 ha tanto de riego como de temporal y para el caso de alfalfa se sembraron 2,538 ha.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo de investigación fue determinar la concentración de metales pesados en agua, suelo y cultivos de maíz y alfalfa ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo los cuales son regados con agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En México se generan cerca de 12.9 km³/año de aguas residuales, debido a las actividades urbanas e industriales, dichas aguas son vertidas en la mayoría de los casos a los cuerpos receptores, y aproximadamente el 36.1% reciben tratamiento previo a su descarga (Atlas del agua en México, 2009). La norma que actualmente regula las descargas de aguas residuales es la NOM-001-ECOL-1996, únicamente toma en cuenta parámetros convencionales, algunos metales y cianuros, por lo que en la mayoría de los casos, tanto las industrias como los municipios cumplen con lo establecido, sin embargo cuando se analizan desde el punto de vista toxicológico, éstas detectan niveles de toxicidad (CONAGUA, 2000a).

Por lo anterior, de acuerdo con varios estudios realizados al agua almacenada en cuerpos receptores, se han detectado altos contenidos de sales, elevadas concentraciones de carbonatos de sodio, así como la presencia de elementos tóxicos, por lo cual esta agua no es recomendable para la irrigación de cultivos agrícolas comunes (Ortíz y Amado, 2001).

En el Estado de Puebla los desechos industriales (textil, químico, automotriz, etc.) y urbanos se descargan a los ríos Atoyac y Alseseca, hasta llegar a la presa Manuel Ávila Camacho (INEGI, 2008). Una parte del agua del Río Atoyac, después de ser almacenada temporalmente en la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo), durante los meses de octubre a febrero, se utiliza en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo para la irrigación de hortalizas, forrajes, cultivos básicos y frutales, y otra parte del agua del Río Atoyac sigue su curso hacia el Pacífico (INEGI, 2008).

Sandoval *et al.*, (2009) mencionan que la concentración de metales pesados del río Atoyac que desemboca en la presa Manuel Ávila Camacho rebasa los límites máximos permisibles de la legislación vigente, por lo que ésta agua no es recomendable para uso agrícola.

Es necesario entonces, determinar la concentración de metales pesados totales (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe y Zn) en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, la cual circula sobre el canal principal que abastece de agua a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, agua que se utiliza para la irrigación de cultivos de maíz y alfalfa, así como la concentración de dichos metales disponibles en el suelo y planta.

Por lo anterior es importante responderse las siguientes preguntas:

¿El agua residual que circula sobre el canal principal que abastece al módulo uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, conforme aumenta su recorrido, disminuye la concentración de metales pesados presentes en el agua?

¿El agua residual que se emplea para riego en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, ubicada en la región de Tecamachalco, contiene metales pesados?

¿Los suelos agrícolas ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, que son regados con agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, han acumulado en el tiempo metales pesados?

¿La presencia de metales pesados en el suelo, propiciará que la planta absorba y acumule metales pesados dañinos para la salud humana y animal?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar la concentración de metales pesados en agua, suelo y cultivos de maíz y alfalfa regados con agua proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar la concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe y Zn) en agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho utilizada para el riego de cultivos agrícolas en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.
2. Determinar si la concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe y Zn) presentes en el agua residual que circula sobre el canal principal que abastece al módulo uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, disminuye conforme aumenta su recorrido.
3. Determinar la concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe y Zn) en suelo y cultivos de maíz y alfalfa ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, regados con agua de la presa Manuel Ávila Camacho.

3. HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis general

El agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho utilizada para riego de cultivos de maíz y alfalfa en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, contienen elevadas concentraciones de metales pesados, ocasionando la contaminación del suelo y planta.

3.2 Hipótesis específicas

1. El agua residual de la presa Manuel Ávila Camacho utilizada para riego de cultivos agrícolas contiene metales pesados que rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996.
2. La concentración de metales pesados presentes en el agua residual disminuye conforme aumenta su recorrido sobre el canal principal que abastece a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.
3. La concentración de metales pesados en el suelo y cultivos de maíz y alfalfa rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-021-RECNAT-2000, ocasionando la contaminación de suelos y toxicidad en planta.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La escasez cada vez mayor del agua debido al crecimiento demográfico, a la urbanización y a los cambios climáticos, ha dado lugar al uso creciente de aguas residuales para la agricultura. Si bien el uso de aguas residuales en la agricultura puede aportar beneficios, su uso no controlado generalmente está relacionado con impactos significativos sobre la salud humana (Tamaríz, 1996).

La calidad de los productos obtenidos a través de la actividad agrícola está determinada en gran medida, por la calidad del agua, empleada en el riego de los cultivos. La práctica de regar cultivos agrícolas con aguas residuales urbanas se ha generalizado durante el presente siglo, y en modo particular en los últimos dos decenios, especialmente en las zonas áridas y semiáridas, tanto de los países en desarrollo como de los desarrollados (CNA, 2001).

El efecto del riego de cultivos agrícolas con aguas residuales sin tratamiento previo, puede ocasionar contaminación de suelos, pero principalmente es una amenaza potencial para la salud de humanos y animales (Ortíz y Amado, 2001).

El aspecto de los metales pesados se ha convertido en un tema actual desde el punto de vista ambiental, así como de salud pública, debido a que los daños que causan son severos, aunque en la mayoría de las ocasiones ausentes de síntomas. Pese a esto, las autoridades ambientales y de salud, en los últimos años han puesto su atención en minimizar la exposición de la población a estos metales tóxicos, en particular de la población infantil (Pérez *et al*, 2008).

La venta de productos agrícolas contaminados en centros urbanos representa un potencial riesgo a la salud, debido a que de esta manera se encuentran al alcance de los pobladores. Kunwar *et al* (2004) menciona que los metales pesados contenidos en alimentos de consumo humano pueden causar severos daños a la salud, como fatiga, insomnio, irritabilidad estomacal, vómito entre otros.

4.1 Definición de conceptos

- Ambiente. El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados (LGEEPA, 2006).
- Aguas residuales. Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (NOM-001-SEMARNAT-1996).
- Cuerpo receptor. Son las corrientes, depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se filtran o inyectan dichas aguas cuando puedan contaminar el suelo o los acuíferos (NOM-001-SEMARNAT-1996).
- Contaminación. La presencia en el ambiente de toda sustancia que en cualquiera de sus estados físicos y químicos al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural altere o modifique su composición y condición natural, causando desequilibrio ecológico (LGEEPA, 2006).
- Contaminante. Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural altere o modifique su composición y condición natural (LGEEPA, 2006).

4.2 Aguas residuales

Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias (LGEEPA, 2006).

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, las aguas residuales son aquellas aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

La demanda de agua está aumentando continuamente en países en vías de desarrollo y países semiáridos, por consiguiente el agua de más alta calidad se destina para uso doméstico y la de más baja calidad para la irrigación (Kiziloglu *et al.*, 2008). El agua residual tratada puede usarse para la irrigación de cultivos agrícolas, ya que es una solución ante la falta de disponibilidad de agua para dichas actividades. El agua residual contiene significantes cantidades de metales pesados y otras sustancias que pueden ser tóxicos a las personas, pero también contiene nutrientes que pueden ser beneficiosos para cultivos agrícolas (Al-Lahham *et al.*, 2007).

El uso de agua residual para propósitos de irrigación, también pueden ser ricos en nutrientes, lo cual ayuda al crecimiento de las plantas. El uso de agua residual favorece el desarrollo de los cultivos debido a que proporciona N y P así como materia orgánica, pero hay una preocupación sobre la acumulación potencial de elementos tóxicos como Cd, Cu, Fe, Pb y Zn de las fuentes domésticas e industriales (Bhattacharyya *et al.*, 2008; Miller *et al.*, 2003).

Cuando el agua residual se usa continuamente con fines de irrigación, los nutrientes se acumulan en el suelo lo cual puede causar efectos desfavorables ante la producción y calidad de las cosechas, también algunos nutrientes suelen lixiviarse a través de los perfiles del suelo. Por lo anterior, es importante considerar la cantidad de agua aplicada en cultivos agrícolas a manera de no afectar la fertilidad del suelo (Kiziloglu *et al.*, 2008).

Las aguas residuales pueden clasificarse en:

- Aguas polutas: Son aguas contaminadas con sustancias peligrosas resultantes de actividades agrícolas o industriales. Tales sustancias incluyen metales pesados (Pb, Hg, Cu, Cd, Cr, As), residuos de plaguicidas como insecticidas, fungicidas, herbicidas y otros compuestos. Al entrar en los cuerpos de agua estas sustancias tóxicas en elevadas concentraciones, constituyen un riesgo significativo a la salud humana y de los animales. Dependiendo de su origen, las aguas pueden clasificarse en domésticas, agrícolas e industriales (Yépez *et al.*, 2003).
- Aguas residuales domésticas: Estas son las aguas derivadas de las actividades humanas domésticas, tales como el agua del sanitario también conocida como aguas negras; y vertidos de la cocina, así como el agua usada para lavar también conocida como aguas grises (Yépez *et al.*, 2003).
- Aguas residuales agrícolas: Estas son las aguas derivadas de actividades agrícolas, principalmente de la aplicación de fertilizantes y de la secreción y desintegración de plantas y animales, excluyendo aquellas que contienen residuos de plaguicidas dañinos (Yépez *et al.*, 2003).
- Aguas residuales industriales: Estas son aguas derivadas de actividades industriales o manufactureras, principalmente de origen orgánico, excluyendo aquellas que contienen sustancias dañinas de origen inorgánico (Yépez *et al.*, 2003).

Las aguas residuales domésticas están constituidas en un elevado porcentaje (en peso) por agua, cerca de 99.9 % y apenas 0.1 % de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos.

Esta pequeña fracción de sólidos es la que presenta los mayores problemas en el tratamiento y su disposición. El agua es apenas el medio de transporte de los sólidos (Lucho-Constantino *et al.*, 2004).

El agua residual está compuesta de componentes físicos, químicos y biológicos. Es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos en el agua (Clemente *et al.*, 2005). La mayor parte de la materia orgánica consiste en residuos alimenticios, heces, material vegetal, sales minerales, materiales orgánicos y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos (ver Cuadro 1).

La materia inorgánica presente en las aguas residuales está formada principalmente de arena y sustancias minerales disueltas (Rattan *et al.*, 2005).

Cuadro 1. Contaminantes presentes en aguas residuales

| Contaminantes | Parámetro de caracterización | Tipo de efluentes | Consecuencias |
|----------------------------|--|--|---|
| Sólidos suspendidos | Sólidos suspendidos totales | <ul style="list-style-type: none"> • Domésticos • Industriales | <ul style="list-style-type: none"> • Problema estéticos • Depósitos de barros • Adsorción de contaminantes • Crecimiento de algas • Toxicidad para los peces |
| Nutrientes | Nitrógeno Fósforo | <ul style="list-style-type: none"> • Domésticos • Industriales | <ul style="list-style-type: none"> • Enfermedades en niños (nitratos). • Contaminación de agua subterránea • Toxicidad |
| Metales pesados | Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) | <ul style="list-style-type: none"> • Industriales | <ul style="list-style-type: none"> • Inhibición al tratamiento biológico de las aguas residuales • Contaminación de agua subterránea |

Fuente. (Lasat, 2000; Lacour *et al.*, 2001)

4.2.1 Disponibilidad de agua en la región Tecamachalco

En el estado de Puebla existen 11 zonas principales de explotación de agua subterránea, según el número de provechamientos y las cantidades de agua extraídas. Estas áreas se encuentran incluidas a su vez, dentro de las cinco

grandes zonas geohidrológicas establecidas por la CONAGUA (2000) para el estado de Puebla: Valle de Puebla, Cuenca Oriental, Zona de Atlixco-Izucar de Matamoros, Zona de Tecamachalco, Tehuacán.

La Comisión Nacional del Agua es la dependencia encargada de controlar y reglamentar la extracción del agua subterránea, mediante el decreto de zonas de veda.

Las zonas de veda son áreas en las cuales la extracción del agua subterránea y la perforación de pozos, se encuentra bajo control, que incluye la restricción e incluso prohibición de dichas actividades (INEGI, 2008).

Todas las zonas de explotación descritas, se encuentran vedadas desde el año de 1950, debido a la exclusiva extracción en la población central del estado, dichas áreas fueron ampliadas por el decreto de 1967 en el cual se declara zona de veda para el alumbramiento de aguas en el subsuelo, en la zona meridional del estado de Puebla. En esta zona quedan incluidos la mayoría de los municipios localizados en el Valle de Puebla, zona de Atlixco-Izucar de Matamoros y zona de Tecamachalco (INEGI, 2008).

La región de Tecamachalco se caracteriza por ser una zona de árida a semiárida, donde la escasez de agua es uno de los problemas predominantes del lugar.

Uno de los primeros informes geohidrológicos conocidos de la zona de Tecamachalco data del año de 1920, proyectando como respuesta ante las acentuadas sequías que se presentaban en la región, con el objeto de captar aguas subterráneas para la irrigación.

Antes de 1960, la existencia de pozos era escasa, por lo que la sobreexplotación de los acuíferos prácticamente no se presentaba (CONAGUA, 2000).

Las condiciones que prevalecen en la zona de estudio, manifiestan un déficit en la precipitación pluvial durante la mayor parte del año, de manera que el desarrollo de la agricultura requiere de agua para el riego de los cultivos, siendo las únicas fuentes de abastecimiento para este propósito, el almacenamiento de agua superficial en la presa Manuel Ávila Camacho y el agua subterránea regional.

El acuífero del valle de Tecamachalco se localiza en la porción central del estado de Puebla, su extensión superficial es de 3,600 kilómetros cuadrados (km²). Colinda con: la sierra de Soltepec al noreste; por el volcán de La Malinche al norte; por la sierra de Zapotitlan al sur y suroeste y por la sierra del Tenzo al oeste (CONAGUA, 2000).

La presa Manuel Ávila Camacho fue construida para aprovechar los escurrimientos de los ríos Atoyac y Alseseca para propósitos de riego de 35, 000 ha del Distrito de Riego 030 Valsequillo. En el Cuadro 2 se muestran las características limnológicas de la presa Manuel Ávila Camacho.

Cuadro 2. Características Limnológicas de la presa Manuel Ávila Camacho.

| CARATERÍSTICA | INDICADOR | | Febrero 2009 |
|--|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Área total | 3134 ha | | 2780 ha |
| Área promedio | 1960.7 ha | | - |
| Volúmen total | 405 Mm ³ | | 330.6 Mm ³ |
| Volúmen promedio | 182.4 Mm ³ | | 291.05Mm ³ |
| Profundidad media | 9.3 m | | - |
| | Uso | Contaminación | - |
| Índice de calidad del agua (IMTA, 2000) | Agrícola | Leve | - |
| | Pesca | Fuerte a Leve | - |
| | Industria | Leve | - |
| Clasificación trófica (IMTA, 2000) | Eutrófica | | - |

Fuente. Comisión Nacional del Agua, 2000 y 2010.

De acuerdo con la información obtenida en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010), el área total del vaso de la presa Manuel Ávila Camacho en el año 2010, a la elevación 2060 msnm es de 2780 ha, y la capacidad de almacenamiento a la misma cota, de 330.583 Mm³ y el volumen promedio almacenado y registrado en febrero del año 2009 fue de 291.052 Mm³.

La contaminación de los ríos Atoyac y Alseseca, tiene su origen en las descargas de aguas residuales urbanas e industriales que sin tratamiento previo, se vierten a la presa de Valsequillo, además de que las barrancas y los cauces de arroyos y ríos están siendo utilizados como tiraderos de basura y escombros (Castillo *et al.*, 2007).

Las aguas residuales de cualquier procedencia deben recibir tratamiento previo antes de ser vertidas a ríos o de volver a ser utilizadas, debido a que deben cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en normas. Por lo anterior, es importante realizar una serie de análisis químicos a estas aguas para que así puedan ser reutilizadas.

Metales pesados

El término metal pesado suele referirse a metales cuyo peso específico es superior a 5 g.cm⁻³ y que tiene un número atómico por encima de 20.

La EPA (Environmental Protection Agency, 2004) define como metales pesados a todos los elementos metálicos con alto peso atómico (mercurio, arsénico, cromo, cadmio, plomo), puede dañar los seres vivos en concentraciones bajas y tienden a acumularse en la cadena alimentaria. No obstante, no todos los elementos que tienen esas características tienen análogas funciones biológicas. Debido a las pequeñas cantidades que se manejan se denominan, a veces, elementos traza o metales traza (Urbano y Rojo, 1992).

Desde el punto de vista de los seres vivos, hay metales pesados que son nutrientes esenciales (Fe, Mn, Zn, Cu y Mo), elementos beneficiosos en ciertas circunstancias (Ni, Cr, V, Ti, etc) y elementos que, por ahora, no se consideran que tengan funciones en los seres vivos (Cd, Hg, Pb, etc).

En ecosistemas agrícolas, la mayoría de los metales pesados están incluidos en un ciclo biogeoquímico en el cual los dos componentes fundamentales son el suelo y la planta. Por una parte, dichos elementos llegan al suelo por vía aérea (aerosoles, partículas minerales, polvos suspendidos y transportados por el aire) y terrestre (fertilizantes, plaguicidas, residuos sólidos, etc) y, por otra, se pierden bien absorbidos por las plantas, o por lixiviación y erosión. En el Cuadro 3 se muestran los contaminantes más comunes de tipo físico, químico y biológico.

Cuadro 3. Contaminantes comunes de tipo físico, químico y biológico.

| Tipo | Ejemplo |
|-------------|----------------------|
| Físico | Sólidos flotantes |
| | Material suspendido |
| | Material asentable |
| | Espuma |
| | Líquidos insolubles |
| | Calor |
| Químico | Compuestos orgánicos |
| | Iones inorgánicos |
| | Material radiactivo |
| Biológico | Bacterias patógenas |
| | Virus |
| | Algas |
| | Maleza acuática |

Fuente. Woodwell, 1967.

La importancia de las distintas vías de transferencia de estos elementos varia considerablemente, depende del tipo de elemento, especie vegetal, tipo de suelo, prácticas agrícolas, etc. Con frecuencia se producen alteraciones en los aportes o pérdidas de dichos elementos, que modifican su ciclo y dan lugar a que se encuentren en proporciones tóxicas o deficientes (Cervantes y Moreno, 1999).

4.2.2 Efecto del riego con aguas residuales

El uso del agua residual para la irrigación de cultivos agrícolas se generaliza debido a la escasez de agua. La reutilización del agua residual se basa esencialmente en aprovecharla como agua de riego y como agua de recarga con objeto de incrementar los recursos hídricos.

Los cultivos regados con aguas residuales se benefician o perjudican directa o indirectamente debido a su composición química.

El agua residual utilizada para riego de cultivos agrícolas agrega al suelo por su composición química-biológica, compuestos orgánicos e inorgánicos que estimulan la actividad heterotrofica de la población microbiana del suelo, (Nakshabandi, *et al.*, 1997) porque la enriquecen con: Zn, Al, N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, B, Cu, Mb, Sr, Ba y Na y materia orgánica (Mahmood *et al.*, 2002; Al-Jamal *et al.*, 2002), e incluso metales pesados los cuales pueden traslocarse en la cadena alimenticia y ser tóxicos a la vida.

Metales como el Ni, que puede llegar a ser menos adsorbido en suelos, puede ser fácilmente absorbido por las plantas y ser ligeramente tóxico para las mismas, siendo un elemento móvil en los tejidos de las plantas, se acumulan preferiblemente en las hojas y en las semillas (Corinne *et al.*, 2006).

Algunos cultivos como el de maíz, cuando crece en un suelo típicamente arcilloso, tienen una capacidad asimilativa más alta que para el límite de absorción de Cd, Ni, Pb y de Cu que en otros suelos y que marcan la diferencia también con otros cultivos. Algunas de las características que influyen la biodisponibilidad del Ni a las plantas, incluyen el pH, y el contenido de la materia orgánica, de arcilla y de óxidohidróxidos (Mahdy, *et al.*, 2007).

Prieto *et al.*, (2009) señalan que la biodisponibilidad de algunos metales presentes en el suelo, para las plantas, tienen mayores niveles de absorción.

Por ejemplo la absorción del Mn disponible en suelos por parte de las plantas es mayor que para el Zn, seguidos en orden por el Cd, el Cu y por último y menos biodisponible, para pasar la barrera suelo-raíz- planta, el Pb.

Malla et al., (2007) han reportado que la contaminación por metales provenientes del uso de aguas residuales, en el caso de los cultivos agrícolas, se encuentra por debajo del límite máximo permitido; sin embargo, si se utilizan aguas residuales por largos periodos, pueden llegar a tener un aumento en la contaminación metálica más allá del límite máximo permitido.

4.2.3 Efectos en la salud por metales pesados

Los metales pesados son un conjunto de elementos que presentan como característica común su elevada densidad. Así la esencialidad de algunos metales pesados para las plantas, animales y seres humanos, sin embargo la presencia de otros metales pesados no esenciales, pueden llegar a limitar el crecimiento vegetal y/o ser tóxicos para las plantas, animales y seres humanos, además elevadas concentraciones de elementos esenciales pueden causar efectos negativos sobre los seres vivos. Desde el punto de vista de los seres vivos, hay metales pesados que son nutrientes esenciales (Fe, Mn, Zn, Cu y Mo), elementos beneficiosos en ciertas circunstancias (Ni, Cr, V, Ti, etc) y elementos que, por ahora, no se consideran que tengan funciones en los seres vivos (Cd, Hg, Pb, etc) (Oliver, 1997).

La ingestión de alimentos y bebidas es una fuente importante en la entrada y asimilación de metales tóxicos y esenciales, en los seres humanos. El contenido excesivo de metales pesados en el cuerpo humano también puede ser debido a la absorción excesiva, a una reducción en la pérdida desde el cuerpo y/o a la disminución en la metabolización de los mismos por antagonismos o bloqueos metabólicos (Gupta y Gupta, 1998).

La EPA (Environmental Protection Agency, 2004) establece que los metales pesados que más afectan al medio ambiente y a la salud del hombre son: plomo, cadmio, níquel, cobre, hierro y zinc.

En el ser humano, el plomo (Pb) puede tener una amplia variedad de efectos biológicos según el nivel y la duración de la exposición. Se han observado efectos en el plano celular y efectos en el funcionamiento general del organismo que van desde la inhibición de las enzimas hasta la producción de acusados cambios morfológicos y la muerte (Lee and Moon, 2003). Dichos cambios se producen a dosis muy diferentes; en general, el ser humano que se está desarrollando es más sensible que el adulto. Los efectos del plomo en la función reproductora masculina se limitan a la morfología y el número de los espermatozoides. En cuanto a la femenina, se han atribuido al plomo algunos efectos adversos en el embarazo. El plomo no parece tener efectos nocivos en la piel, en los músculos ni en el sistema inmunitario (Prieto *et al.*, 2009).

El cadmio está presente en forma mineral en la corteza terrestre a una concentración promedio de 0.18 ppm. La presencia de cadmio en el aire es debido a las actividades industriales. Entre las emisiones de las actividades industriales están los procesos de combustión que utilizan carbón, aceite, madera, papel y basura orgánica urbana (Cervantes y Moreno, 1999). El cadmio es rápidamente acumulado en el hombre a una tasa de aproximadamente 5 mg por década hasta la edad de 60 años, especialmente en los riñones (Mahler, 2003).

Se considera que el riñón es el órgano más dañado en las poblaciones expuestas a los efectos del cadmio (Cd). Las enfermedades crónicas obstructivas de las vías respiratorias están asociadas a la exposición prolongada e intensa por inhalación. Hay pruebas de que esa exposición al Cd puede contribuir al desarrollo de cáncer del pulmón aunque las observaciones en trabajadores expuestos han sido difíciles de interpretar a causa de la presencia de factores que inducen a confusión.

El Cd presente en los alimentos es la principal fuente de exposición para la mayoría de las personas. En la mayoría de las zonas no contaminadas con Cd la ingesta diaria media con los alimentos se encuentran entre 10-40 µg (Lee and Moon, 2003).

El níquel (Ni) puro es un metal duro, que se combina con otros metales para formar aleaciones. El níquel y sus compuestos no tienen olor ni sabor característicos. Una pequeña cantidad de níquel es probablemente esencial para los seres humanos, aunque la falta de éste no afecta su salud. Gran parte del níquel en el medio ambiente se encuentra en el suelo y los sedimentos debido a que se adhiere a partículas que contienen hierro o manganeso (Prieto *et al.*, 2009). De acuerdo con los datos de la EPA (2007), las principales fuentes de exposición son el humo del tabaco, escape de los automóviles, fertilizantes y residuos industriales.

Al respirar el aire o el consumo de tabaco que contienen níquel, así como comer alimentos que contienen este metal, es principal fuente de exposición para la mayoría de los seres humanos. Algunos de los síntomas por la ingestión de níquel o en su defecto, por el contacto directo con la piel pueden provocar erupción cutánea, cáncer pulmonar, bronquitis crónica, entre otros (Valdés y Cabrera, 1999).

La presencia de metales pesados en cultivos puede ser un factor de riesgo para la salud, como es el caso de cobre (Cu), el cual en elevadas concentraciones puede ser tóxico para los seres humanos, puesto que altera el metabolismo y puede provocar hasta su muerte. El cobre es utilizado en pequeñas cantidades por los organismos, pero en grandes cantidades se convierte en un elemento altamente perjudicial (Paredes *et al.*, 2001).

Dentro de los metales pesados, los denominados oligoelementos, y que pueden servir como micronutrientes para los cultivos, ya que son requeridos en pequeñas

cantidades y son necesarios para que los organismos son el Fe y Zn. El hierro en elevadas concentraciones puede causar efectos negativos en la salud humana, en las mujeres pérdidas menstruales y en los hombres se acumula cuatro veces más rápido que en las mujeres, el riesgo de arteriosclerosis es mayor (García y Dorronsoro, 2005).

El zinc es un elemento químico poco abundante en la naturaleza en estado libre aunque forma parte de muchos minerales, éste es importante en el funcionamiento prostático y en los órganos reproductivos, transportan dióxido de carbono desde los tejidos hasta los pulmones. Por otra parte, el tomar más de 300 mg de zinc al día puede desvirtuar algunas funciones inmunológicas, presentando problemas gastrointestinales y hemorragias (Jarup, 2003).

4.2.4 Contaminación de agua por metales pesados

Los metales pesados pueden incorporarse a un sistema de abastecimiento de agua por medio de residuos industriales que son vertidos sin previos tratamientos, los que posteriormente se depositan en lagos, ríos y distintos sistemas acuíferos (Arnason y Fletcher, 2003; Inglezakis *et al.*, 2002). La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta.

Debido a la acumulación de los metales pesados en la cadena alimenticia y su persistencia en la naturaleza, es necesario eliminar a los metales pesados tóxicos de las aguas residuales (García *et al.*, 2005).

Existe amplia investigación sobre el riesgo de los metales pesados en la salud y el medio ambiente en la literatura.

Varios autores han mostrado el riesgo de contaminación por metales pesados en el agua en la acumulación de metales pesados en los suelos y sedimentos y en el riesgo potencial para la salud humana debido a la acumulación de metales pesados en las plantas (Prieto *et al.*, 2006).

Prieto *et al.*, (2007) mencionan que en el Valle del Mezquital, desde hace más de 100 años se ha empleado para riego directo, aguas residuales, a consecuencia de esto se han acumulado en suelos metales pesados. Algunos autores como Méndez *et al.*, 2000; Méndez *et al.*, 2008; Pérez *et al.*, 2008; han analizado las concentraciones de metales pesados, reportan presencia de Cd, Ni, Pb, en agua, suelo y en plantas.

Se conocen desde hace años las propiedades tóxicas de numerosos compuestos orgánicos, en particular las de algunos de los elementos metálicos más pesados. Algunos de estos compuestos presentan propiedades deseables, por lo que son fabricados de forma rutinaria.

El uso de estos compuestos ha conducido a su introducción en el ambiente de forma directa o indirecta. La detección de estas sustancias metálicas en el agua ha sido en elevadas concentraciones las cuales se aproximan a niveles tóxicos (Navarro y Navarro, 2003). Los compuestos de este tipo que son más tóxicos, persistentes y abundantes en el ambiente parecen ser los de mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr) y níquel (Ni). Se sabe que estos metales se acumulan en el cuerpo de los organismos, permanecen largo tiempo en ellos y se comportan como venenosos acumulativos.

Para disminuir la concentración de este tipo de contaminantes en el agua, se utilizan métodos como la precipitación química, la ósmosis inversa, el intercambio iónico, las membranas de separación y la adsorción (Volesky, 2001; Aksu, 2001). Sin embargo, algunos de estos procesos tienen una eficiencia baja y resultan ser demasiado caros en su operación o mantenimiento.

4.3 Suelo

El término suelo, que deriva del latín *solum*, y significa piso, puede definirse como la capa superior de la Tierra que se distingue de la roca sólida y en donde las plantas crecen. Para el agricultor, el suelo puede ser exclusivamente el lugar donde crecen sus cultivos. Pero el suelo, independientemente de su origen tiene una función; soportar una vegetación, y él se debe dar las condiciones necesarias para el desarrollo de las plantas. Con este enfoque, se define al suelo como la mezcla de partículas sólidas pulverulentas, de agua y de aire que, provista de los elementos nutritivos necesarios para las plantas, puede servir como sustentadora de una vegetación (Navarro y Navarro, 2003).

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénicas. En los suelos se pueden encontrar diferentes metales, formando parte de los minerales propios; como son silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg). También puede encontrarse manganeso (Mn), que generalmente se presenta en el suelo como óxido y/o hidróxido, formando concreciones junto con otros elementos metálicos. Algunos de estos metales son esenciales en la nutrición de las plantas, así son requeridos algunos de ellos como el Mn, imprescindible en el fotosistema y activación de algunas enzimas (Mahler, 2003) para el metabolismo vegetal.

Se consideran entre los metales pesados elementos como el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el cromo (Cr), el mercurio (Hg), el zinc (Zn), el cobre (Cu), la plata (Ag), entre otros, los que constituyen un grupo de gran importancia, ya que algunos de ellos son esenciales para las células, pero en altas concentraciones pueden resultar tóxicos para los seres vivos, organismos del suelo, plantas y animales, incluido el hombre (Spain *et al.*, 2003). En la corteza terrestre existe una similitud entre la distribución de níquel (Ni), cobalto (Co) y hierro (Fe).

En los horizontes superficiales del suelo (capa arable), el Ni aparece ligado a formas orgánicas (Corinne *et al.*, 2006), parte de las cuales pueden encontrarse formando quelatos fácilmente solubles.

Cuando el contenido de metales pesados en el suelo alcanzan niveles que rebasan los límites máximos permitidos, causan efectos inmediatos como inhibición del crecimiento normal y el desarrollo de las plantas, y un disturbio funcional en otros componentes del ambiente así como la disminución de las poblaciones microbianas del suelo, el término que se usa o se emplea es “contaminación de suelos” (Prieto *et al.*, 2009).

4.3.1 Movimiento del agua en el suelo

Cuando el agua cae o se aplica por una lluvia abundante o riego, el agua entra en el suelo, el aire es desplazado y los poros quedan rellenos de agua. El suelo se satura de agua y entonces se dice que ha llegado a su máxima capacidad retentiva, en este caso una parte del agua es atraída por la gravedad y desciende a las zonas más bajas del suelo, más o menos rápidamente según su permeabilidad y la abundancia de las precipitaciones. A lo largo del año, el suelo está sometido continuamente a fases de humidificación (durante las lluvias e irrigaciones) y de secado (por evaporación directa o a causa de la transpiración de las plantas). El agua está así siempre en movimiento bajo el efecto de fuerzas que varían constantemente en intensidad y dirección (Rodier, 1990).

Los movimientos descendentes están relacionados con las fuerzas de la gravedad y se observan:

1. Durante la lluvia o el riego; es la infiltración
2. Después de la lluvia o del riego; es la redistribución

La infiltración se mide y se observa por el frente de humectación, de unos 10 cm de espesor, que señala el límite visible entre la tierra seca y la tierra mojada.

El agua al llegar a un suelo seco, penetra en él rápidamente a principio, después de una manera más regular se va infiltrando. La velocidad de la bajada es tanto más elevada cuanto más fuerte es la intensidad de la lluvia. No obstante, si esta sobrepasa un valor máximo, función de la naturaleza del suelo, el agua no puede infiltrarse a medida que va llegando, se estanca entonces en la superficie y según la inclinación del terreno, empieza a correr (Tisdale y Werner, 1970; Vázquez *et al.*, 2001). La intensidad máxima que el suelo puede absorber varía por término medio de 6 cm/hr (suelos arcillosos) a 30 cm/hr (suelos arenosos).

En la redistribución de la lluvia o del riego, el agua excedente de la capa intermedia emigra en profundidad hacia zonas más secas.

Los movimientos ascendentes se producen constantemente bajo forma de evaporación directa a partir del suelo o indirecta a partir de las raíces y después de las hojas (transpiración). Su intensidad depende de las condiciones climáticas y de los cultivos existentes. Es importante el secado superficial en la época que sigue a la siembra, cuando la planta tiene unos sistemas foliares y radicales poco desarrollados. La evaporación del suelo desnudo puede secar la capa superficial del suelo hasta el punto de bloquear o retardar sensiblemente la absorción del agua por las raíces (Vázquez *et al.*, 2001). Es una fase en que las irrigaciones (a ser posible leves y frecuentes) son especialmente decisivas sea cual sea el período del año en clima mediterráneo.

4.3.2 Elementos tóxicos

Aunque al retener iones los suelos se originan deficiencias de nutrientes, también se evitan concentraciones excesivas o tóxicas en la mayoría de las soluciones de suelo. Todos los iones micronutrientes y la mayoría, si no es que todos los oligoelementos, son tóxicos en concentraciones superiores a las normales para los suelos. Son raras las concentraciones altas de los elementos tóxicos que se presentan en forma natural como es el caso del aluminio (Navarro y Navarro, 2003).

La contaminación del suelo con elementos tóxicos, en general es el resultado de las actividades humanas. Los elementos contaminantes predominantes, de origen antropogénico y sus principales estados de oxidación incluyen los siguientes elementos, ordenados según su número atómico y no en cuanto a su importancia, Be, F, Cr, Ni, Zn, As, Cd, Hg, Pb. La contaminación del suelo provocada por los desechos urbanos e industriales, plaguicidas y el tránsito de vehículos tiene la virtud de aumentar la concentración de los iones antes mencionados (Fergusson, 1990). En el Cuadro 4 se muestran las concentraciones naturales en suelos y vegetales de elementos que resultan ser tóxicos.

Cuadro 4. Concentraciones naturales y seguras en suelos y vegetales de elementos tóxicos.

| Elemento | Valor típico mg kg ⁻¹ | Intervalo mg kg ⁻¹ | Solución de suelo mg kg ⁻¹ | Valores para los vegetales mg kg ⁻¹ |
|-----------------|--|---|---|---|
| Aluminio | 50 000 | 10 000-200 000 | 0.1 – 0.6 | - |
| Arsénico | 5 | 1 – 50 | 0.1 | - |
| Berilio | 1 | 0.2 – 10 | 0.001 | - |
| Cadmio | 0.06 | 0.01 – 7 | 0.001 | 0.1 – 0.8 |
| Cromo | 20 | 5 – 1000 | 0.001 | - |
| Cobalto | 8 | 1 – 40 | 0.01 | 0.05 – 0.5 |
| Cobre | 20 | 2 – 100 | 0.03 – 0.3 | 4 – 15 |
| Plomo | 10 | 2 – 200 | 0.001 | 0.1 – 10 |
| Manganeso | 850 | 100 – 4000 | 0.1 – 10 | 15 – 100 |
| Mercurio | 0.05 | 0.02 – 0.2 | 0.001 | - |
| Níquel | 40 | 10 – 1000 | 0.05 | < 1 |
| Selenio | 0.5 | 0.1 – 2.0 | 0.001 – 0.01 | - |
| Zinc | 50 | 10 - 300 | > 0.005 | 8 - 15 |

Fuente. Thompson y Troeh, 1982.

Para el caso de micronutrientes, Thompson (1982), menciona que la concentración suficiente de zinc para cultivos de alfalfa y maíz es de 21 a 70 mg kg⁻¹, por otra parte Mortuedt *et al.*, (1983) mencionan que la concentración suficiente de zinc para cultivos agrícolas es de 25 a 150 mg kg⁻¹, la concentración

de Cu suficiente para cultivos agrícolas es de 5 a 20 mg kg⁻¹ y para el caso de Fe es de 50 a 250 mg kg⁻¹.

Kabata-Pendias (2004) menciona que la concentración suficiente de metales pesados en plantas es de 5 a 10 mg kg⁻¹ para el caso de Pb, de 0.05 a 0.2 mg kg⁻¹ en el caso del Cd y de 0.1 a 5.0 mg kg⁻¹ para Ni.

4.3.3 Contaminación de suelo por metales pesados

La contaminación de los suelos por metales pesados se ha incrementado considerablemente, como consecuencia del empleo intensivo de agroquímicos y del riego con aguas residuales.

Esta problemática ocurre, generalmente, en las zonas agrícolas cercanas a las grandes urbes, en donde los volúmenes de aguas residuales industriales y municipales, que se generan, son cada vez mayores (Tamariz, 1996; Méndez *et al.*, 1998). La adición y acumulación de estos contaminantes en los suelos agrícolas, a través del riego, se han incrementado con la industrialización de los estados de Puebla y Tlaxcala. Los metales pesados de interés en el presente proyecto de investigación se describen a continuación.

Plomo (Pb). El plomo es un contaminante ambiental altamente tóxico, su presencia en el ambiente se debe principalmente a las actividades antropogénicas como la industria, la minería y la fundición. En los suelos contaminados con Pb se suele encontrar también Cd y Zn (Hettiararchchi y Pierzynski, 2002) por analogía entre sus propiedades y características metálicas algo similar a lo que ocurre para la triada de Fe-Ni-Co. En estos casos la barrera suelo-planta limita la traslocación de Pb a la cadena alimenticia, ya sea por procesos de inmovilización química en el suelo según se ha reportado, o limitando el crecimiento de la planta antes de que el Pb absorbido alcance valores que puedan ser dañinos al ser humano.

El Pb presente en suelos contaminados puede llegar a inhibirse mediante la aplicación de fósforo y óxidos de magnesio; sin embargo estos tratamientos pueden llegar a afectar la biodisponibilidad de otros metales esenciales como el Zn (Hettiarchchi y Pierzynski, 2002).

Cadmio (Cd). Como un constituyente del aerosol, el Cd como otros metales alcanza las plantas y el suelo durante la precipitación y por deposición directa. En lugares donde se ha regado con aguas residuales y a consecuencia de la acumulación de metales por estos usos en suelos, ha llegado a acumularse en plantas como maíz, trigo y alfalfa, metales pesados como cadmio, níquel y plomo en las mismas, principalmente en tejido foliar, en hojas de la alfalfa e incluso en granos de trigo (Lucho *et al.*, 2005). Metales como el cadmio (Cd) y el zinc (Zn), son absorbidos por las plantas, y en las hojas se llegan a acumular mayores contenidos del metal, provocando en las hojas un marchitamiento y disminución en la longitud de sus raíces y de la biomasa.

Níquel (Ni). El níquel puede encontrarse de maneras muy diversas en el suelo, como mineral cristalino inorgánico, en complejos quelados o como ion libre. El comportamiento de los compuestos de níquel en el suelo depende no solo de las propiedades de cada compuesto sino también del tipo de suelo. Con la disminución del pH en el suelo, aumenta el contenido de Ni en el suelo. Las plantas acumulan el Ni que toman del suelo principalmente en el sistema radicular (Prieto *et al.*, 2007).

Cobre (Cu). En la corteza terrestre el contenido de cobre puede situarse alrededor de 70 ppm, siendo los sulfuros los minerales más abundantes y la principal fuente suministradora del elemento al suelo. En los suelos, la cantidad de cobre es variable, pudiendo oscilar por lo general entre 5 y 50 ppm (Bohn *et al.*, 1993).

Si se tiene en cuenta las mínimas necesidades de cobre que las plantas requieren, se comprende que el problema de su normal nutrición no puede plantearse en función de los mayores o menores contenidos en el suelo, sino a una situación edáfica particular que permita o no su absorción, ya que el contenido potencial de elemento en los suelos es más que suficiente para una nutrición correcta (Kabata-Pendias, 2004).

La fijación de cobre por la materia orgánica se ha considerado como la causa principal de la aparición de la deficiencia en plantas creciendo en suelos con alto contenido orgánico. En algunos casos el cobre es tan fuertemente retenido que queda en una situación inasimilable por la planta, en otros, por el contrario, lo está muy débilmente y ello puede proporcionar una fácil asimilación. El pH influye sobre la disponibilidad de cobre para las plantas, ya que la solubilidad de cobre en el suelo disminuye ligeramente al incrementarse el pH. En suelos ácidos el cobre se solubiliza, y se pierde por lixiviación, estas pérdidas pueden llegar a provocar una deficiencia, no por inasimilabilidad química en el medio, sino por excesivo dinamismo con relación al lavado que sufre el suelo (Navarro y Navarro, 2003).

Zinc (Zn). Los metales acumulados en la superficie del suelo se reducen lentamente mediante la lixiviación, el consumo por las plantas y la erosión. Para el caso del zinc en suelos agrícolas, el contenido total puede oscilar entre 10 y 300 ppm. Los metales pesados están presentes naturalmente en los suelos, pero en los últimos años las actividades industriales y la disposición de residuos de todo tipo han contribuido a una acumulación de estos elementos en suelos.

Cuando el pH es menor a 5, el zinc se encuentra disponible para las plantas y puede lixiviarse a capas profundas del suelo. La absorción de zinc por las plantas disminuye a la mitad cuando el pH del suelo aumenta de 5 a 7 (Puga *et al.*, 2006).

Hierro (Fe). El contenido de hierro en la corteza terrestre es verdaderamente importante, alrededor del 5% y es por tanto después del silicio y aluminio el elemento más abundante. Su contenido en los suelos suele variar entre 1% y 5%. Valores inferiores a 1% suelen encontrarse normalmente en suelos ácidos de textura gruesa. La cantidad de hierro en los suelos no es, sin embargo, indicadora de su disponibilidad para las plantas (Navarro y Navarro, 2003). Los contenidos de arcilla y de materia orgánica son factores a considerar en la inasimilabilidad y movimiento del hierro en el suelo. Los suelos arcillosos suelen mostrar una marcada tendencia a retener el hierro mediante un simple proceso de adsorción. Un contenido apropiado de materia orgánica en el suelo actúa favorablemente en el aprovechamiento del hierro por sus características reductoras y acidificantes.

4.4 Metales pesados en planta

Las principales vías de entrada de los metales a las plantas son el aire, el agua y el suelo, siendo las plantas un punto de conexión importante entre la parte abiótica y biótica del ecosistema en la transferencia de metales (Nriagu, 1990). Los principales peligros ambientales de la transferencia de metales pesados desde el suelo a las plantas son la entrada de los metales en la cadena trófica, la pérdida de cobertura vegetal o cosecha por su fitotoxicidad y la absorción de metales desde el suelo por plantas tolerantes, que pueden producir efectos tóxicos en la flora y la fauna (Kabata- Pendias, 2004). Por lo tanto, además del suelo las plantas son un elemento importante en los procesos de contaminación.

Esto es especialmente relevante en zonas agrícolas, ya que la transferencia de metales pesados a los seres humanos puede producirse de manera directa.

También se refleja la transferencia de los metales desde el sistema agua-suelo-planta a los seres humanos. Por tanto, se puede observar que la contaminación por metales pesados de los suelos puede afectar de manera directa a la salud humana (Nriagu, 1990).

Los metales pueden llegar a los seres humanos desde el suelo bien por ingestión directa o a través de la ingestión de plantas y/o animales, aunque también a través del aire y las aguas superficiales (Chang *et al.*, 1992).

4.4.1 Absorción y traslocación de metales pesados en las plantas y frutos.

Las plantas han desarrollado mecanismos altamente específicos para absorber, traslocar y acumular nutrientes (Lasat, 2000; Al-Lahham *et al.*, 2007), sin embargo, algunos metales y metaloides no esenciales para los vegetales son absorbidos, traslocados y acumulados en la planta debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos requeridos (Carrillo y Cajuste, 1992).

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso de su entrada en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen de; el movimiento de los metales desde la solución del suelo a la raíz de la planta, el paso de los metales por las membranas de las células corticales de la raíz, el transporte de los metales desde las células corticales al xilema desde donde la solución con metales se transporta de la raíz a los tallos, y la posible movilización de los metales desde las hojas hacia tejidos de almacenamiento usados como alimento (semillas, tubérculos y frutos) por el floema (Seoáñez, 1999).

La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Las diferencias de absorción de metales puede ser atribuida a la capacidad de retención del metal por el suelo y a la interacción planta – raíz – metal (Martínez *et al.*, 1998; Walter y Lin, 2007).

El comportamiento de la planta frente a los metales pesados depende de cada metal (Méndez *et al.*, 1998). En el Cuadro 5 se muestran los metales pesados más importantes considerados como esenciales y tóxicos para plantas y animales.

Cuadro 5. Metales pesados esenciales y/o tóxicos para vegetales y/o animales.

| Elemento | Esencial | | Tóxico | | F. dominante en el suelo |
|----------|----------|--------|---------|--------|---|
| | Vegetal | Animal | Vegetal | Animal | |
| As | NO | NO | SI | SI | AsO ₄ ⁻³ |
| Cd | NO | NO | SI | SI | Cd ²⁺ |
| Cr | NO | SI | NO | NO | Cr ³⁺ , CrO ₄ ²⁻ |
| Cu | SI | SI | SI | SI | Cu ²⁺ |
| Hg | NO | NO | SI | SI | Hg ²⁺ , (CH ₃) ₂ Hg |
| Mo | SI | SI | SI | SI | MoO ₄ ²⁻ |
| Ni | SI | SI | SI | NO | Ni ²⁺ |
| Pb | NO | NO | SI | SI | Pb ²⁺ |
| Se | NO | NO | SI | SI | SeO ₄ ²⁻ |
| Zn | SI | SI | SI | SI | Zn ²⁺ |
| Co | SI | SI | NO | NO | Co ²⁺ |
| Sn | NO | NO | NO | SI | Sn ⁴⁺ |

Fuente. Urbano y Rojo, 1992.

Existe un equilibrio entre las fracciones disponible y no disponible de estos elementos en el suelo. La importancia de las distintas vías de transferencia de estos elementos varía considerablemente; depende del tipo de elemento, especie vegetal, tipo de suelo, prácticas agrícolas, etc. Con frecuencia se producen alteraciones en los aportes o pérdidas de dichos elementos, que modifican su ciclo y dan lugar a que se encuentren en proporciones tóxicas o deficientes (Navarro *et al.*, 2007).

4.4.2 Factores que regulan el paso de los metales pesados del suelo a la planta

Las cantidades de metales pesados en los suelos son diferentes. En general, los valores más elevados suelen reflejar una mayor actividad industrial.

Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran pero en distinto grado, dependiendo de la especie vegetal, y de las características y contenido en metales del suelo.

Las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Barceló y Poschenrieder, 2003). Unas basan su resistencia a los metales con la estrategia de una eficiente exclusión del metal, restringiendo su transporte a la parte aérea. Otras acumulan el metal en la parte aérea en una forma no tóxica para la planta. La exclusión es más característica de especies sensibles y tolerantes a los metales, y la acumulación es más común de especies que aparecen siempre en suelos contaminados.

En el suelo se pueden dar condiciones que influyen en mayor o menor medida sobre la capacidad de la fracción sólida del suelo de retener a los metales pesados aportados:

- Capacidad de intercambio catiónico. En líneas generales, cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico del suelo (función de la cantidad y tipos de materia orgánica y de arcilla que posea el suelo), mayor será la inmovilización ejercida sobre los metales.
- pH. Para la mayor parte de los metales pesados, una disminución de pH aumenta el riesgo de paso a la solución del suelo. Se indica que una unidad de incremento en el pH hace descender 100 veces los niveles de Cd, Cu, Ni y Zn en la solución del suelo.
- Potencial redox.
- Tipo de materia orgánica: cantidades de ácidos húmicos y fúlvicos.

No obstante, cada elemento se comportará en cada suelo concreto de una manera determinada, pues son muchas las interrelaciones existentes e influyentes en el sistema suelo-planta.

4.4.3 Efectos de los metales pesados sobre las plantas

Es importante mencionar que no todas las plantas presentan ni la misma sensibilidad ni la misma capacidad de absorción frente a una concreta concentración de metal disponible; existe una gran disparidad en las relaciones de disponibilidad, toxicidad y respuestas de las plantas al estrés por metales.

Navarro *et al.*, (2007) y Pérez *et al.*, (2008) han clasificado los vegetales de consumo humano y vegetal según su nivel de sensibilidad o tolerancia respecto a estos metales. Evidentemente, el criterio no es homogéneo para todos los elementos frente a una misma especie vegetal. La acumulación en determinados tejidos u órganos es variable, así: la asimilación de Cr, Hg y Pb es pequeña y son bloqueados en la raíz; Cd y Hg son más zootóxicos que fitotóxicos, es decir, pueden acumularse en tejido vegetal en concentraciones tóxicas para los animales, sin que ello produzca efecto adverso para la planta; o la elevada fitotoxicidad de Cu, Ni y Zn hace que el vegetal actúe de barrera de protección frente a la incorporación en la cadena trófica.

5. MATERIALES Y MÉTODOS GENERALES

5.1 Ámbito de la zona de estudio

La zona de estudio se localiza en la región de Tecamachalco, al sureste del estado de Puebla, y se localiza dentro del Distrito de Riego 030 Valsequillo. La zona de estudio abarca tres módulos de riego, donde la actividad principal es la agricultura, y para la irrigación de cultivos se hace uso del agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, la cual es conocida como la gran obra para riego que abastece alrededor de 22, 000 hectáreas en 17 municipios del Distrito de Riego 030 Valsequillo. En la Figura 1 se presenta la zona de estudio.

5.1.1 Topografía

Los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo se localizan dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, dicha provincia cuenta con una litología muy completa en la que las rocas intrusivas cristalinas, especialmente granitos y las metamórficas, tienen una mayor importancia que en la mayoría de las provincias del norte. Los climas predominantes son subhúmedos, cálidos y semicálidos (INEGI, 2008). Las regiones Valles de Tepeaca-Tecamachalco y el Valle de Puebla, a diferencia de los llanos se localizan entre 2 000 y 2 300 msnm. El Valle de Tepeaca-Tecamachalco tiene escasa presencia de ríos, sin embargo, tiene la peculiaridad de presentar los mayores aprovechamientos de los recursos fluviales, pues su territorio se encuentra surcado por una gran cantidad de canales de riego que se benefician del río Atoyac, el cual pasa por el occidente de la región.

5.1.2 Tipos de suelo

Los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo presentan diferentes unidades de suelo, pero la zona de estudio se caracteriza por solo cuatro unidades:

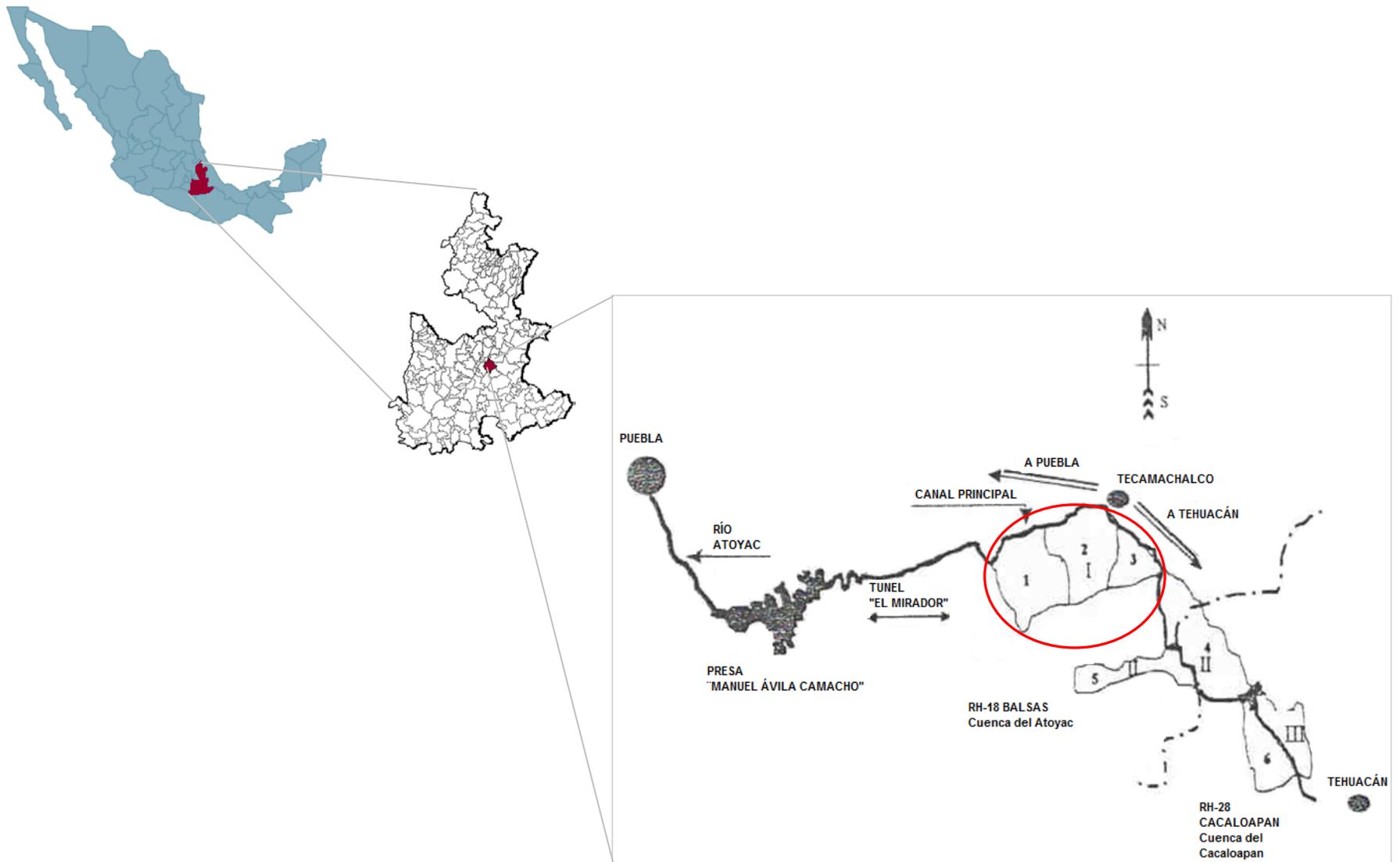


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

- Litosol: Símbolo I. Suelos extremadamente delgados, menores de 10 cm, limitados en su profundidad por tepetate. La textura media domina en estos suelos, y el drenaje en estas zonas depende de la naturaleza de la roca madre, la fracturación de ella.
- Rendzina: Símbolo E. Suelos con menos de 50 cm de espesor, la capa superficial es algo gruesa, oscura y rica en materia orgánica y nutrientes aportada por la vegetación natural. La clase textural dominante es media, el drenaje interno es moderadamente a excesivamente drenado.
- Regosol: Símbolo R. Suelos sin estructura y de textura variable, poco evolucionados en su perfil. Son suelos que poseen muy poca materia orgánica su profundidad es muy variable entre 10 y más de 100 cm dependiendo frecuentemente de la pendiente.
- Cambisol: Símbolo B. Suelos con un subsuelo muy diferente a simple vista en color y textura a la capa superficial. La capa superficial puede ser oscura, con más de 25 cm de espesor pero pobre en nutrientes.

5.1.3 Clima

De acuerdo con la información geográfica que establece el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2008), el clima predominante en la zona de estudio es templado subhúmedo con lluvias en verano. Los terrenos bajo la influencia de este clima están ubicados: hacia el norte, donde comprenden parte de los municipios que se encuentran en los alrededores de la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo). La temperatura media anual varía entre 12° y 18°C, la precipitación total anual tiene un rango de 600 a 700 mm, y el porcentaje de lluvia invernal es menor de 5.

5.1.4 Hidrología

Los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo se localizan dentro de la Región Hidrológica (RH-18) Río Balsas y la Cuenca del Río Atoyac. Esta región, es una de las más importantes del país; ocupa las zonas central y suroccidental del estado (INEGI, 2008). En la zona de estudio 11 zonas principales

de explotación del agua subterránea, según el número de aprovechamientos que contienen y las cantidades de agua extraídas. Estas áreas se encuentran incluidas a su vez, dentro de las cinco grandes zonas geohidrológicas establecidas por la CONAGUA (2010) para el estado de Puebla; Valle de Puebla, Cuenca Oriental, Zona de Atlixco-Izucar de Matamoros, Zona de Tecamachalco y Tehuacan.

5.1.5 Cultivos en la zona

La superficie total sembrada en el estado de Puebla durante el año 2008 fue de 961,483.72 ha, de las cuales 9, 492 ha se sembraron en la región de Tecamachalco tanto de riego como de temporal, con una valor de producción aproximado a \$168, 000 (INEGI, 2008).

De acuerdo con los datos proporcionados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2008), en la región de Tecamachalco se sembró una superficie total de 7000 ha de maíz, de las cuales 3580 ha fueron de riego y 3420 ha de temporal. Para el caso de la alfalfa de riego se sembraron 2538 ha.

La agricultura es la principal actividad económica en el módulo uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, sustentada principalmente por agua proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho. Los recursos hídricos son aprovechados en su gran mayoría por la agricultura. Por lo que respecta a los de origen superficial son del orden de 207 millones de m³/año, provenientes de la presa Valsequillo, obra de cabecera del Distrito de Riego 030 Valsequillo (Diario Oficial, 2009).

En los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, los cultivos básicos abarcaron el 52% de la superficie total, las hortalizas 26.6% y los forrajes el 21.4 % aproximadamente. Los cultivos básicos están dominados en un 87.5% de la superficie por el maíz, y en los forrajes el 91% del área cosechada es alfalfa. Dentro de las hortalizas, tomate verde, lechuga, col, zanahoria, cilantro y jitomate, ocuparon el 77% de la superficie hortícola (Diario Oficial, 2009).

5.2 Fuentes de obtención de información

Para desarrollar esta investigación se consideraron cuatro etapas; revisión de literatura, visitas de campo, análisis de laboratorio, captura de información y el análisis de resultados.

- Revisión de literatura: se revisaron los antecedentes de los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, tales como análisis económicos, sociales y ambientales. También se revisaron estudios realizados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo. Se obtuvo información geográfica del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2008).
- Trabajo de campo y laboratorio: para realizar el recorrido de campo se utilizaron cartas topográficas con la finalidad de identificar los sitios de muestreo. El trabajo de laboratorio se realizó de acuerdo a lo establecido en las normas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-021-RECNAT-2000.
- Captura de información: se utilizó un libro de campo para capturar información importante de cada zona de estudio como coordenadas geográficas, fecha de muestreo, características de la zona, etc. También se capturaron los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio de agua, suelo y planta.
- Análisis de resultados: se interpretaron los resultados obtenidos de análisis de agua, suelo y planta, basándose en artículos publicados recientemente.

5.3 Métodos para el análisis de agua residual.

Las muestras de agua residual se tomaron a partir de la salida de la presa Manuel Ávila Camacho, la cual se denominó Cortina, y tres muestras más en sitios ubicados a lo largo del canal principal. También se tomaron muestras en sitios que se encuentran sobre los canales laterales que abastecen a los cultivos. El análisis de agua residual se realizó basándose en tres normas, en la norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000, NMX-AA-093.SCFI-2000, y en la norma NOM-021-RECNAT-2000 para el análisis de metales pesados en agua residual.

5.4 Métodos para el análisis de suelo

Para realizar el análisis de suelo se seleccionaron cinco sistemas de producción que se ubican en la región de Tecamachalco, donde los cultivos son maíz y alfalfa. La determinación de pH, C.E., textura, materia orgánica, Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺.

La determinación de la concentración de metales pesados en suelo se realizó de acuerdo a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, analizando las muestras por espectrofotometría de absorción atómica.

5.5 Metodología empleada para el análisis de metales pesados totales en planta.

La determinación del contenido total de metales pesados en planta se realizó según lo establecido por Benton (2001) mediante digestión ácida en una mezcla de H₂SO₄ (ácido sulfúrico) y H₂O₂ (peróxido) al 30%. Se hace uso de un digestor y finalmente las muestras se analizan por espectrofotometría de absorción atómica.

5.6 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando un software estadístico (SPSS) versión 15, entre la concentración de metales presentes en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho y cada sitio de muestreo, ubicados sobre el canal principal y canales secundarios que abastecen de agua a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo. También se realizó un análisis estadístico entre la concentración de metales pesados y micronutrientes disponibles en el suelo a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm). El último análisis realizado fue entre la concentración de metales pesados y micronutrientes disponibles en el suelo, y la concentración de metales pesados encontrados en cada parte de la planta analizada.

CAPÍTULO I. DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DE METALES PESADOS EN AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA PRESA MANUEL AVILA CAMACHO

La presa Manuel Ávila Camacho se construyó con la finalidad de captar aguas de los ríos Atoyac y Alseseca, así como aguas pluviales, industriales y urbanas con la finalidad de utilizar ésta agua para riego agrícola. La contaminación de los cuerpos de agua es producto de las descargas de aguas residuales sin tratamiento, ya sea de tipo domestico e industrial básicamente. La norma que regula las descargas es la NOM-001-SEMARNAT-1996 que únicamente toma en cuenta parámetros convencionales, metales, cianuros y en la mayoría de los casos tanto las industrias como los municipios cumplen con lo establecido, pero cuando se analizan estas aguas desde el punto de vista toxicológico, se detectan elevadas concentraciones de metales pesados (MP). Con base en lo anterior se realizo esta investigación con la finalidad de determinar la concentración de MP, así como características físicas y químicas del agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho la cual circula sobre el canal principal y canales secundarios que abastecen de agua para riego a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo. Se seleccionaron cuatro sitios de muestreo que se encuentran a lo largo del canal principal, cuatro sitios más que se encuentran alrededor de los canales secundarios, y un testigo (agua de pozo). Se tomaron muestras de agua del primer y tercer riego. Se analizaron MP (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe y Zn) por espectrofotometría de absorción atómica, así como pH, C.E., Cl⁻, PO₄, NO₃, SO₄⁻, Na⁺ y K⁺. La metodología se realizó en base a lo establecido en Normas Oficiales Mexicanas como es la NOM-021-RECNAT-2000, NMX-AA-008-SCFI-2000 y NMX-AA-093-SCFI-2000. Los resultados indican que los MP en agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, y también de acuerdo con lo establecido por Vásquez (1996).

Palabras clave: contaminación, agua residual, metales pesados.

ABSTRACT

The Manuel Avila Camacho dike was built with the purpose to store water of Atoyac and Alseseca rivers, such as water rain, water coming of industries and cities, to use to farming irrigation. The water pollution is due to residual water without treatment, proceeding of industries and domestic use. The water discharges are regulated for standard NOM-001-SEMARNAT-1996 and only take conventional parameters like some metals and cyanides for this reason the industries and districts are inside standard, however when this waters are analyzed from a toxicologic point of view, high concentrations of heavy metals are detected. Based in this facts, it was realized an investigation to determined the heavy metals concentration (HM), as such as, physical and chemical wastewater characteristics incoming of Manuel Avila Camacho dike, it circulate over the principal and secondary channel, that supply the water to irrigate the module one of district 30 in Valsequillo. Were choice a four places to take samples around the principal channel and another four places to the secondary channel in addition a witness (well) this samples was acquired from the first and third irrigation. Were analyzed total MH (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe y Zn) by spectrometry of atomic absorption, such as, pH, C.E., Cl⁻, PO₄, NO₃, SO₄⁻, Na⁺ y K⁺. The methodology for that analysis of residual waters was based according to Mexican Official Standards like NOM-021-RECNAT-2000, NMX-AA-008-SCFI-2000 and NMX-AA-093-SCFI-2000. The results indicates that the HM in residual water from the Manuel Avila Camacho dike are inside the maximum limits permissible establish in the standard NOM-001-SEMARNAT-1996 and also in accordance with that settled down for Vasquez (1996).

Key words: pollution, residual water, heavy metals.

INTRODUCCIÓN

La calidad de los productos obtenidos a través de la actividad agrícola está determinada, en gran medida, por la calidad del agua empleada en el riego de los cultivos. En México, al igual que en otros países, las aguas residuales urbanas e industriales son empleadas, con alguna frecuencia, para regar cultivos agrícolas de consumo animal o humano. (Carrillo *et al.*, 1992).

La LGEEPA (2006) define a los contaminantes como toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural altere o modifique su composición y condición natural, entre estos contaminantes se encuentran los metales pesados.

Los metales pesados son un conjunto de elementos que presentan como característica común su elevada densidad (Duffus, 2002). Existen algunos elementos que son esenciales para las plantas, animales y seres humanos como son el Fe, Zn, Cu, Cr, etc. sin embargo la presencia de otros metales pesados como el Cd y Pb, no esenciales, pueden llegar a ser tóxicos para las plantas, animales y seres humanos (Weber y Karczewska, 2004).

La norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, toma en cuenta parámetros convencionales, algunos metales y cianuros, por lo que en la mayoría de los casos, tanto las industrias como los municipios cumplen con lo establecido. Sin embargo cuando se analizan desde el punto de vista toxicológico, éstas detectan niveles de toxicidad (Sandoval *et al.*, 2009).

Mendez *et al.*, (2000) menciona que el problema del río Atoyac se ha agudizado con la incorporación del agua residual procedente de Tlaxcala, San Martín

Texmelucan, Moyotzingo y la Ciudad de Puebla, debido a su alto contenido de sales solubles y la presencia de metales pesados, detergentes y grasas, por lo que la adición y acumulación de estos contaminantes en los suelos agrícolas, a través del riego, se han incrementado con la industrialización.

Por otra parte, Saldaña *et al.*, (2002), empleando pruebas de toxicidad en la evaluación de la calidad del agua del río Alseseca, que al igual que el Atoyac desemboca en la presa Manuel Ávila Camacho, encontraron un coeficiente de correlación alto entre parámetros fisicoquímicos y toxicológicos.

Considerando lo antes expuesto, los objetivos del presente trabajo fueron determinar la concentración de metales pesados totales (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe, Zn), así como las características físicas y químicas (pH, C.E., cloruros, fosfatos, nitratos, sulfatos, sodio y potasio) que presenta el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, la cual circula sobre el canal principal y canales secundarios que abastecen de agua para riego a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.

También se realizó un análisis estadístico con la finalidad de identificar si la distancia entre cada sitio es una determinante para que la concentración de metales disminuya.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de la zona de estudio

La presa Manuel Ávila Camacho se encuentra en el estado de Puebla a una elevación de 2060 msnm, presenta un área total de 2780 ha y la capacidad de almacenamiento es de 330.583 (Mm³) millones de metros cúbicos, y el volumen registrado en el mes de febrero del 2009 fue de 291.052 (Mm³) millones de metros cúbicos. La ubicación geográfica de la zona de estudio y los sitios muestreados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo pueden observarse en las Figuras 2 y 3.

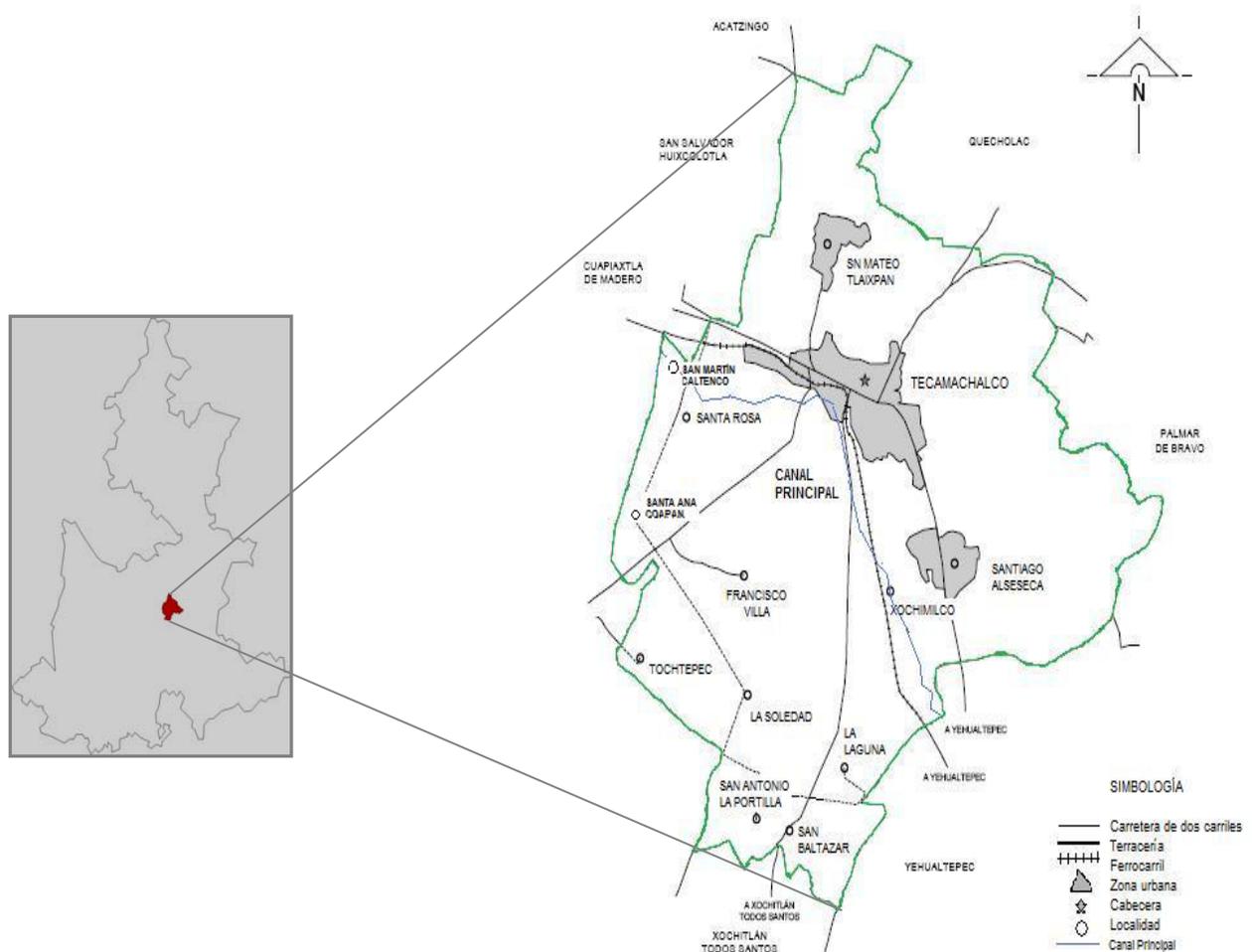


Figura 2. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.

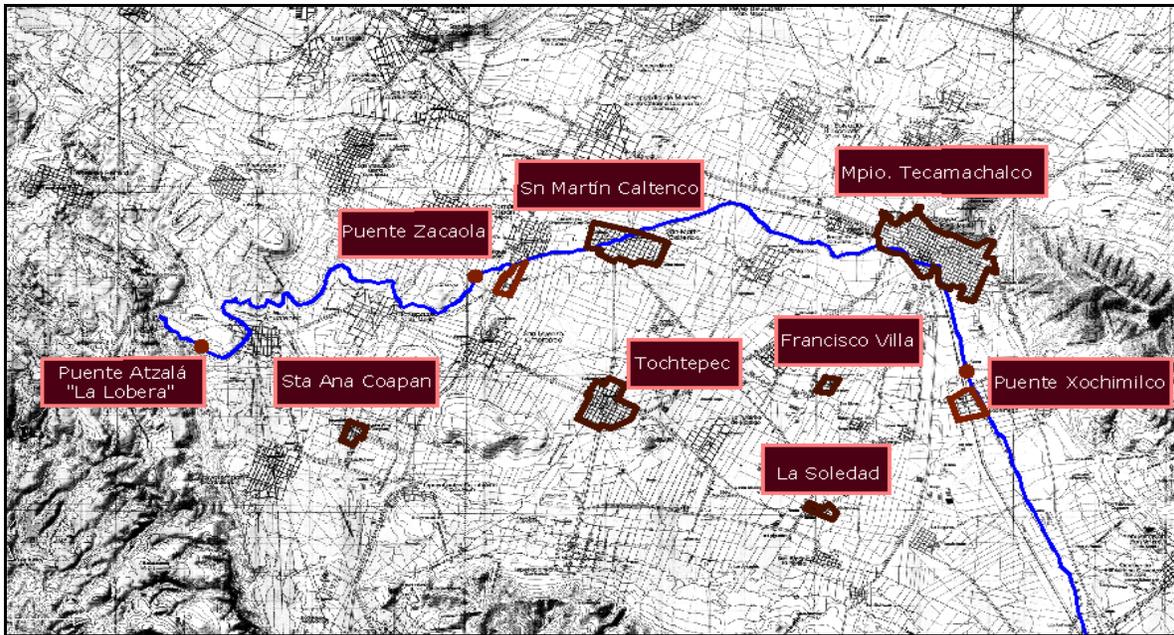


Figura 3. Sitios de muestreo de agua en la región de Tecamachalco.

Muestreo de agua

Se delimitó la zona de estudio a manera de que fueran representativos los sitios de muestreo. Las muestras de agua se tomaron en sitios que se encuentran en la región de Tecamachalco, una muestra de agua se tomo a la salida de la presa denominada como “Cortina”, y tres muestras corresponden a sitios ubicados sobre el canal principal los cuales son Atzalá “La Lobera”, Zacaola y Xochimilco.

También se tomaron cuatro muestras de agua en los canales laterales que abastecen de agua a los sitios de Santa Ana Coapan, San Martín Caltenco, Tochtepec y La Soledad. Finalmente se tomó una muestra de agua de pozo en el Rancho “La Luz”, ubicado en la localidad de Francisco Villa, el cual se utilizó como testigo. En el Cuadro 6 se presenta la ubicación geográfica de los sitios de muestreo seleccionados.

El sitio Atzalá “La Lobera” se ubica en el municipio de San Antonio Cañada, el tercer sitio de muestreo corresponde Zacaola el cual se localiza en el municipio de Santo Tomás Hueyotlipan, Santa Ana Coapan se encuentra en el municipio de

Huitziltepec. Las localidades de San Martín Caltenco y Tochtepec se localizan en el municipio de Tochtepec, y finalmente La Soledad, Xochimilco y Francisco Villa se localizan en el municipio de Tecamachalco. Todas las localidades y municipios anteriormente mencionados se localizan en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.

Cuadro 6. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.

| SITIOS DE MUESTREO | | | |
|--|----------------|-----------------|-----------------------|
| Muestras de agua | Latitud | Longitud | Altitud (msnm) |
| "Cortina" | 18° 54' 42" | 98° 06' 29" | 2052 |
| Atzalá "La Lobera" | 18° 51' 48" | 97° 50' 56" | 2023 |
| Zacaola | 18° 52' 43" | 97° 50' 56" | 2023 |
| Xochimilco | 18° 50' 39" | 97° 43' 27" | 2003 |
| Santa Ana Coapan | 18° 49' 37" | 97° 52' 55" | 1951 |
| San Martín Caltenco | 18° 52' 20" | 97° 48' 43" | 1997 |
| Tochtepec | 18° 51' 49" | 97° 44' 33" | 1998 |
| La Soledad | 18° 48' 38" | 97° 44' 11" | 1973 |
| Francisco Villa "Rancho La Luz" (Testigo) | 18° 50' 33" | 97° 46' 8" | 1980 |

Una vez que se seleccionaron los sitios de muestreo, se determinó la frecuencia de muestreo de acuerdo con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas.

Se tomaron nueve muestras simples de agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho la cual circula sobre el canal principal que abastece a la región de Tecamachalco. Las muestras se tomaron en cada uno de los sitios seleccionados, y el muestreo de agua se realizó durante las fechas que se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Periodicidad de muestreo de agua residual

| Primer periodo de muestreo | | Segundo periodo de muestreo | |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Fecha | Sitio | Fecha | Sitio |
| 30-Marzo-2009 | "Cortina" | 28-Julio-2009 | "Cortina" |
| 30-Marzo-2009 | Atzalá "La Lobera" | 28-Julio-2009 | Atzalá "La Lobera" |
| 30-Marzo-2009 | Zacaola | 28-Julio-2009 | Zacaola |
| 30-Marzo-2009 | Xochimilco | 28-Julio-2009 | Xochimilco |
| 08-Abril-2009 | Santa Ana Coapan | 03-Agosto-2009 | Santa Ana Coapan |
| 08-Abril-2009 | San Martín Caltenco | 03-Agosto-2009 | San Martín Caltenco |
| 08-Abril-2009 | Tochtepec | 03-Agosto-2009 | Tochtepec |
| 08-Abril-2009 | La Soledad | 03-Agosto-2009 | La Soledad |
| 08-Abril-2009 | Testigo (Francisco Villa) | 03-Agosto-2009 | Testigo (Francisco Villa) |

Descripción del muestreo de aguas residuales

Para realizar el muestreo se utilizaron recipientes de polietileno con tapas de cierre hermético, con capacidad de 2 L, los cuales fueron previamente desinfectados con una solución de ácido clorhídrico (HCL) al 10%, posteriormente se enjuagaron repetidamente con agua destilada.

La toma de muestra de agua se realizó con la ayuda de un muestreador con capacidad de 8 L aproximadamente, se introdujo el muestreador en la corriente de agua con la finalidad de enjuagarlo repetidas veces antes de efectuar el muestreo. Después se realizó la toma de muestra en el centro del canal, y finalmente la muestra de agua se transfirió del recipiente muestreador al recipiente para la muestra cuidando que esta fuera representativa, tal como lo indica la Norma Mexicana NMX-AA-003-1980. Las muestras de agua se colocaron en una hielera con la finalidad de preservar las muestras a una temperatura de 4°C hasta su llegada al laboratorio.

Metodología empleada para el análisis de aguas residuales.

pH. La determinación del potencial hidrógeno se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000.

Se seleccionaron dos disoluciones patrón para la calibración del dispositivo de determinación del pH. Se colocaron 20 ml de muestra en un frasco de boca ancha a una temperatura de 25 C °y se tomó la lectura.

C.E. La determinación de la conductividad electrolítica se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-093.SCFI-2000. El instrumento se calibró con una solución patrón de Cloruro de Potasio (KCl) 0.01 N. Se colocaron 20 ml de muestra en un frasco de vidrio de boca ancha, y posteriormente se tomó la lectura. Los resultados se reportan en dS m⁻¹.

Fosfatos. La determinación de fosfatos se realizó basándose en la norma NOM-021-RECNAT-2000. Se colocaron 10 ml de muestra en un matraz erlenmeyer de 125 ml, se adicionaron 4 ml molibdato de amonio, 2 ml de cloruro estanoso y 40 ml de agua destilada. Se elaboro una curva de calibración y las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro, con una intensidad de absorción de luz de 690 nm.

Sodio y Potasio. En base a la norma NOM-021-RECNAT-2000 se realizaron las determinaciones de sodio y potasio en aguas residuales en el espectrofotómetro de emisión atómica a una longitud de onda de 589 nm. Se colocó 1 ml de muestra en un matraz erlenmeyer de 125 ml, y se adicionaron 19 ml de agua destilada. Se elaboró una curva patrón de 10, 5 y 0 ppm para tomar las lecturas de la muestra.

Cloruros. La determinación de cloruros se realizó según lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000, metodología para determinar aniones solubles. Se colocaron 50 ml de muestra a una temperatura de 25 °C en un matraz erlenmeyer, se adicionaron 2 gotas de fenolftaleina al 1% y la muestra se tituló con H₂SO₄ 0.025 N. Posteriormente se agregaron 2 ó 3 gotas de dicromato de potasio al 5% (K₂CrO₄) y se tituló con nitrato de plata (AgNO₃) 0.025 N. Finalmente se tomó la lectura.

Sulfatos. El análisis se realizó según lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000, por el método de turbidimetría. Se colocaron 15 ml de muestra en un matraz erlenmeyer y se aforo a 50 ml, posteriormente se adicionaron 2.5 ml de solución acondicionadora y se agregaron 0.1 g de cloruro de bario. Se elaboró una curva patrón de 0, 3 y 6 ml para realizar las lecturas de las muestras de agua residual.

Metodología empleada para el análisis metales pesados en agua residual.

La determinación de la concentración de metales pesados en agua residual se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000. Se colocaron 10 ml de muestra de agua residual en un matraz erlenmeyer de 125 ml y se adicionaron 20 ml de solución DTPA (ácido del dietilen-triamino-pentaacético) 0.005 molar (M), luego se tapó el matraz y se llevó a un agitador mecánico por 2 hrs a 120 oscilaciones/min. Posteriormente se almacenó en recipientes de polietileno de 100 ml de capacidad, hasta su análisis por espectrofotometría de absorción atómica (VARIAN55B modelo AA0909M022). Se utilizaron estándares de 5 mg L⁻¹, 10 mg L⁻¹ y 20 mg L⁻¹ de cada elemento.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico con el objetivo de determinar si existe alguna correlación entre la concentración de metales pesados totales en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho y los sitios de muestreo que se encuentran sobre el canal principal y los canales secundarios. Se utilizó un software estadístico (SPSS) versión 15 en español, y se realizó un análisis de correlación de Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los análisis físicos y químicos realizados a las muestras de agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadros 8. Los resultados obtenidos de los sitios que se encuentran sobre el canal principal se comparan con el testigo.

Cuadro 8. Características físicas y químicas del agua residual que circula sobre el canal principal comparado con el testigo

| Parámetros | 1 | 2 | 3 | 4 | 9 |
|----------------------------|-----------|--------------------|---------|------------|----------------------------------|
| | “Cortina” | Atzalá “La Lobera” | Zacaola | Xochimilco | Testigo Fco. Villa Rancho La Luz |
| pH | 7.6 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.3 |
| C.E. (dS m ⁻¹) | 0.67 | 0.77 | 0.76 | 0.78 | 0.81 |
| Cloruros (me/l) | 3.7 | 3.6 | 3.6 | 3.1 | 1.8 |
| Fosfatos (mg/l) | 0.68 | 0.74 | 0.72 | 0.09 | 0.04 |
| Sodio (mg/l) | 98 | 104 | 116 | 112 | 73.8 |
| Potasio (mg/l) | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.2 | 0.9 |
| Sulfatos (me/l) | 1.99 | 2.73 | 2.32 | 3.08 | 0.46 |

En el Cuadro 9 se muestran los parámetros y clasificación del agua de riego según lo establecido por Jones y Wolf (1984), y también por Ayers y Westcot (1987).

Cuadro 9. Clasificación del agua de riego

| Parámetros | Buena | Media | Mala |
|--------------------------------|--------|-----------|------|
| (a) pH | - | 6.5 – 8.4 | - |
| (a) C.E. (dS m ⁻¹) | <0.75 | 0.75-3.0 | >3.0 |
| (a) Cloruros (me/l) | <4 | 4 – 10 | >10 |
| (a) Fosfatos (mg/l) | <3 | 3 - 19 | >19 |
| (a) Nitratos (mg/l) | <39 | 30-300 | >300 |
| (a) Sodio (mg/l) | <70 | 70-180 | >180 |
| (b) Potasio (mg/l) | 0 – 2 | - | - |
| (b) Sulfatos (me/l) | 0 – 20 | - | - |

Fuente: (a) Jones y Wolf, 1984. (b) Ayers R. S. y Westcot D. W. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO. Riego y Drenaje.

El pH obtenido en cada uno de los sitios de muestreo oscila entre 7.6 y 7.7, a excepción del testigo donde el pH es de 7.3, y de acuerdo con lo establecido por Jones y Wolf (1994), el rango normal del pH en el agua para riego es de 6.5 a 8.4, por lo que el pH en el agua residual proveniente de la presa se encuentra dentro de un rango adecuado para su uso en la irrigación de cultivos. Navarro y Pérez 2005 reportan un pH de 7.7 en el agua del río Texcoco, y menciona que se encuentra dentro de una clasificación media.

La conductividad eléctrica se encuentra en un rango de 0.67 y 0.78 dS m⁻¹, el testigo presenta una conductividad eléctrica de 0.81 dS m⁻¹, y según lo establecido por Jones y Wolf, 1994, el agua residual se encuentra dentro de la clasificación buena, por lo que se descartan problemas de salinidad en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho en el año 2009.

Los valores de cloruros encontrados en el agua residual oscila entre 3.1 y 3.7 me/l, el testigo registró un valor de 1.8 me/l, y de acuerdo con lo establecido por Ayers y Westcot (1987), estos valores se encuentran dentro de una clasificación buena ya que son menores a 4 me/l.

Para el caso de fosfatos, los valores encontrados oscilan entre 0.09 y 0.74 me/l, y según lo establecido por Jones y Wolf (1994) el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho se encuentran dentro de una clasificación buena ya que es menor a 3 me/l.

En el caso de sodio (Na⁺) el valor más bajo se obtuvo en el sitio identificado como la Cortina, el cual fue de 98 mg/l y el más alto se presentó en Zacaola con 116 mg/l, estos valores se compararon con el obtenido en el testigo el cual fue de 73.8 mg/l, y de acuerdo con lo establecido por Jones y Wolf (1994), el agua proveniente de la presa es clasificada como media, debido a que se encuentra dentro de una rango de 70 a 180 mg/l.

El potasio (K^+) registró una concentración que oscila entre 1.2 y 1.4 mg/l, sin embargo el testigo registró una concentración de potasio menor, la cual fue de 0.9 mg/l. Estos valores se encuentran dentro de la clasificación buena para uso agrícola establecida por Ayers y Westcot (1987). La concentración de potasio se encuentra muy por debajo de las concentraciones reportadas por Méndez *et al.*, (1996).

La menor concentración de sulfatos fue registrada en la Cortina, encontrando un valor de 1.99 me/l y la más alta fue registrada en Xochimilco encontrando una concentración de 3.08 me/l, estos datos se compararon con el testigo donde la concentración fue de 0.46 me/l, y de acuerdo con lo establecido por Ayers y Westcot (1987) el agua residual proveniente de la presa se encuentran dentro de la clasificación buena para uso agrícola.

En el Cuadro 10 se muestran los resultados obtenidos de las características físicas y químicas del agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho que circula sobre los canales secundarios.

Cuadro 10. Características físicas y químicas del agua residual que circula sobre los canales secundarios comparado con el testigo

| Parámetros | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------------------|------------------|---------------------|-----------|------------|----------------------------------|
| | Santa Ana Coapan | San Martín Caltenco | Tochtepec | La Soledad | Testigo Fco. Villa Rancho La Luz |
| pH | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.8 | 7.3 |
| C.E. ($dS\ m^{-1}$) | 0.78 | 0.79 | 0.79 | 0.78 | 0.81 |
| Cloruros (me/l) | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 3.4 | 1.8 |
| Fosfatos (mg/l) | 0.09 | 0.15 | 0.11 | 0.09 | 0.04 |
| Sodio (mg/l) | 100 | 114 | 108 | 120 | 73.8 |
| Potasio (mg/l) | 1.3 | 1.5 | 1.5 | 1.2 | 0.9 |
| Sulfatos (me/l) | 4.45 | 4.75 | 3.30 | 4.08 | 0.46 |

El pH obtenido en los sitios de muestreo oscila entre 7.6 y 7.8, y el pH obtenido en el testigo fue de 7.3. Jones y Wolf (1994) mencionan que el rango normal del pH en el agua para riego es de 6.5 a 8.4, por lo que el pH en el agua residual proveniente de la presa se encuentra dentro de un rango adecuado para su uso en la irrigación de cultivos. Sandoval *et al.*, (2009), menciona que el pH encontrado en las aguas del río Atoyac, agua que llega a la presa Manuel Ávila Camacho, se encuentra dentro de un rango de 7 a 8. Por lo que los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación coinciden con lo reportado por el autor anteriormente mencionado.

La conductividad eléctrica se encuentra en un rango de 0.78 y 0.79 dS m⁻¹, el testigo presenta una conductividad eléctrica de 0.81 dS m⁻¹, por lo que se descartan problemas de salinidad en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho usada para riego en el año 2009 (Jones y Wolf, 1994).

Los resultados obtenidos se asemejan a lo reportado por Navarro y Pérez (2005) donde la conductividad eléctrica del agua del río Texcoco oscila entre 0.75 dS m⁻¹. En la Figura 4 se muestra gráficamente los resultados de pH y C.E. en agua residual, tanto de los sitios ubicados sobre el canal principal, como de los que se encuentran sobre los canales secundarios.

Para el caso de cloruros los valores encontrados son de 3.3 a 3.4 me/l, el valor más bajo se registró en el testigo con un valor de 1.8 me/l, tomando en cuenta que esta es agua de pozo. De acuerdo con lo establecido por Ayers y Westcot (1987), estos valores se encuentran dentro de un rango normal para agua de riego, clasificándola como buena. Los resultados obtenidos se compararon con lo establecido por Méndez *et al.*, (2008), quienes encontraron en una escala de 0.30 a 0.40 me/l de cloruros en agua de riego para producción aguacatera, por lo que, en relación con este elemento, el agua la consideraron de buena clase.

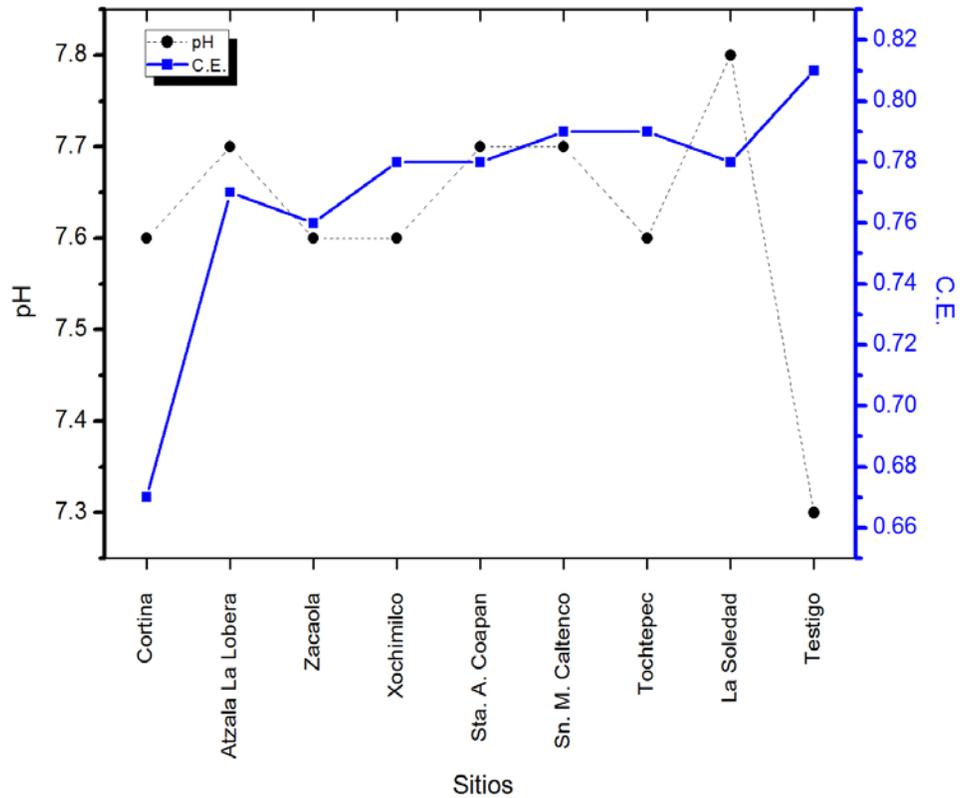


Figura 4. Resultados obtenidos de pH y C.E. de cada uno de los sitios.

Los fosfatos encontrados en el agua residual proveniente de la presa se encuentran dentro de la clasificación buena, según lo establecido por Jones y Wolf (1994), ya que los valores oscilan entre 0.09 y 0.15 me/l. Navarro y Pérez (2005), quienes elaboraron un estudio en el agua del río de Texcoco, reportan elevadas concentraciones de fosfatos (26.72 mg L^{-1}), lo cual resulta ser un riesgo para la agricultura.

En el caso de sodio (Na^+) presentó una concentración que oscila entre 100 y 120 mg/l, en los sitios Santa Ana Coapan y La Soledad respectivamente. En el testigo se encontró un valor de 73.8 mg/l, y de acuerdo con los resultados obtenidos el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho es clasificada como media de acuerdo con lo establecido por Jones y Wolf (1994). En general la concentración Na^+ fue inferior comparado con lo reportado por Méndez *et al.*,

(1996), quienes encontraron elevadas concentraciones de Na^+ en las aguas del río Atoyac.

La concentración más baja de potasio (K^+) se registró en La Soledad (1.2 mg/l) y la más alta en San Martín Caltenco y Tochtepec (1.5 mg/l), sin embargo en el testigo se registró una concentración mucho menor la cual fue de 0.9 mg/l, pero estos valores se encuentran dentro de la clasificación buena para uso agrícola establecida por Ayers y Westcot (1987). La concentración de potasio encontrada en el presente trabajo de investigación está muy por debajo de las concentraciones reportadas por Méndez *et al.*, (1996).

Para el caso de sulfatos, la concentración oscila entre 3.30 me/l registrándose en Tochtepec y 4.75 me/l en la localidad de San Martín Caltenco. Sin embargo en el testigo la concentración de sulfatos se encuentra muy por debajo de estos valores, ya que la concentración registrada fue de 0.46 me/l, y de acuerdo con lo establecido por Ayers y Westcot (1987) el agua residual proveniente de la presa se encuentran dentro de la clasificación buena para uso agrícola.

Metales pesados presentes en el agua residual

El análisis realizado a cada uno de los sitios de muestreo indica que existe la presencia de metales pesados en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho la cual circula sobre el canal principal, tal como se muestra en el Cuadro 11. Los resultados obtenidos se comparan con el testigo, la cual es agua de pozo.

En el Cuadro 12 se muestran los límites máximos permisibles para metales pesados en aguas residuales establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 y lo establecido por Vásquez (1996).

Cuadro 11. Concentración de metales pesados totales en agua residual que circula sobre el canal principal comparado con el testigo.

| Parámetros | 1 | 2 | 3 | 4 | 9 |
|--------------------------|-----------|--------------------|---------|------------|----------------------------------|
| | "Cortina" | Atzalá "La Lobera" | Zacaola | Xochimilco | Testigo Fco. Villa Rancho La Luz |
| Pb (mg L ⁻¹) | 0.1 | 0.3 | ND | ND | 0.4 |
| Cd (mg L ⁻¹) | ND | ND | ND | ND | ND |
| Ni (mg L ⁻¹) | 1.0 | 1.1 | 0.8 | 0.9 | ND |
| Cu (mg L ⁻¹) | ND | 1.4 | 0.4 | ND | ND |
| Zn (mg L ⁻¹) | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.2 | ND |
| Fe (mg L ⁻¹) | 4.1 | 2.1 | 2.3 | 0.4 | 0.04 |

Cuadro 12. Límites máximos permisibles de metales pesados en aguas residuales

| Parámetros | (a) NOM-001-SEMARNAT-1996 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES | | (b) Límites máximos permisibles en aguas residuales para uso agrícola |
|---------------------------|--|-----------------|--|
| | Promedio mensual | Promedio diario | |
| Pb (mg L ⁻¹) | 0.5 | 1.0 | 5.0 |
| Cd (mg L ⁻¹) | 0.2 | 0.4 | 0.01 |
| Ni (mg L ⁻¹) | 2 | 4 | 0.2 |
| Cu (mg L ⁻¹) | 4.0 | 6.0 | 0.2 |
| Zn (mg L ⁻¹) | 10 | 20 | 2.0 |
| Fe (mg kg ⁻¹) | - | - | 5.0 |

Fuente. (a) NOM-001-SEMARNAT-1996. (b) Vásquez A. A. 1996.

La concentración de plomo (Pb) únicamente se detectó en dos de los sitios muestreados que se ubican sobre el canal principal que abastece de agua los módulos uno, dos y tres, los cuales fueron en la Cortina y Atzalá "La Lobera" detectando concentraciones de 0.1 y 0.3 mg L⁻¹ respectivamente, éstos datos se encuentran por debajo de la concentración detectada en el testigo la cual fue de 0.4 mg L⁻¹, sin embargo estas concentraciones se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, así como por lo establecido por Vásquez (1996) en aguas residuales para uso agrícola.

El cadmio (Cd) no se detectó en ninguno de los sitios muestreados.

Para el caso del níquel (Ni), la concentración de este metal en el agua que circula sobre el canal principal oscila entre 0.8 y 1.1 mg L⁻¹, la concentración más baja se detectó en Zacaola y la más alta en Atzalá “La Lobera”. En el caso del testigo, no fue detectada la presencia de éste metal. De acuerdo con lo establecido en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, la concentración de Ni se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, y también dentro de los límites máximos permisibles en aguas residuales para uso agrícola establecidos por Vásquez (1996).

La concentración del cobre (Cu) es uno de los metales que se detectó en dos de los sitios muestreados que se encuentran sobre el canal principal, en Atzalá “La Lobera” y Zacaola, obteniendo valores de 1.4 mg L⁻¹ y 0.4 mg L⁻¹, en el testigo no se detectó la presencia de éste metal. Por lo anterior, la concentración de Cu detectada se encuentra dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

En el caso del zinc (Zn), la concentración encontrada en el agua que circula sobre el canal principal que abastece de agua a la región de Tecamachalco, oscila entre 0.2 y 0.7 mg L⁻¹, la concentración más baja se registró en la Cortina y Xochimilco, y las más altas en Atzalá “La Lobera” y Zacaola, en el testigo no se detectó la presencia de Zn. De acuerdo con lo establecido por Vásquez (1996), estos valores se encuentran dentro de los límites máximos permisibles en aguas residuales para uso agrícola, al igual que lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

Las concentraciones de hierro (Fe) fueron las más altas detectadas en el presente trabajo de investigación. La concentración más alta de este metal en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho la cual circula sobre el canal principal, fue de 4.1 mg L⁻¹ en la Cortina y la más baja en Xochimilco

registrando una concentración de 0.4 mg L^{-1} . En el testigo se obtuvo un valor de 0.04 mg L^{-1} , concentración que se encuentra muy por debajo de la detectada en el agua residual, tomando en cuenta que en el testigo se muestreo agua de pozo, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos. Sin embargo las concentraciones de Fe se encuentran dentro de los límites máximos permisibles en aguas residuales para uso agrícola establecidos por Vásquez (1996).

En la Figura 5 se muestran las concentraciones de metales pesados en agua residual proveniente de la Presa Manuel Ávila Camacho, la cual circula sobre el canal principal.

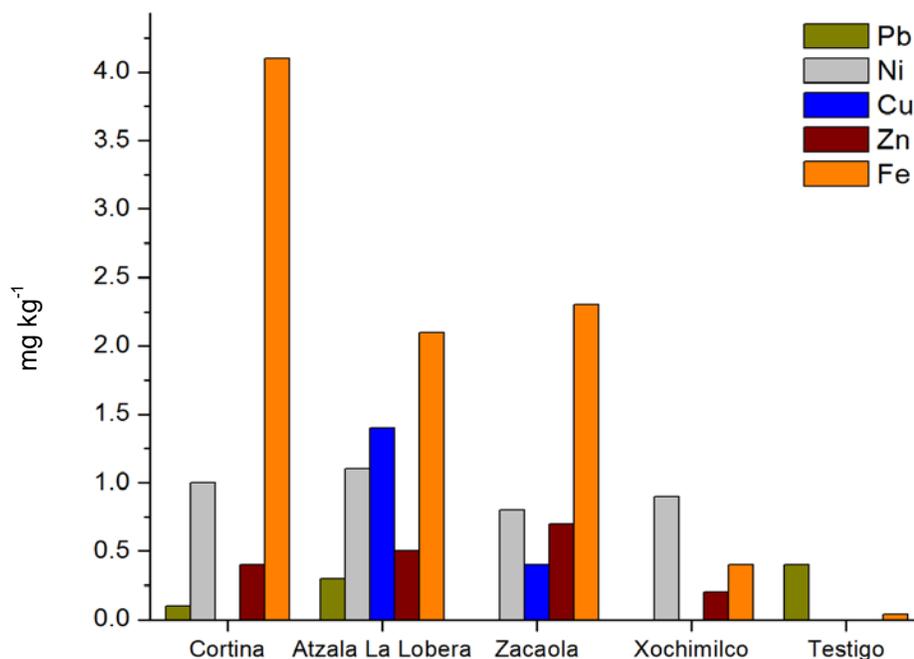


Figura 5. Concentración de metales pesados en agua residual que circula sobre el canal principal.

En el Cuadro 13 se muestran las concentraciones de metales pesados encontrados en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho

que circula sobre canales secundarios que abastecen de agua a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.

Cuadro 13. Concentración de metales pesados totales en agua residual que circula sobre los canales secundarios comparado con el testigo.

| Parámetros | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------------------------|------------------|---------------------|-----------|------------|----------------------------------|
| | Santa Ana Coapan | San Martín Caltenco | Tochtepec | La Soledad | Testigo Fco. Villa Rancho La Luz |
| Pb (mg L⁻¹) | ND | 0.7 | ND | 0.1 | 0.4 |
| Cd (mg L⁻¹) | ND | ND | ND | ND | ND |
| Ni (mg L⁻¹) | 0.7 | 0.9 | 0.7 | 1.3 | ND |
| Cu (mg L⁻¹) | 0.1 | ND | 0.1 | ND | ND |
| Zn (mg L⁻¹) | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | ND |
| Fe (mg L⁻¹) | 1.4 | 1.4 | 1.5 | 0.8 | 0.04 |

En el caso del plomo (Pb), la presencia de este metal se detectó en dos de los sitios muestreados (San Martín Caltenco y La Soledad) ubicados en los canales secundarios que abastecen de agua a los módulos uno, dos y tres, donde la concentración fue de 0.7 y 0.1 mg L⁻¹ respectivamente. La concentración detectada en el testigo se encuentra por debajo de la encontrada en la localidad de San Martín Caltenco, sin embargo tales concentraciones se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en el NOM-001-SEMARNAT-1996, y por lo establecido por Vásquez (1996).

De acuerdo con lo reportado por Sandoval *et al.*, (2009), las concentraciones de metales pesados encontradas en las aguas del río Atoyac se relacionan con las encontradas en el presente trabajo de investigación, debido a que el Cu, Pb, y Zn detectadas estuvieron por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, no obstante se considera conveniente identificar las fuentes de contaminación con Pb.

El cadmio (Cd) no se detectó en ninguno de los sitios muestreados.

La concentración de níquel (Ni) en el agua residual que circula sobre los canales secundarios oscila entre 0.7 y 1.3 mg L⁻¹, registrándose la concentración más baja en Tochtepec y Santa Ana Coapan, y la más alta en La Soledad, en el testigo no se detectó la presencia de éste metal. Según lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, estas concentraciones se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, por lo que se considera que no existe contaminación por níquel. Los datos de las concentraciones de Ni en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho son más altas que lo reportado por Vásquez *et al.*, (2001), en agua analizada en el Valle del Mezquital.

El cobre (Cu) se detectó en dos de los sitios muestreados que se localizan en los canales secundarios que abastecen de agua residual a los módulos uno, dos y tres, en la región de Tecamachalco. La concentración detectada fue de 0.1 mg L⁻¹ en las localidades de Santa Ana Coapan y Tochtepec, en el testigo no se detectó la presencia de éste metal. Estos valores se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996. Sandoval *et al.*, (2009) menciona que la concentración de Cu se encuentra dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la norma anteriormente mencionada, por lo que no representa un riesgo a la salud humana, dado que es uno de los micronutrientes esenciales y representa una fuente de abastecimiento para los cultivos.

Para el caso del zinc (Zn), en los cuatro sitios muestreados se detectó la presencia de este metal, a excepción del testigo. La concentración encontrada oscila entre 0.2 y 0.3 mg L⁻¹, la concentración más baja se registró en las localidades de San Martín Caltenco y Tochtepec, y la más alta en las localidades de Santa Ana Coapan y La Soledad, y de acuerdo con lo establecido por Vásquez (1996), estos valores se encuentran dentro de los límites máximos permisibles en aguas residuales para uso agrícola, al igual que lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Paredes *et al.*, (2001) reporta elevadas

concentraciones de este micronutriente, y a pesar de que es un elemento esencial para cultivos agrícolas.

El hierro (Fe) es el metal de mayor presencia en los sitios de muestreo, donde la concentración de Fe se encuentra entre 0.8 mg L^{-1} y 1.4 mg L^{-1} , presentándose la concentración más alta en la "Cortina", San Martín Caltenco y Tochtepec, y la más baja en La Soledad. La concentración de éste metal en el testigo fue de 0.04 mg L^{-1} , y está se encuentra muy por debajo de los valores detectados en el agua residual de los canales secundarios, tomando en cuenta que el agua del testigo es agua de pozo. Por lo anterior es importante mencionar que las concentraciones se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos por Vásquez (1996). Sandoval *et al.*, (2009) mencionan que el Fe está presente en al agua residual del río Atoyac, sin embargo se encuentra dentro de los límites máximos permisibles establecidos, lo cual se relaciona con los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación.

En la Figura 6 se muestran las concentraciones de metales pesados en agua residual proveniente de la Presa Manuel Ávila Camacho, la cual circula sobre los canales secundarios.

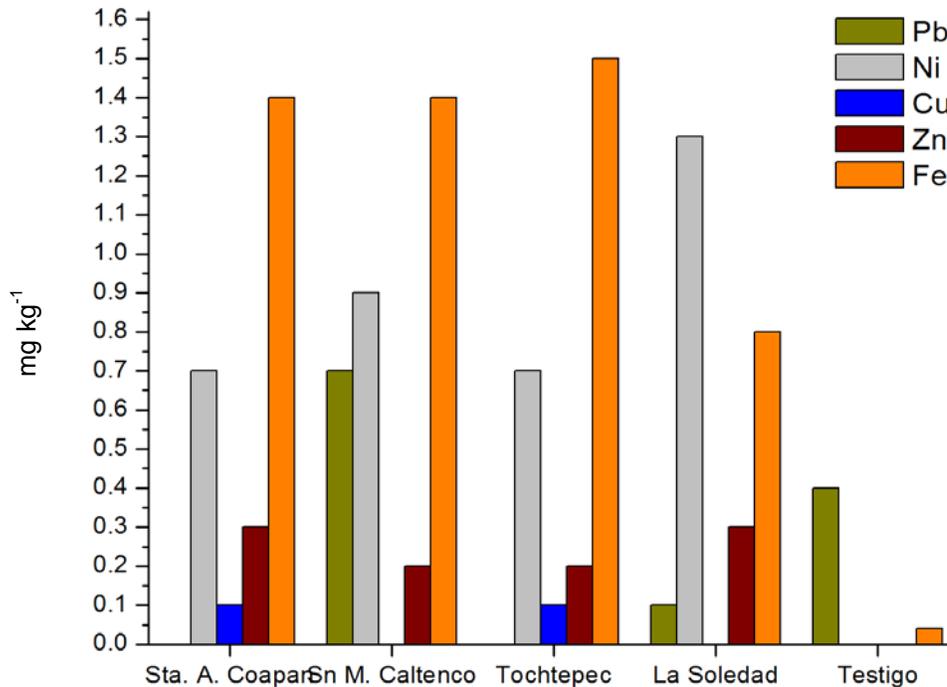


Figura 6. Concentración de metales pesados en agua residual que circula sobre los canales secundarios.

Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico entre la concentración de metales pesados totales presentes en el agua residual a la salida de la presa Manuel Ávila Camacho, con la concentración de metales encontrada en cada uno de los sitios de muestreo.

Se encontró que existe una correlación altamente significativa entre la concentración de metales pesados totales presentes a la salida de la presa, en la Cortina y los metales pesados encontrados en la localidad de Zacaola, siendo éstos únicamente níquel (Ni) y zinc (Zn) con una $P < 0.01$, lo cual quiere decir que la concentración de estos metales se mantuvo constante a lo largo de su recorrido sobre el canal principal que abastece a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 03^o Valsequillo.

En el Cuadro 14 se muestran el resultado obtenido del análisis estadístico realizado entre la concentración de metales pesados totales en el agua residual entre los sitios que se abastecen de agua de la presa Manuel Ávila Camacho que circula sobre canales secundarios.

Cuadro 14. Análisis de correlación de Pearson entre la Cortina y los sitios ubicados sobre canales secundarios

| Relaciones entre sitios | | Probabilidad |
|-------------------------|------------------|--------------|
| | | 0.01 |
| Cortina | Santa Ana Coapan | 0.964** |
| Cortina | Tochtepec | 0.973** |
| Santa Ana Coapan | Tochtepec | 0.997** |

**La correlación es significativa al nivel 0.01

De acuerdo con el análisis estadístico realizado, se demostró que existe una correlación altamente significativa entre micronutrientes (Cu y Zn) en el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, obteniendo correlaciones de 0.964 y 0.973 entre la Cortina y los sitios Santa Ana Coapan y Tochtepec, así como entre Santa Ana Coapan y Tochtepec, presentando una $P < 0.01$, lo cual puede deberse a que son los sitios menos alejados de la Cortina, por lo que la concentración de metales pesados se mantiene constante.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que el agua residual que circula sobre el canal principal y que abastece a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030, Valsequillo, contiene bajo contenido de sales no representa un riesgo para la irrigación de cultivos.

La concentración de metales pesados (Pb, Ni, Cu, Zn y Fe) en el agua proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, que circula sobre el canal principal y canales secundarios y que abastecen los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, se encuentran dentro de los límites máximos permisibles. La concentración de metales pesados (Pb, Ni, Cu, Zn y Fe) del agua residual de la presa Manuel Ávila Camacho, se encuentra por debajo de la concentración de metales pesados presentes en el testigo, a excepción del Fe.

El agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho que circula sobre los canales secundarios, contiene mayores concentraciones de metales pesados que el testigo, sin embargo se encuentran dentro de los límites máximos permisibles.

Se pudo observar que existe una correlación altamente significativa entre la concentración de metales pesados (Ni y Zn) presentes en la Cortina y en Zacaola. Existe una relación altamente significativa con respecto a la concentración de metales pesados presentes en el agua entre los sitios de muestreo más cercanos a la presa Manuel Ávila Camacho, como son Santa Ana Coapan y Tochtepec.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede responder a dos preguntas establecidas en el planteamiento del problema. La primera es que la concentración de metales pesados disminuye conforme aumenta su recorrido en el canal principal y canales secundarios, tal es el caso del Cu, Zn y Fe, para el caso del Pb y Ni, la concentración es variada.

La segunda es que el agua residual que se emplea para riego en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, ubicada en la región de Tecamachalco, contiene metales pesados, pero no exceden los límites máximos permisibles.

LITERATURA CITADA

Ayers R. S. y Westcot D. W. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO. Riego y Drenaje. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 174 pp.

Carrillo G. R., Cajuste L. J. y Hernández H. L. 1992. Acumulación de metales pesados en un suelo regado con aguas residuales. Terra 10: 166-173 p.

Navarro F. A. E. 2005. Contaminantes antropogénicos en las descargas de aguas residuales de Izúcar de Matamoros y Atlixco, Puebla. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 21: 28-34 p.

Duffus J. H. 2002. Heavy metals – a meaningless term. Pure Appl. Chem., 74: 793-807 p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2008. Estados Unidos Mexicanos. Sistema de Información Geográfica. Puebla, Puebla. México.

Jones B. J. and Wolf B. 1994. Manual soil testing procedure using modified. Morgan Extracting reagent. Benton laboratories INC, athens Georgia, U.S.A.

Méndez G. T., Rodríguez D. L. y Palacios M. S. 1996. Niveles de contaminación de las aguas del río Atoyac, Estado de Puebla, por metales pesados, boro, grasas y aceites. Terra 14: 137-148 p.

Méndez G. T., Rodríguez D. L. y Palacios M. S. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. Terra 18: 277-288 p.

Melo S. F. M., Márquez E. M. C., Juárez J. F. M., Martínez M. F. J., Miranda R. P., Esquivel R. L. F. 2002. Análisis de metales pesados en las aguas residuales del Río San Javier y Repercusión en la salud e impacto ambiental. Depto. de Química, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, I. P. N. México D. F.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Paredes R. S. R., Aguilar N. J. A. y Navarro Q. P. 2001. Determinación de metales pesados y sales solubles en suelos de cultivo acondicionados con lodos residuales. Conciencia Tecnológica. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. 16: 4-8.

Saldaña F. P, Alcocer Y. V. H, Lerdo de Tejada B. A., Gómez B. M. A. (2002). Calidad del agua en colectores de la Ciudad de Puebla y la aplicación de análisis de toxicidad. XXVIII Cong. Interam. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 27-31. Cancun, Mexico.

Sandoval V. A. M., Pulido F. G., Monks S., Martínez G. A. J. y Villegas V. E. C. 2009. Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del Río Atoyac, México. Interciencia. 12: 880-887.

Vásquez A. A. 1996. Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo. Segunda Edición. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Vázquez A. A., Lenom J. C., Siebe G. C., Alcántar G. G. y De la Isla B. M. L. 2001. Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Agrociencia 35: 267-274.

Weber J. and Karczewska A. 2004. Biogeochemical processes and the role of heavy metals in the soil environment. *Geoderma*, 122: 105-107 p.

CAPÍTULO II. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SUELO Y CULTIVOS REGADOS CON AGUA DE LA PRESA MANUEL ÁVILA CAMACHO

RESUMEN

La contaminación de los suelos y plantas por metales pesados (MP) se ha incrementado considerablemente, como consecuencia del riego con aguas residuales. En Puebla, los ríos Atoyac y Alseseca con alta carga de contaminación, son la fuente de abastecimiento de la presa Manuel Ávila Camacho y el agua que ahí se almacena es utilizada para el riego de cultivos de maíz y alfalfa en la región de Tecamachalco. El uso de aguas residuales para la irrigación de cultivos conlleva riesgo porque los MP pueden ser retenidos en el suelo, absorbidos por las plantas ó lixiviados a través de los perfiles hasta llegar a los mantos acuíferos ingresando de esta manera a las cadenas tróficas. Así el objetivo del presente estudio fue evaluar la concentración de MP disponibles en suelo y en cultivos de maíz y alfalfa regados con agua residual proveniente de la presa ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo. Se seleccionaron cinco sitios de muestreo, en cada sitio se realizó un muestreo de suelo a dos profundidades, 0-30 cm y 30-60 cm y se obtuvieron tres muestras de planta en cada sitio. Se analizaron metales pesados disponibles (Pb, Cd, Cu, Fe y Zn) en suelo y materia vegetal por espectrofotometría de absorción atómica. La metodología para el análisis correspondiente a suelo y materia vegetal, se basaron de acuerdo a lo establecido en Normas Oficiales Mexicanas como es la NOM-021-RECNAT-2000 y NMX-AA-051-SCFI-2001. Los resultados indican que los metales pesados disponibles en suelo se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en norma, y la concentración de metales pesados en planta se encuentran dentro de límites máximos permisibles establecidos por Kabata-Pendias (2004), a excepción del plomo.

Palabras clave: contaminación, metales pesados, suelo, planta.

ABSTRACT

The soil and plants pollution by heavy metals (HM) have been increase considerably, this is by residual water irrigation. In Puebla, the rivers Atoyac and Alseseca with high pollution charge are the principal sources for the Manuel Ávila Camacho dike and then water storage by itself is employed to irrigate corn and alfalfa farming in Tecamacalco region. The risk for irrigation by residual water is that the HM can be deposited on the soil and then been absorbed for plants or leach until arrives to aquifer entering food chain. For this reason the goal in this work was to evaluate the available concentration of HM in soil, corn and alfalfa farming that were irrigate with residual water in coming of dike, the farming are in modulate one of 030 Valsequillo irrigation district . There were five different places to take samples in two depths (0 to 30 and 30 to 60cm), obtaining three samples of every plan in very place. It was made an analysis for available HM (Pb, Cd, Cu, Fe y Zn) in soil and vegetable material by atomic absorption spectrophotometry, according to Mexican Official Standard like NOM-021-RECNAT-2000 and NMX-AA-051-SCFI-2001. It was found that the HM deposed in soil are according to the maximum limits established in standard and the concentration of heavy metals in plant are inside permissible maximum limits settled down for Kabata-Pendias (2004) to exception of the lead.

Key words: pollution, heavy metals, soil, plant.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los suelos por metales pesados se ha incrementado considerablemente, como consecuencia del uso intensivo de aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas (Méndez *et al.*, 2000). La distribución de metales pesados en los perfiles de los suelos, así como su disponibilidad, está controlada por parámetros como las propiedades intrínsecas del metal y las características de los suelos.

Uno de los principales problemas que ocasiona el uso de agua residual para riego sin ningún tratamiento previo, es que se convierten en una fuente potencial de contaminación de suelos por metales pesados (Colombo *et al.*, 1999).

Los metales no esenciales tales como el plomo (Pb), cadmio (Cd) y níquel (Ni), al acumularse en el suelo y en el agua retenida en él, se incorporan a la planta por medio de su absorción en el intercambio de cationes; debido a lo anterior se pueden originar efectos tóxicos no sólo en las plantas sino que se pueden transferir al hombre por el consumo de éstas, y acumularse en el organismo provocando serios problemas (Lucho *et al.*, 2005).

Los metales pesados son peligrosos porque tienden a bioacumularse en diferentes cultivos. La bioacumulación significa un aumento en la concentración de un producto químico en un organismo vivo en un cierto plazo de tiempo, comparada a la concentración de dicho producto químico en el ambiente (Angelova *et al.*, 2004).

Se consideran entre los metales pesados elementos como el plomo (Pb), cadmio (Cd), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn) y hierro (Fe), los que constituyen un grupo de gran importancia, ya que algunos de ellos son esenciales para las plantas, pero en altas concentraciones pueden resultar tóxicos para los seres vivos, organismos del suelo, plantas y animales, incluido el hombre (Spain *et al.*, 2003).

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento de los metales desde la solución del suelo a la raíz de la planta (Prieto *et al.*, 2009). En plantas, el concepto de bioacumulación se refiere a la agregación de contaminantes; algunos de ellos son más susceptibles a ser fitodisponibles que otros (Kabata-Pendias, 2004).

Los metales no esenciales como; el plomo (Pb) representa una amenaza ambiental, y exhibe un alto potencial de toxicidad para las plantas, animales y humanos, los constituyentes del suelo reaccionan con él, reduciendo significativamente su solubilidad a niveles de pH 5.5 o mayores. En el caso del cadmio (Cd) su movilidad en suelos es insignificante por su baja concentración; cuando se aplican herbicidas y fungicidas en los cultivos, se hace presente su solubilización en las aguas internas, para el caso del níquel (Ni) su relación con el nitrógeno no es esencial para el crecimiento de las plantas, y su alta solubilidad hace difícil su acumulación (Prieto *et al.*, 2009).

Mahler (2003) menciona que el zinc (Zn) es uno de los micronutrientes que puede encontrarse en forma natural en el suelo, y es un nutriente requerido por las plantas para su desarrollo. El cobre (Cu) y el hierro (Fe) son uno de los micronutrientes esenciales para los cultivos, ya que son requeridos en pequeñas cantidades y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital, y pasado cierto umbral se vuelven tóxicos (Prieto *et al.*, 2009).

Algunos metales pesados como el Pb, Cd, Ni, Cu, Zn y Fe pueden causar efectos agudos y crónicos en el ser humano. Los efectos agudos ocurren dentro de unas horas o días posteriores al momento en que la persona consume un contaminante, y los efectos crónicos ocurren después que las personas consumen un contaminante a niveles sobre los estándares de seguridad durante muchos años (Lucho *et al.*, 2005).

Algunos de los efectos negativos que causa la ingestión de agua ó alimentos contaminados son; cáncer, problemas del hígado o riñones, dificultades en la reproducción, hemorragias, etc (EPA, 2007).

Por lo anterior es importante determinar la concentración de metales pesados en el suelo y cultivos de maíz y alfalfa ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, en la región de Tecamachalco, debido a que esta zona depende del uso de agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, que circula sobre el canal principal y canales secundarios que abastecen a esta región para su uso en la irrigación de cultivos. El agua que se almacena en la presa Manuel Ávila Camacho proviene de los escurrimientos de los ríos Atoyac y Alseseca, y es utilizada para riego de 35 000 has (INEGI, 2008).

Es importante mencionar que los cultivos de mayor relevancia en la zona de estudio son maíz y alfalfa, por lo cual estos cultivos fueron seleccionados para ser analizados, y de esta manera comprobar si existen elevadas concentraciones de metales pesados en el suelo y planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de metales pesados en suelo

Los metales pesados analizados en suelo de los cinco sitios de muestreo fueron plomo, níquel, cadmio, cobre zinc y hierro, basándose en la norma NOM-021-RECNAT-2000, basándose en el método AS-14 utilizado para la determinación de micronutrientes y metales contaminantes en el suelo. Además del uso de metodologías para determinar pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, textura, calcio y magnesio.

Muestreo de suelo

Se delimitó la zona de estudio a manera de que fuera representativo los cinco sitios de muestreo seleccionados los cuales hacen uso del agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho. Los sitios de estudio se seleccionaron tomando en cuenta el tipo de cultivo, el tiempo de establecido así como el tipo de suelo.

Los suelos de la zona de estudio se caracterizan por ser franco arcillo arenosos, en el caso de Santa Ana Coapan y San Martín Caltenco, también de arena francosa como es el caso de Tochtepec y arcillo limosa en La Soledad. Los suelos francos están definido por una mezcla de arena, limo y arcilla, y son los más importantes desde el punto de vista agrícola, ya que son suelos fácilmente laborables (Navarro y Navarro, 2003).

El muestreo se realizó en zig-zag tomando 10 submuestras, obteniendo finalmente una muestra compuesta. Los sitios seleccionados son: 1) Santa Ana Coapan 2) San Martín Caltenco 3) Tochtepec 4) La Soledad 5) Testigo (ubicado en Rancho Francisco Villa). En las Figuras 7 y 8 se muestra su ubicación.

El muestreo de suelo se realizó durante las fechas que se muestran en el Cuadro 15.

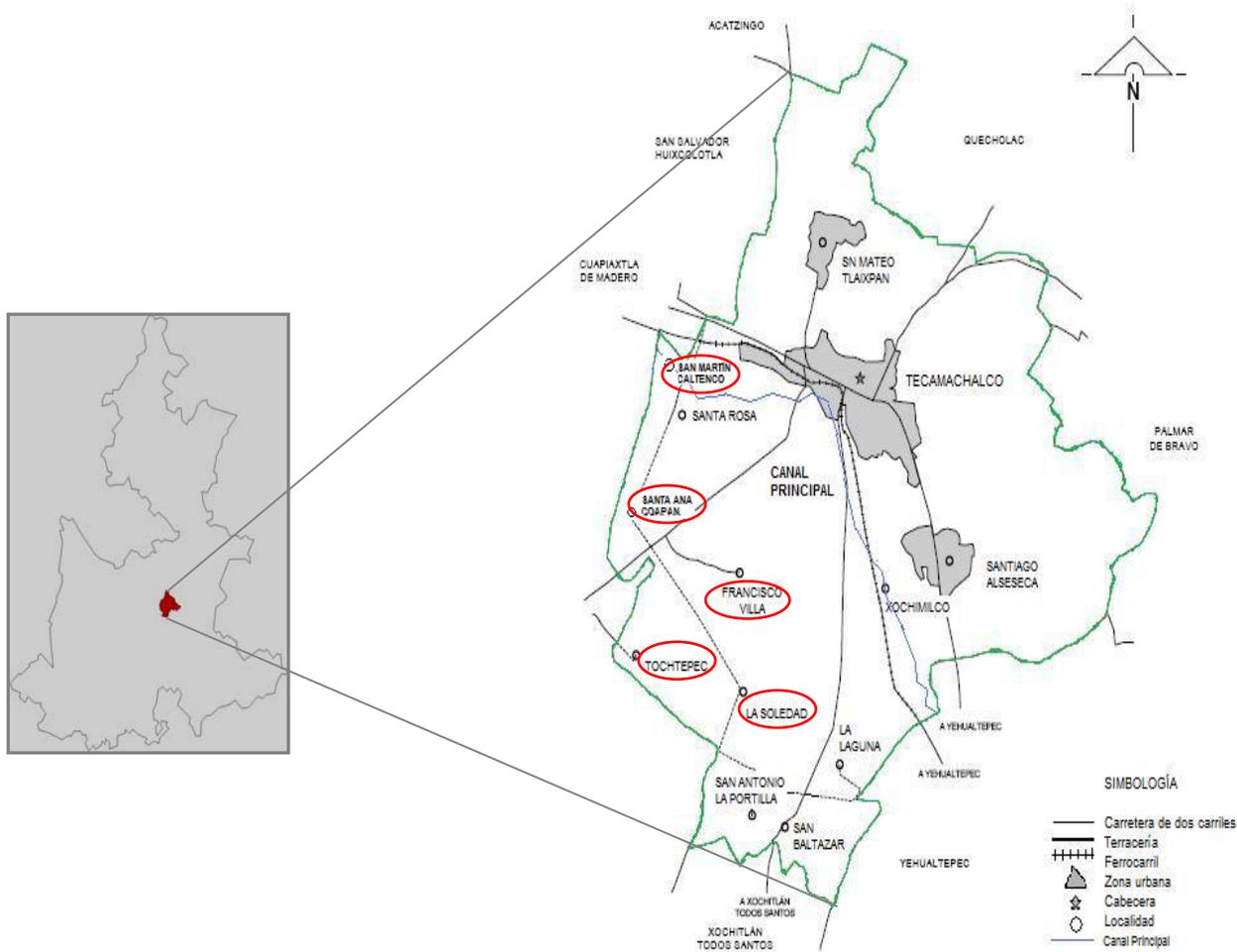


Figura 7. Ubicación de la zona de estudio de suelo y planta

Cuadro 15. Fechas de muestreo de suelo.

| Primer periodo de muestreo | | | Segundo periodo de muestreo | | |
|----------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Fecha | Sistema de producción | Sitio | Fecha | Sistema de producción | Sitio |
| 23-Abril-2009 | Alfalfa | Santa Ana Coapan | 18-Agosto-2009 | Alfalfa | Santa Ana Coapan |
| 23-Abril-2009 | Maíz | San Martín Caltenco | 18-Agosto-2009 | Maíz | San Martín Caltenco |
| 29-Mayo-2009 | Maíz | Tochtepec | 18-Agosto-2009 | Maíz | Tochtepec |
| 29-Mayo-2009 | Maíz | La Soledad | 18-Agosto-2009 | Maíz | La Soledad |
| 29-Mayo-2009 | Maíz | Testigo (Francisco Villa) | 25-Agosto-2009 | Maíz | Testigo (Francisco Villa) |

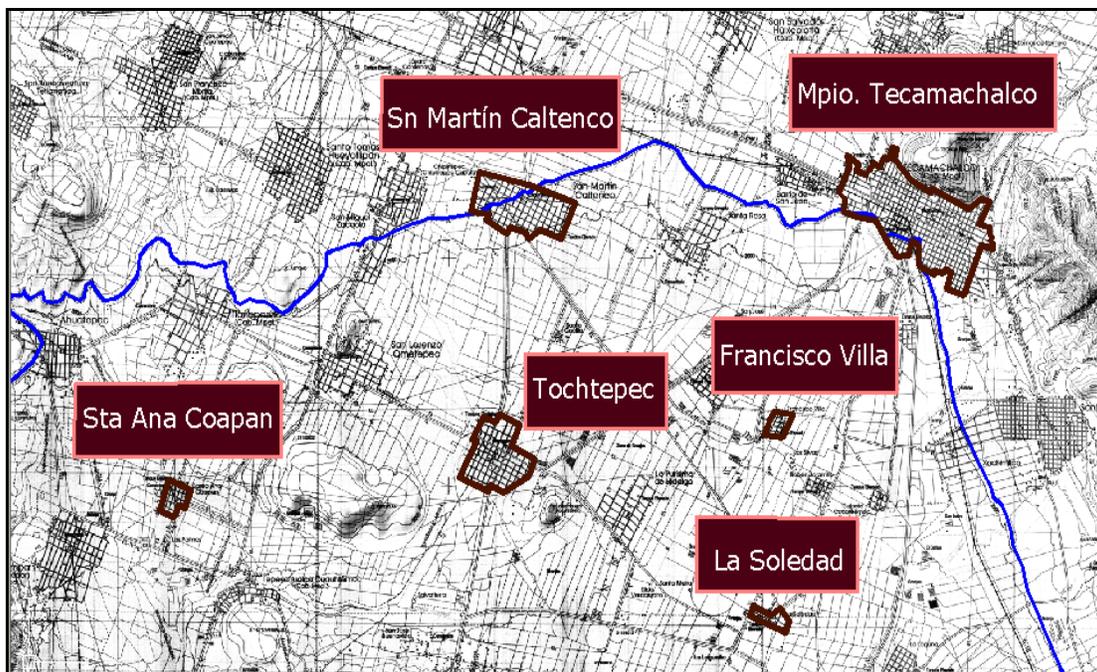


Figura 8. Sistemas de producción donde se muestreo suelo y planta.

Descripción del muestreo

El muestreo realizado en cada uno de los sitios seleccionados, se realizó por el método en zig-zag (Velasco y Martínez, 1985), obteniendo un total de 10 muestras simples en cada uno de los sitios a dos diferentes profundidades 0-30 cm y 30-60 cm. Una vez tomadas las muestras simples se obtuvieron muestras compuestas (utilizando el método del cuarteo) de cada uno de los sitios de estudio, colocándose en bolsas de plástico con capacidad de un kilogramo cada una, para posteriormente ser analizadas en laboratorio.

Las muestras de suelo obtenidas se llevaron a laboratorio ubicado en el Departamento de Investigación de Ciencias Agrícolas, ICUAP-BUAP, donde se secaron a temperatura ambiente extendiéndose sobre papel, por aproximadamente dos días. Una vez secas las muestras se hicieron pasar por un tamiz del número 10 (2 mm), posteriormente se iniciaron los análisis correspondientes para determinar pH, C.E., textura, materia orgánica, Ca^{++} y Mg^{++} , así como la concentración de metales pesados en suelo.

Metodología empleada para el análisis físico y químico de suelo

Textura. Con base en lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000, se realizaron las determinaciones de textura de cada una de las muestras de suelo obtenidas. Se pesaron 70 g de suelo y se colocaron en un frasco de vidrio de boca ancha, se adicionaron 40 ml de agua oxigenada diluida al 6% y las muestras se llevaron a sequedad a una temperatura de 80 °C por 24 hr. Posteriormente se colocaron 50 g de suelo seco en un digestor por 10 min, agregando 10 ml de oxalato de sodio y 10 ml de metasilicato de sodio. Finalmente se colocó la muestra en una probeta para determinación de textura la cual se aforó con agua destilada. Se tomó la primera lectura inmediatamente y a las 2 hr la segunda lectura, con la ayuda de un triángulo de texturas se determinó la textura de cada muestra.

pH. La determinación del potencial hidrógeno se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000. Se colocaron 10 g de suelo seco previamente tamizado (No.10; 2mm) en un frasco de vidrio con tapa, y se adicionaron 20 ml de agua destilada. La muestra se lleva a un agitador mecánico por 30 min. Se calibró el dispositivo de determinación del pH con solución buffer pH7. Posteriormente se tomó la lectura de las muestras de suelo.

C.E. La determinación de la conductividad electrolítica se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000. Se pesaron 200 g de muestra de suelo la cual se coloca en un recipiente de plástico, y se agregó agua destilada mezclando con una espátula hasta alcanzar un punto aproximado de saturación, y la muestra se dejó reposar por 24 hrs. Posteriormente la muestra se colocó en una bomba de vacío, y del extracto obtenido se tomó la muestra. Los resultados se reportan en dS m^{-1} .

Materia orgánica. La determinación de materia orgánica se realizó con base en lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000. Se pesaron 0.5 g de suelo y se colocaron en un matraz erlenmeyer de 250 ml, posteriormente se adicionan 5 ml de dicromato de potasio 1N y 10 ml de ácido sulfúrico y se deja reposar 30 min.

Finalmente se adicionaron 100 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico, 5 gotas de difenilamina y se titulan las muestras con sulfato ferroso 0.5 N. Finalmente se realizan los cálculos correspondientes para determinar el porcentaje de materia orgánica en suelo.

Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺. La determinación de calcio y magnesio se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000. Se pesaron 10 g de muestra y se agregaron 10 ml de solución buffer pH10, 5 gotas de cloruro de potasio al 2%, 5 gotas de clorhidrato de hidroxilamina, 5 gotas de negro de ericromo y finalmente se titula con EDTA. Posteriormente se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el contenido de calcio y magnesio en las muestras de suelo.

Metodología empleada para el análisis metales pesados.

La determinación de la concentración de metales pesados disponibles en suelo se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000. Se pesaron 10 g de suelo seco previamente tamizado (No.10; 2 mm), posteriormente la muestra se colocó en un matraz erlenmeyer de 125 ml y se adicionaron 20 ml de solución DTPA (ácido del dietilen-triamino-pentaacético) 0.005 molar (M), luego se tapó el matraz y se llevó a un agitador mecánico por 2 hr a 120 oscilaciones/min. Transcurrido el tiempo, se filtró la muestra con papel whatman No. 42. y se almacenó en recipientes de polietileno de 100 ml de capacidad, hasta su análisis por espectrofotometría de absorción atómica (VARIAN55B modelo AA0909M022). Se utilizaron estándares de 5 mg L⁻¹, 10 mg L⁻¹ y 20 mg L⁻¹ de cada elemento.

Análisis de materia vegetal

Los sistemas de producción que se seleccionaron fueron maíz y alfalfa, a los cuales se determinó la concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe y Zn). Los cultivos de maíz y alfalfa fueron seleccionados debido a que son los de mayor trascendencia en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.

De acuerdo con los datos de INEGI (2008), el sector primario es una de las actividades económicas más importantes de la zona de estudio, debido a que abarca el 48.7% de las actividades totales que se llevan a cabo. La agricultura abarca el 38.6% de la superficie total y los cultivos más importantes de la región son maíz, frijol, alfalfa, manzana y aguacate (INEGI, 2008).

Muestreo de planta

El muestreo de planta se realizó en cada uno de los cinco sistemas de producción durante el mes de Agosto del 2009. En el Cuadro 16 se muestran las fechas de muestreo. El único sistema en donde se muestreo alfalfa fue en Santa Ana Coapan, y las muestras de maíz corresponden a San Martín Caltenco, Tochtepec, La Soledad y el Testigo (Francisco Villa). El muestreo se realizó una vez que se realizaron los tres riegos, es decir cuando la planta de maíz alcanzó la etapa fenológica de llenado de grano.

Cuadro 16. Fechas de muestreo de planta

| Fecha | Sistema de producción | Sitio |
|----------------|------------------------------|---------------------------|
| 18-Agosto-2009 | Alfalfa | Santa Ana Coapan |
| 18-Agosto-2009 | Maíz | San Martín Caltenco |
| 18-Agosto-2009 | Maíz | Tochtepec |
| 18-Agosto-2009 | Maíz | La Soledad |
| 25-Agosto-2009 | Maíz | Testigo (Francisco Villa) |

Las muestras que se tomaron fueron de las parcelas previamente seleccionadas, las cuales fueron regadas con aguas residuales del canal principal que abastece a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo. En la localidad de Santa Ana Coapan se tomaron tres muestras de planta, seleccionándolas al azar a lo largo y ancho de la parcela. La muestra del cultivo de alfalfa se realizó una vez que se realizaron los tres riegos en la zona de estudio.

Una de las consideraciones para realizar el muestreo es que la planta presentara una altura aproximada a 30 cm, tomando cada una de las muestras desde la raíz de la planta, debido a que el análisis de materia vegetal, para el caso de alfalfa, contempla hoja, tallo y raíz.

Para el caso de maíz se seleccionaron los sistemas de producción que son regados con agua proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho y uno que sirve como Testigo ubicado en Rancho La Luz, parcela que es regada con agua de pozo. Se tomaron tres muestras de planta al azar en cada uno de los sitios, las plantas seleccionadas presentaron una altura total que varía entre 2 y 3 m de alto.

Manejo de la muestra

Las muestras de maíz y alfalfa fueron colocadas en bolsas de papel estraza y previamente rotuladas. Las muestras de maíz fueron particionadas con la finalidad de determinar la concentración de metales pesados en cada parte de la planta, como es la hoja de la milpa, la hoja del fruto, fruto, tallo y raíz, y para el caso de la alfalfa se determinó la concentración de metales pesados en la hoja, tallo y raíz. Posteriormente las muestras de materia vegetal se lavaron con agua destilada y se colocaron en papel para el secado inicial a temperatura ambiente, con la finalidad de remover el agua superficial y en seguida el secado en la estufa a 80 °C. El tiempo de secado varía entre 24 y 48 hrs (Alcántar y Sandoval, 1999).

Molienda

Antes del análisis es común moler el material ya seco, en parte porque el manejo de la muestra es más fácil, y además para lograr una mayor homogeneidad en su composición. Para la molienda de las muestras se selecciono el Molino Wiley (de cuchillas) utilizando un tamiz de 1 mm de abertura, la molienda es continua hasta que la muestra atraviesa el tamiz (Alcántar y Sandoval, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas de los suelos

En el Cuadro 17 se muestra la textura de los suelos en los cinco sitios de muestreo seleccionados.

Cuadro 17. Textura de los suelos estudiados

| Sitio | Arena % | Limo % | Arcilla % | Textura |
|-------------------------|---------|--------|-----------|------------------------|
| Santa Ana Coapan | 53.12 | 22 | 24.88 | Franco arcillo arenosa |
| San Martín Caltenco | 55.12 | 22 | 22.88 | Franco arcillo arenosa |
| Tochtepec | 81.12 | 12 | 6.88 | Arena francosa |
| La Soledad | 13.12 | 40 | 46.88 | Arcillo limosa |
| Testigo (Rancho La Luz) | 67.12 | 19 | 13.88 | Franco arenosa |

Fuente. Análisis de laboratorio

De acuerdo a los datos obtenidos, Santa Ana Coapan y San Martín Caltenco una clase; franco arcillo arenosa. Para el caso de Tochtepec la fracción de arena obtenida fue de 81.12%, la fracción de limo corresponde a 12% y de arcilla a 6.88%, por lo que se encuentra dentro de la clasificación arena francosa. La localidad de La Soledad se encuentra en la clasificación arcillo limosa, debido a que la fracción de arena fue de 13.12%, la fracción de limo corresponde a 40% y la de arcilla a 46.88%.

Finalmente en el Rancho La Luz se obtuvo una textura de tipo franco arenosa, según lo establecido por la norma anteriormente mencionada, ya que se obtuvo una fracción de 67.12% de arena, 19% de limo y una fracción de 13.88% de arcilla.

Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo de los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo regados con agua proveniente de la presa Manuel Ávila

Camacho, la cual es distribuida sobre el canal principal y abastece los sistemas de producción seleccionados se presentan en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Propiedades químicas de los sistemas de producción estudiados.

| Parámetros | Sistemas de producción | | | | |
|---|------------------------|------------------------|-----------|---------------|----------------------------|
| | Santa Ana Coapan | San Martín Caltenco | Tochtepec | La Soledad | Testigo (Rancho La Luz) |
| pH | 7.5 | 7.7 | 7.6 | 7.85 | 7.5 |
| C.E. (dS m ⁻¹) | 1.11 | 0.99 | 0.99 | 0.85 | 1.11 |
| M. O. (%) | 1.53 | 1.24 | 0.7 | 0.42 | 2.0 |
| Ca ⁺⁺ (Cmol kg ⁻¹) | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.03 | 0.24 |
| Mg ⁺⁺ (Cmol kg ⁻¹) | 0.02 | 0.09 | 0.03 | 0.05 | 0.03 |

Fuente. Análisis de laboratorio

En el Cuadro 19 se muestran los límites máximos permisibles de parámetros químicos en suelo establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000.

Cuadro 19. Límites máximos permisibles de propiedades químicas en suelo

| LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES | | | | | |
|---|--|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Parámetros | NOM-021-RECNAT-2000 | | | | |
| pH | Fuertemente ácido (<5) | Moderadamente Ácido (5.1-6.5) | Neutro (6.6-7.3) | Medianamente Alcalino (7.4-8.5) | Fuertemente Alcalino (>8.5) |
| C.E. (dS m ⁻¹) | Efectos despreciables de salinidad (<1.0) | Ligeramente Salino (1.1-2.0) | Moderadamente Salino (2.1-4.0) | Suelo salino (4.1-8.0) | Fuertemente Salino (8.1-16.0) |
| M. O. (%) | Muy bajo (<0.5) | Bajo (0.6-1.5) | Medio (1.6-3.5) | Alto (3.6-6.0) | >6.0 |
| Ca ⁺⁺ (Cmol kg ⁻¹) | Muy baja (<2) | Baja (2.0-5.0) | Media (5.0-10.0) | Alta >10.0 | - |
| Mg ⁺⁺ (Cmol kg ⁻¹) | Muy baja (<0.5) | Baja (0.5-1.3) | Media (1.3-3.0) | Alta >3.0 | - |

Los valores de pH en suelo varían de 7.5 como es el caso de Santa Ana Coapan y Rancho La Luz y 7.85 valor encontrado en La Soledad. De acuerdo con la norma NOM-021-RECNAT-2000 los resultados indican que los suelos son medianamente alcalinos. De acuerdo con lo que establece Cajuste *et al.*, 1991; se encontraron valores similares en un estudio realizado en el Valle del Mezquital, deduciendo que el pH medianamente alcalino tanto en el agua como en el suelo, favorece la

precipitación de los metales pesados quedando inmóviles, pero siguen representando cierto riesgo en el suelo, ya que si el pH del suelo disminuye, los metales pueden quedar disponibles para las plantas. Por otra parte Méndez *et al.*, (2003) reporta un pH alcalino el cual oscila entre 7.2 y 8.1 para suelos regados con aguas residuales en Valencia, España.

Siebe (1994) menciona que el pH medianamente alcalino tanto en agua como en suelo favorece la lixiviación de metales pesados quedando inmóviles, pero siguen representando cierto riesgo en el suelo, ya que si el pH del suelo disminuye, los metales pueden quedar disponibles para las plantas.

Los resultados obtenidos referentes a la conductividad eléctrica en los cinco sitios de muestreo, reflejaron valores que varían de 0.85 dS m⁻¹ a 1.11 dS m⁻¹, lo que indica que estos suelos son ligeramente salinos a excepción de La Soledad, suelos que muestran efectos despreciables de salinidad según lo establecido en la NOM-021-REC/NAT-2000. En las Figuras 9 y 10 se muestran los valores obtenidos de pH y conductividad eléctrica.

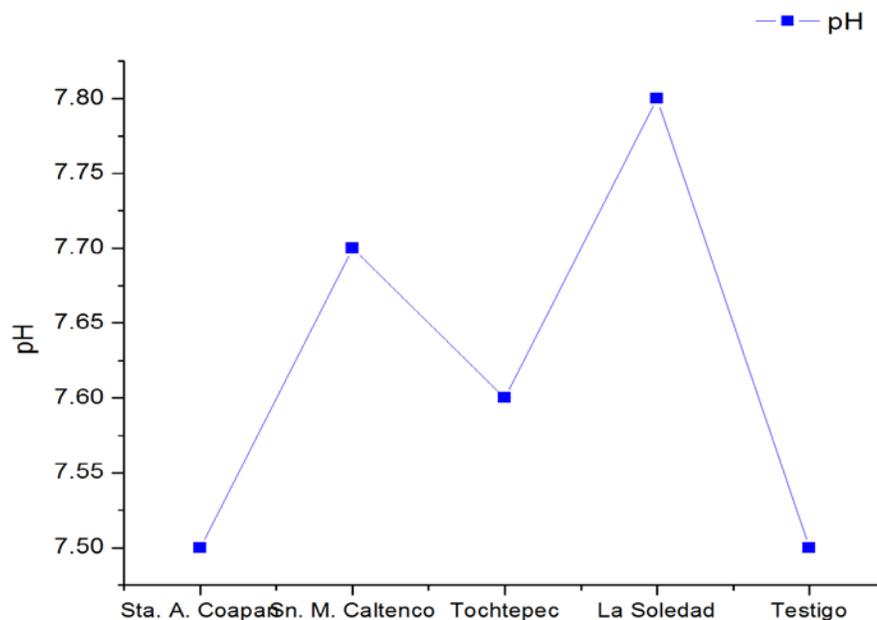


Figura 9. pH en los sistemas de producción

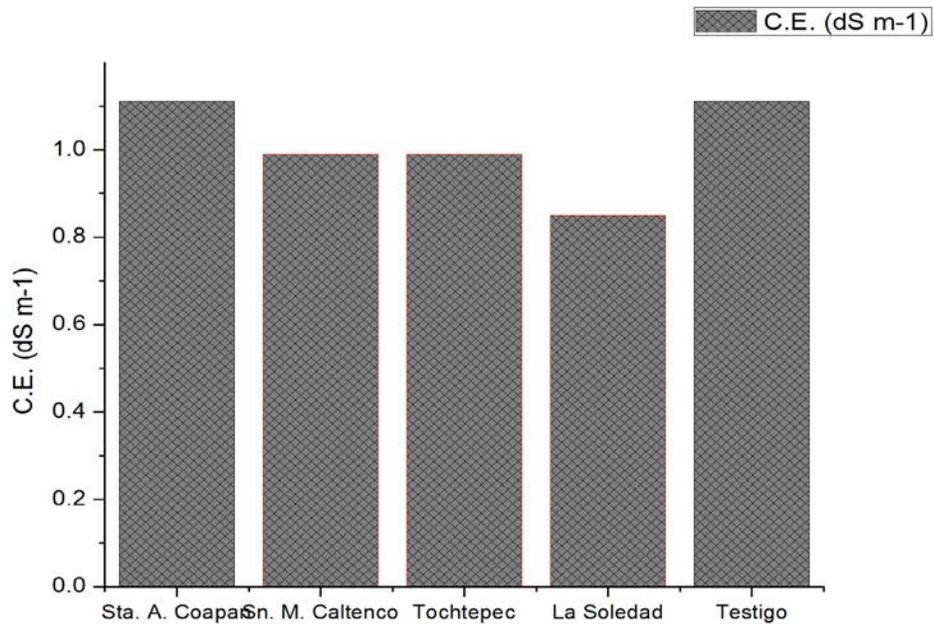


Figura 10. Conductividad eléctrica en los sistemas de producción

El porcentaje de materia orgánica varía entre 0.42% y 2.0%. Según lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000, la clasificación del contenido de materia orgánica se encuentra dentro de la clasificación media a baja para suelos no volcánicos.

El contenido de materia orgánica más bajo se registra en la localidad de La Soledad con 0.42% y el más alto se registra en el Rancho La Luz con 2.0%. Esto se debe a la aplicación de estiércol en los suelos, debido a que es un rancho de producción de leche. Pérez *et al.*, (2008) menciona que tales valores pueden deberse a la aplicación de abono orgánico, lo cual evita problemas de salinidad en suelo y proporciona nutrientes a los cultivos.

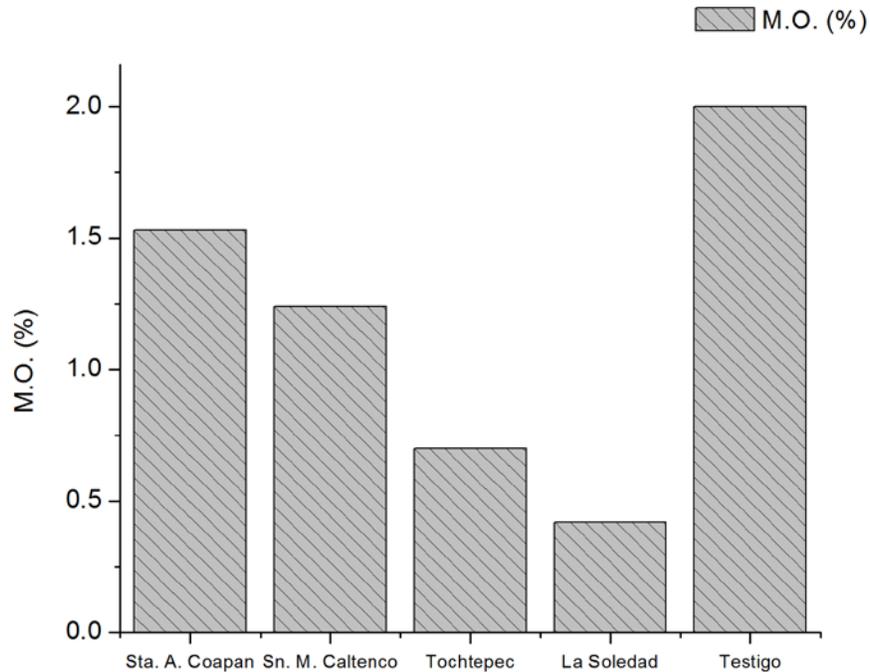


Figura 11. Materia orgánica en los sistemas de producción

En la Figura 11 se muestra gráficamente los porcentajes de materia orgánica registrados en los cinco sitios de muestreo.

El contenido de Ca^{++} en suelos en los cinco sistemas de producción presenta valores que oscilan de 0.03 a 0.024 Cmol kg^{-1} valores que se encuentran dentro de la clasificación muy baja según lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000. Méndez *et al.*, (2008) reporta valores de 5 a 10 Cmol kg^{-1} que corresponden a valores medios y altos, sin embargo mencionan que son adecuados para el desarrollo de cultivos agrícolas.

Según lo establecido por Cajuste (1977), el calcio es el catión más abundante alrededor del complejo de intercambio del suelo, por lo tanto sufre menos el proceso de lixiviación en el suelo y tiende a acumularse. Por lo anterior se deduce que los suelos regados con aguas residuales provenientes de la presa Manuel

Ávila Camacho no están acumulando calcio por lo que se descarta problemas de salinidad.

En lo que corresponde a magnesio (Mg), se registraron valores que van de 0.02 a 0.09 Cmol kg⁻¹ valores que al ser comparados con la NOM-021-RECNAT-2000 se encuentran dentro de la clasificación muy baja que establece la norma. Méndez *et al.*, (2008) reporta valores de magnesio (3.0 a 4.16 Cmol kg⁻¹), que fluctúan entre valores medios y altos, y menciona que los valores detectados de estas variables corresponden a los de un suelo forestal; sin embargo se consideran adecuados para el desarrollo normal de especies agrícolas.

El magnesio (Mg) después del calcio es el catión más abundante en la mayoría de los suelos, por lo que puede considerarse que los suelos de los cinco sitios analizados no contribuyen en problemas de salinidad por Mg.

Contenido de metales pesados disponibles en suelo

Los procedimientos analíticos tendientes a evaluar la disponibilidad de algún metal fundamentalmente se asocian a su capacidad para extraer alguna forma química del metal presente en el suelo, tal es el caso del DTPA (ácido del dietilen-triamino-pentaacético) el cual es usado por varios autores, como Méndez *et al.*, (2000), Pérez *et al.*, (2008) y Montenegro *et al.*, (2009), ya que permite recuperar elementos metálicos que se encuentran en forma intercambiable.

En el Cuadro 20 se presentan los resultados obtenidos de metales pesados contaminantes disponibles en el suelo a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm), en cada uno de los sistemas de producción muestreados, así como los límites máximos permisibles de referencia en la NOM-021-RECNAT-2000 y lo establecido por Kabata-Pendias (2004).

Cuadro 20. Concentración promedio de metales contaminantes disponibles en el suelo a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm) y su comparación con la Norma Oficial Mexicana y Kabata-Pendias (2004).

| Metal (mg kg ⁻¹) | Santa Ana Coapan | San Martín Caltenco | Tochtepec | La Soledad | Testigo | Kabata-Pendias (2004) | | NOM-021-RECNAT-2000 | |
|---------------------------------|------------------|------------------------|-----------|------------|---------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | | | | | | Marginal | Peligroso | Normal | Peligroso |
| | | | | | | (mg kg ⁻¹) | | (mg kg ⁻¹) | |
| Pb 0-30 cm | 1.25 | 1.5 | 0.95 | ND | 1.1 | 20 | 100 – 500 | 35 | 100 - 300 |
| Pb 30-60 cm | 1.2 | ND | 0.85 | ND | 1.05 | | | | |
| Cd 0-30 cm | ND | ND | ND | ND | ND | 0.06 - 1.1 | 1.1 - 5 | 0.35 | 3 - 5 |
| Cd 30-60 cm | ND | ND | ND | ND | ND | | | | |
| Ni 0-30 cm | ND | 10.7 | ND | 8.5 | ND | 4 – 15 | >15 | 50 | 100 |
| Ni 30-60 cm | ND | 9.4 | ND | 8.1 | ND | | | | |

ND: No detectado por espectrofotometría de absorción atómica.

El contenido de plomo (Pb) en suelos a una profundidad de 0-30 cm se encuentra entre 0.95 y 1.5 mg kg⁻¹ y a una profundidad de 30-60 cm de 0.85 y 1.2 mg kg⁻¹. La determinación en ambas profundidades se realizó con la finalidad de determinar si la concentración de Pb aumenta a medida que incrementa la profundidad del suelo, sin embargo los resultados obtenidos reflejan que la concentración de Pb es similar en ambas profundidades.

Ramos *et al.* (2001) reportan la presencia de metales pesados en suelos de chinampa de la zona de Tláhuac en la secuencia siguiente; Pb, Ni, Zn, Cu, Cr y Cd, y concluyen que los metales pesados tienden a concentrarse en la parte superficial del suelo.

También analizando los dos sistemas de producción (alfalfa y maíz) se puede observar que en la localidad de Santa Ana Coapan donde se siembra alfalfa, y en las localidades de San Martín Caltenco, Tochtepec y La Soledad lugares donde se siembra maíz, se registraron concentraciones que oscilan entre 1.25 mg kg⁻¹ y 1.2

mg kg⁻¹ para el caso de la alfalfa y de 0.85 mg kg⁻¹ y 1.5 mg kg⁻¹, para el caso de maíz en ambas profundidades, por lo que se puede concluir que la concentración de Pb en los dos sistemas de producción es similar a las profundidades de 0-30 cm y 30-60 cm. Por otra parte es importante mencionar que las concentraciones de Pb en los dos sistemas de producción estudiados (maíz y alfalfa) son similares a las concentraciones de Pb encontradas en el testigo Rancho La Luz (maíz).

Las concentraciones de Pb en el presente trabajo de investigación se encuentran por debajo de las concentraciones reportadas por Méndez *et al.*, (2003) en suelos de cultivo regados por la Acequia de Favara en la Huerta de Valencia en Venezuela.

Los resultados encontrados en el presente trabajo se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana y también por lo establecido por Kabata-Pendias (2004) en ambas profundidades.

En general, los valores de Pb fueron inferiores a los encontrados en suelos de Chinampa en México, suelos que son regados con aguas residuales sin ningún tratamiento previo (Ramos *et al.*, 2001). Por lo anterior se deduce que la concentración de plomo en los cinco sitios de muestreo se encuentra dentro de la clasificación marginal establecido por Kabata-Pendias (2004) y normal según lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000.

Para el caso de cadmio, es importante mencionar que en ninguno de los cinco sitios de muestreo se detectó la presencia de dicho metal.

El níquel (Ni) solo fue detectado en dos de los cinco sistemas; San Martín Caltenco y La Soledad, donde se siembra maíz. En ambos sistemas las concentraciones encontradas a las dos profundidades son muy similares. Las concentraciones registradas en la localidad de San Martín Caltenco fueron de 10.7

y 9.4 mg kg^{-1} a una profundidad de 0-30 cm y 30-60 cm respectivamente, y para el caso de La Soledad 8.5 y 8.1 mg kg^{-1} en las mismas profundidades.

Corinne *et al.* (2006) menciona que algunos metales como el níquel, que puede llegar a ser menos absorbido en los suelos, puede ser fácilmente absorbido por las plantas y ser ligeramente tóxico para las mismas, siendo un elemento móvil en los tejidos de las plantas. Por lo anterior, aunque se encontró la presencia de níquel (Ni) en el suelo de dos sitios de muestreo, San Martín Caltenco y La Soledad, las concentraciones de este metal no exceden los límites máximos permisibles establecidos por Kabata-Pendias (2004) y la NOM-021-RECNAT-2000 en suelo.

Méndez *et al.*, (2000), mencionan que la concentración de metales pesados disponibles en el suelo no representan ningún problema para los cultivos, cuando las concentraciones no exceden los límites máximos permisibles establecidos en norma.

En el Cuadro 21 se presentan los resultados obtenidos de micronutrientes disponibles en el suelo a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm), y se presentan los límites máximos permisibles de referencia en la NOM-021-RECNAT-2000 y lo establecido por Kabata-Pendias (2004).

Para el caso del cobre (Cu) se obtuvieron concentraciones que oscilan entre 0.54 a 1.54 mg kg^{-1} a una profundidad de 0-30 cm, y de 0.5 a 2.2 mg kg^{-1} a una profundidad de 30-60 cm. La concentración menor de este micronutriente corresponde a Tochtepec, que son de textura arena francosa, y la concentración mayor fue encontrada en el testigo, que son suelos franco arenosos.

El agua utilizada para la irrigación de cultivos en las localidades de Santa Ana Coapan, San Martín Caltenco, Tochtepec y La Soledad, es agua proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, a excepción del testigo, donde el agua utilizada para irrigación, es agua de pozo.

Cuadro 21. Concentración promedio de micronutrientos disponibles en el suelo a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm) y su comparación con la Norma Oficial Mexicana y Kabata-Pendias (2004).

| Metal (mg kg ⁻¹) | Santa Ana Coapan | San Martín | Caltenco | Tochtepec | La Soledad | Testigo | Kabata-Pendias (2004) | | NOM-021-RECNAT-2000 | | |
|---------------------------------|------------------|------------|----------|-----------|------------|----------|------------------------|-----------|------------------------|----------|----------|
| | | | | | | | Marginal | Peligroso | Deficiente | Marginal | Adecuado |
| | | | | | | | (mg kg ⁻¹) | | (mg kg ⁻¹) | | |
| Cu 0-30 cm | 0.66 | 0.85 | 0.54 | 1.42 | 1.54 | 13 - 24 | > 24 | < 0.2 | - | > 0.2 | |
| Cu 30-60 cm | 0.5 | 0.76 | 0.53 | 1.48 | 2.2 | | | | | | |
| Zn 0-30 cm | 1.9 | 0.28 | 1.1 | 0.36 | 7.0 | 40 - 120 | > 120 | < 0.5 | 0.5 - 1.0 | > 1.0 | |
| Zn 30-60 cm | ND | 0.44 | 0.6 | 0.32 | 6.7 | | | | | | |
| Fe 0-30 cm | 1.7 | 5.9 | 2.9 | 4.3 | 4.4 | 50 - 200 | 200 - 500 | < 2.5 | 2.5 - 4.5 | > 4.5 | |
| Fe 30-60 cm | 1.2 | 5.8 | 2.8 | 4.3 | 3.6 | | | | | | |

ND: No detectado por espectrofotometría de absorción atómica.

Los resultados obtenidos demuestran que la concentración de Cu es similar en ambas profundidades, y de acuerdo con lo establecido Kabata-Pendias (2004), la concentración de cobre se encuentran dentro del nivel marginal, y de acuerdo con la norma NOM-021-RECNAT-2000 la concentración de Cu se encuentra dentro del nivel deficiente.

La concentración de Cu en los sistemas de producción estudiados son inferiores a los presentados por Cajuste *et al.*, (1991), quien reporta valores de 24 y 25 mg kg⁻¹ en suelos regados con agua residual ubicados en el Valle del Mezquital.

Por otra parte, de acuerdo con los sistemas de producción estudiados se puede resaltar que en la localidad de Santa Ana Coapan (alfalfa) la concentración de zinc (Zn) únicamente fue detectada a una profundidad de 0-30 cm, a diferencia del sistema maíz que fue encontrado en ambas profundidades en los cuatro sitios estudiados, donde la concentración de este micronutriente es similar en ambas profundidades.

La concentración de zinc (Zn) en suelo se encuentran entre 0.28 y 7.0 mg kg⁻¹ a una profundidad de 0-30 cm y entre 0.32 y 6.7 mg kg⁻¹ a una profundidad de 30-60 cm, y la concentración de Zn en ambas profundidades es muy similar.

La concentración de Zn fue mayor en el testigo, sitio que es regado con agua de pozo, en comparación con los otros sitios estudiados, pero porque recibe fuertes cantidades de estiércol anualmente, y la concentración es similar en ambas profundidades (0-30 cm y 30-60 cm).

Ramos *et al.*, (2001) reporta concentraciones de zinc en suelos ubicados en el Valle del Mezquital de 22 mg kg⁻¹, los cuales son muy superiores a los encontrados en el presente trabajo de investigación, así que de acuerdo con lo establecido por Kabata-Pendias 2004, el contenido de zinc en los cinco sitios de muestreo se encuentran dentro de un nivel deficiente, y según lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000 los valores de Zn encontrados en las muestras de suelo se encuentran dentro de un nivel adecuado.

La concentración de hierro en suelo en los cinco sistemas de producción estudiados fue variable, ya que en la localidad de Santa Ana Coapan (alfalfa) la concentración de Fe es menor comparado con la concentración de Fe en maíz (San Martín Caltenco, Tochtepec, La Soledad y el Testigo). En las localidades de San Martín Caltenco y La Soledad la concentración de Fe oscila entre 4.3 y 5.9 mg kg⁻¹ a una profundidad de 0-30 cm y de 4.3 y 5.8 mg kg⁻¹ a 30 y 60 cm de profundidad, son las concentraciones de Fe más altas en los sistemas de producción estudiados, la concentración más baja de éste micronutriente se registró en Tochtepec.

Comparando los sistemas de producción estudiados, en el testigo (maíz) se encontraron concentraciones de Fe de 4.4 y 3.6 mg kg⁻¹ a 0-30 cm y 30-60 cm de profundidad, y en Santa Ana Coapan (alfalfa) la concentración de este

micronutrimiento fue menor, registrando concentraciones de 1.7 y 1.2 mg kg⁻¹ a 0-30 cm y 30-60 cm de profundidad.

Las concentraciones de Fe detectadas en el presente proyecto de investigación son mucho menores a los valores detectados por Méndez *et al.*, (1997) en suelos del Distrito de Riego 030 de Tecamachalco, donde los valores promedio encontrados fueron de 15.3 mg kg⁻¹.

En las Figuras 12 y 13 se presentan las graficas de los niveles de concentración de cada metal en los diferentes sitios de muestreo a dos profundidades de suelos, 0-30 cm y 30-60 cm.

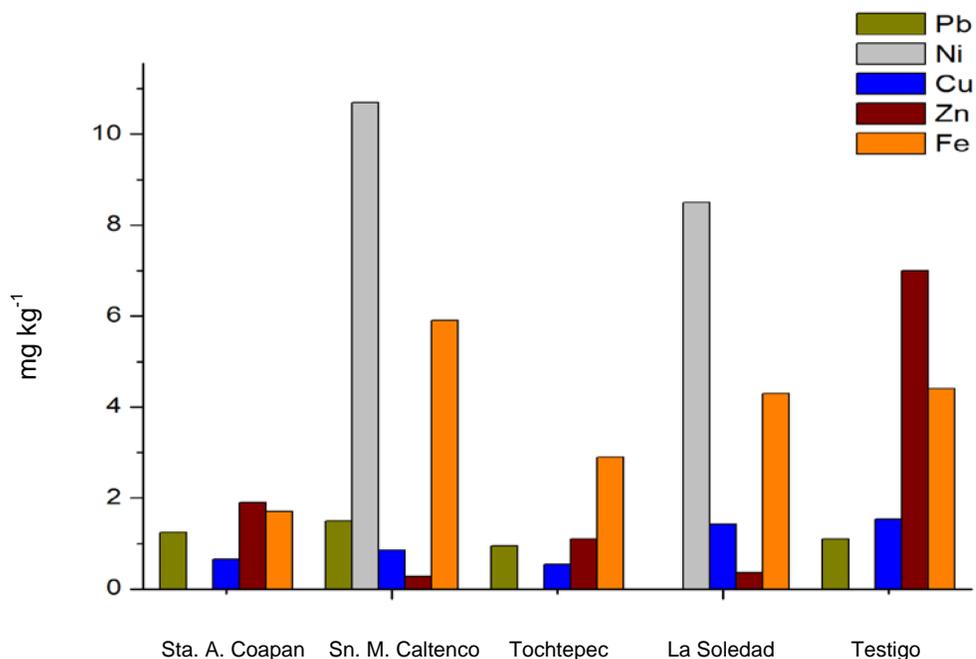


Figura 12. Concentración de metales pesados disponibles en el suelo a 0-30 cm de profundidad.

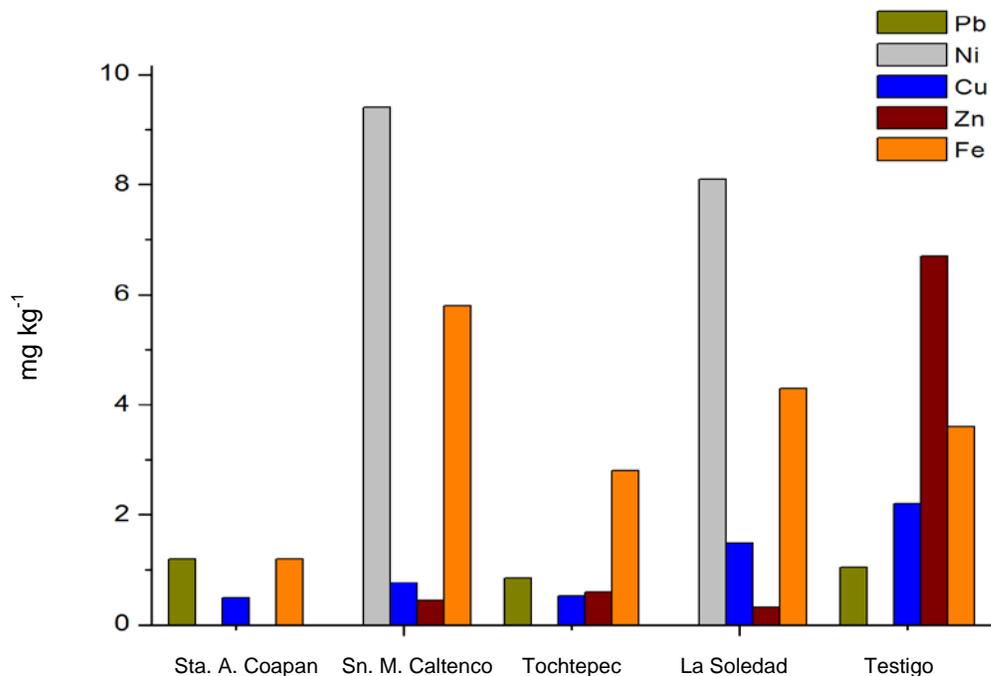


Figura 13. Concentración de metales pesados disponibles en el suelo a 30-60 cm de profundidad

Concentración de metales pesados totales en plantas

En el Cuadro 22 se presentan las concentraciones de metales pesados totales presentes en plantas de maíz y en el Cuadro 23 se presentan las concentraciones de metales pesados en alfalfa obtenidas durante el análisis de materia vegetal, los datos se compararon de acuerdo a lo establecido por Kabata-Pendias 2001 y Mortuedt *et al.*, 1983.

En el caso de materia vegetal se detectaron concentraciones de metales pesados totales y micronutrientes en planta como son Pb, Ni, Cu, Zn y Fe, a excepción del Cd que no fue detectado en ninguno de los sistemas de producción estudiados.

Cuadro 22. Concentración de metales pesados (mg kg⁻¹) en plantas de maíz.

| SISTEMA DE PRODUCCIÓN MAÍZ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------|-------|------|------|--------|------|------|------|------------|------|------|------|------------|-----|------|------|--------|------|------|------|
| Metal mg kg ⁻¹ | RAÍZ | | | | TALLO | | | | HOJA MILPA | | | | HOJA FRUTO | | | | FRUTO | | | |
| | SITIOS | | | | SITIOS | | | | SITIOS | | | | SITIOS | | | | SITIOS | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Pb | 40 | 26.7 | 34.7 | 46.7 | 53.3 | 52 | 57.3 | 57.3 | 49.3 | 58.7 | 45.3 | 28 | 60 | 38 | 56 | 52 | 37.3 | 44 | 38.7 | 36 |
| Cd | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Ni | 5.6 | 5.6 | 5.3 | 6.9 | 7.8 | 2.3 | 8.6 | 3.7 | 9.3 | 4.4 | 9.6 | 4.6 | 9.5 | 4.7 | 9.9 | 4.3 | 5.1 | 4.7 | 4.1 | 4.3 |
| Cu | 0.4 | 0.6 | 1.2 | 0.1 | ND | 0.4 | ND | 0.9 | 1.9 | 2.4 | 3.6 | 1.1 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | ND | ND | ND | 0.1 | ND |
| Zn | 6.8 | 3.3 | 6.7 | 20.9 | 6 | 15.6 | 14.8 | 8.4 | 19.9 | 25.5 | 13.2 | 22.4 | 7.7 | 16 | 7.5 | 16 | 21.9 | 21.3 | 21.7 | 24.1 |
| Fe | 36 | 106.8 | 39.5 | 50.8 | 43.9 | 62.9 | 37.6 | 31.9 | 55.7 | 62.3 | 74.3 | 53.3 | 63.2 | 58 | 61.3 | 53.9 | 52.9 | 58.3 | 42.7 | 31.6 |

Fuente. Análisis de laboratorio. N.D: No detectado por espectrofotometría de absorción atómica. Sitios.(1) Sn Martín Caltenco, (2) Tochtepec, (3) La Soledad, (4) Testigo.

Cuadro 23. Concentración de metales pesados (mg kg⁻¹) en plantas de alfalfa.

| SISTEMA DE PRODUCCIÓN ALFALFA | | | |
|-------------------------------|-------|-------|------|
| Metal mg kg ⁻¹ | RAÍZ | TALLO | HOJA |
| | SITIO | | |
| | 5 | | |
| Pb | 34.7 | 34.7 | 46.7 |
| Cd | ND | ND | ND |
| Ni | 4.6 | 6.3 | 5.3 |
| Cu | 0.1 | 0.9 | 2.8 |
| Zn | 4 | 13.3 | 35.3 |
| Fe | 39.1 | 69.3 | 62.7 |

Fuente. Análisis de laboratorio. N.D: No detectado por espectrofotometría de absorción atómica. Sitio. (5) Sta. Ana Coapan.

En el Cuadro 24 se presentan las concentraciones de metales pesados deficientes, tolerables y tóxicos según lo establecido por Kabata-Pendias (2204) y Mortuedt (1983).

Cuadro 24. Concentración de metales pesados (mg kg^{-1}) en plantas según Kabata-Pendias (2004) y Mortuedt (1983).

| Nivel de concentración | | | |
|---------------------------------------|------------|-----------|----------|
| Concentración (mg kg^{-1}) | Deficiente | Tolerable | Tóxico |
| Pb (a) | --- | 0.5 - 10 | 30 - 300 |
| Cd (a) | --- | 0.05-5.0 | 5 - 30 |
| Ni (a) | --- | 1-10 | 10-100 |
| Cu (a) | 2 - 5 | 5 - 20 | 20-100 |
| Zn (a) | 10 - 20 | 50 - 100 | 100-400 |
| Fe (b) | < 50 | 50 - 250 | --- |

Fuente. (a) Según Kabata-Pendias 2004. (b) Según Mortuedt 1983.

En el Cuadro 23 se puede observar que la concentración de plomo (Pb) en el maíz es mayor en la hoja del fruto y en el tallo en las localidades de San Martín Caltenco, La Soledad y el testigo, en el caso de la alfalfa la concentración es mayor en la hoja. Las concentraciones oscilan entre 38 mg kg^{-1} y 60 mg kg^{-1} en el caso de la hoja del fruto, y 52 mg kg^{-1} y 57.3 mg kg^{-1} en el caso del tallo. La concentración de éste metal en la hoja de la alfalfa fue de 46.7 mg kg^{-1} . Según lo establecido por Kabata-Pendias (2004), estas concentraciones se encuentran dentro de un nivel tóxico, lo cual es preocupante debido a que elevadas concentraciones de plomo pueden ocasionar efectos adversos en el embarazo, y los niños son los más vulnerables a los efectos del plomo que los niños, provocando lesiones en los riñones, neumonía, hemorragias, entre otros.

Lucho *et al.*, (2005) menciona que en lugares donde se ha regado con aguas residuales y a consecuencia de la acumulación de metales en suelos agrícolas, ha llegado a acumularse en plantas como maíz, trigo y alfalfa, metales pesados como cadmio, níquel y plomo, principalmente en tejido foliar, en hojas de la alfalfa,

incluso en granos de trigo, lo cual resulta preocupante debido a que la alfalfa se utiliza para alimentar ganado lechero en la región de Tecamachalco. Por lo anterior es importante dar seguimiento a la leche que producen. En las Figuras 14 y 15 se muestran gráficamente los resultados obtenidos.

Concentración de plomo (Pb) en el sistema de producción maíz

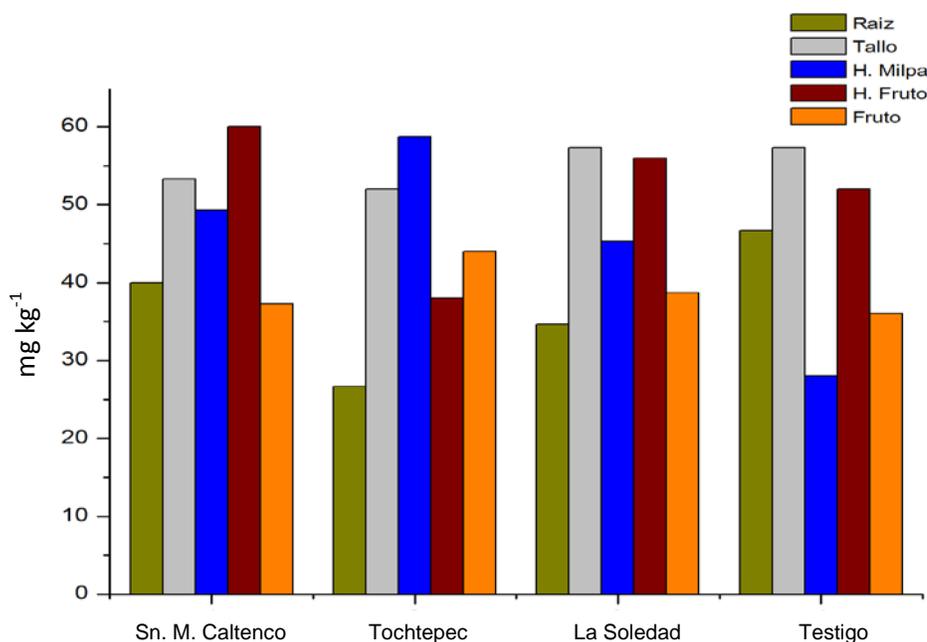


Figura 14. Concentración de plomo (Pb) en materia seca (maíz).

El cadmio (Cd) es el único metal que no se detectó en ninguno de los sistemas de producción estudiados.

Para el caso del níquel (Ni), en el sistema de producción maíz en planta, la concentración fue mayor en las localidades de San Martín Caltenco y La Soledad, encontrando valores de 9.3 mg kg^{-1} y 9.6 mg kg^{-1} en la hoja de la milpa, y de 9.5 mg kg^{-1} y 9.9 mg kg^{-1} en la hoja del fruto. En la alfalfa la concentración más alta detectada fue en la hoja de la planta.

Concentración de plomo (Pb) en el sistema de producción alfalfa

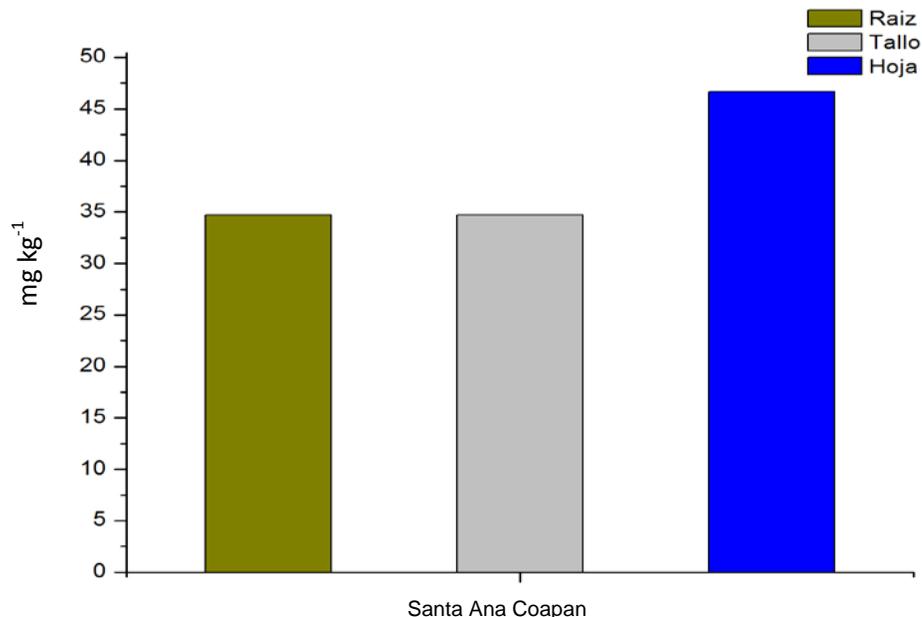


Figura 15. Concentración de plomo (Pb) en materia seca (alfalfa).

Los valores detectados en planta en el presente trabajo de investigación son superiores a los encontrados por Vázquez *et al.* (2005) para Ni, los cuales varían de 0.069 a 0.153 mg kg⁻¹, para cultivos básicos (trigo, maíz, frijol y calabaza) en la zona del Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo, pero de acuerdo con lo establecido por Kabata-Pendias (2004) la concentración de Ni se encuentra dentro de los límites máximos establecidos, encontrándose dentro de un nivel de concentración tolerable para cultivos agrícolas.

Valdés y Cabrera (1999) mencionan que la ingestión de níquel o el contacto directo con el mismo pueden ocasionar erupción cutánea, cáncer pulmonar, bronquitis, entre otros.

Algunas de las características que influyen la biodisponibilidad del Ni a las plantas, incluyen el pH, y el contenido de la materia orgánica (Weng *et al.*, 2004).

Mahdy *et al.*, (2007) menciona que algunos cultivos como el maíz, cuando crece en un suelo de típicamente arcilloso, como es el caso de La Soledad, tienen una capacidad asimilativa más alta que para el límite de absorción de Cd, Ni, Pb y de Cu que en otros suelos y que marcan la diferencia también con otros cultivos. En las Figuras 16 y 17 se muestran las concentraciones de Ni en los dos sistemas de producción estudiados.

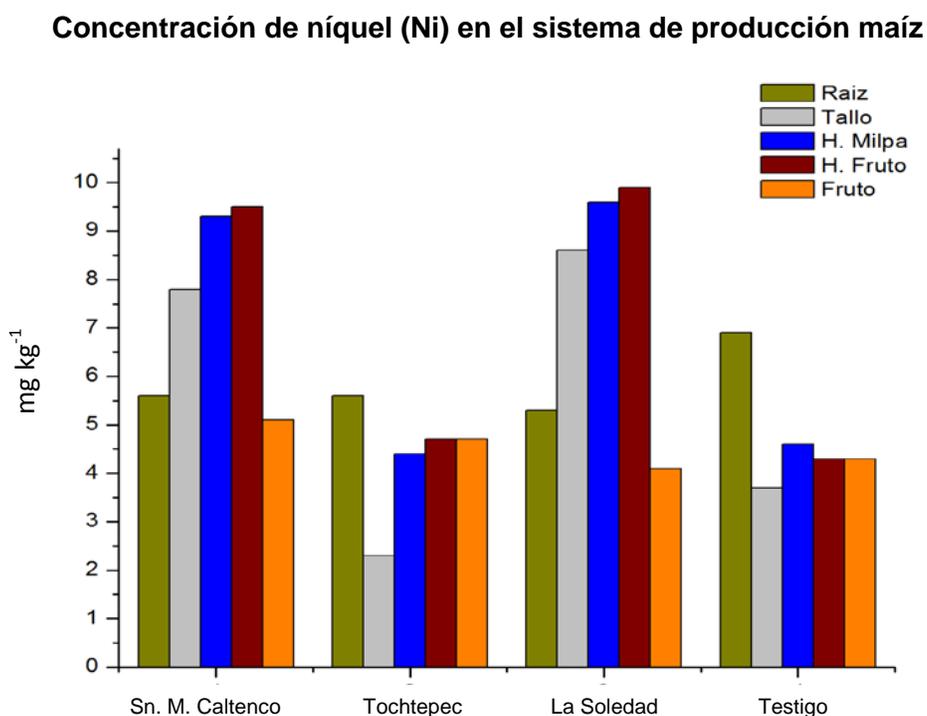


Figura 16. Concentración de níquel (Ni) en materia seca (maíz).

La concentración de cobre (Cu) en los sistemas de producción estudiados es variable, debido a que éste metal fue detectado en todos los sistemas, pero no en todas las partes de la planta estudiadas. La concentración de éste metal en el sistema maíz, fue mayor en Tochtepec y La Soledad, donde los valores oscilan entre 2.4 mg kg⁻¹ y 3.6 mg kg⁻¹ en la hoja de la milpa y de 0.6 mg kg⁻¹ y 1.2 mg kg⁻¹ en la raíz de la planta. En la alfalfa, la concentración es mayor en la hoja, detectándose una concentración de 2.8 mg kg⁻¹. Dichas concentraciones se ubican dentro de un nivel deficiente, según lo establecido por Kabata-Pendias (2004).

Concentración de níquel (Ni) en el sistema de producción alfalfa

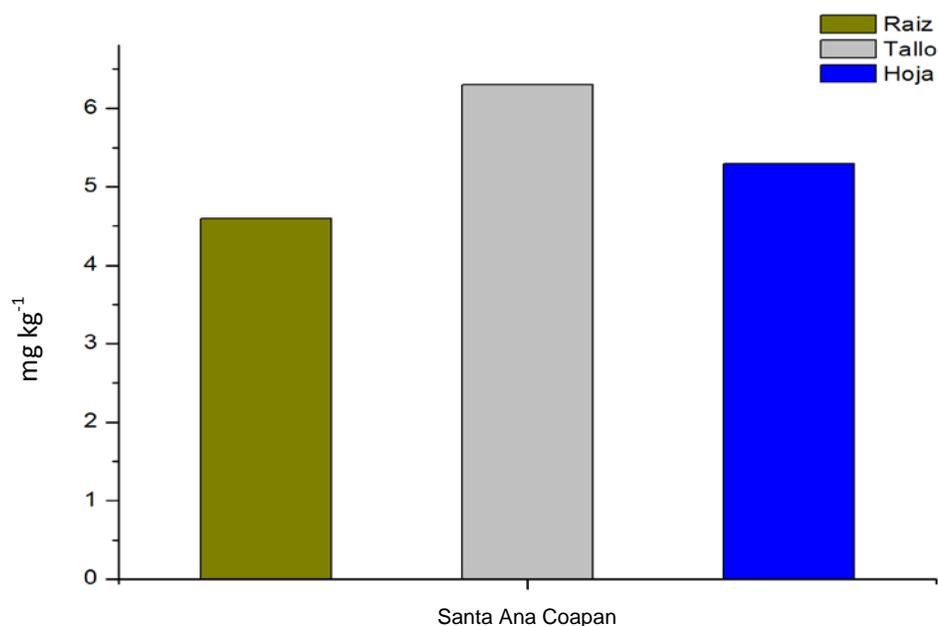


Figura 17. Concentración de níquel (Ni) en materia seca (alfalfa).

El Cu tiene una movilidad relativamente baja respecto a otros elementos en las plantas, permaneciendo en los tejidos de las raíces y hojas (Kabata-Pendias, 2004). Paredes et al., (2001) mencionan que elevadas concentraciones de Cu puede ser tóxico para los seres humanos debido a que altera el metabolismo y puede provocar hasta la muerte.

En las Figuras 18 y 19 se muestran las concentraciones de este metal en cada sistema de producción estudiado.

En San Martín Caltenco, Tcohtepic, La Soledad y el Testigo, la mayor concentración de zinc se detectó en el fruto, seguido de la hoja de la milpa, registrando concentraciones que oscilan entre 24.1 mg kg⁻¹ y 21.3 mg kg⁻¹, para el caso del fruto, así como de 25.5 mg kg⁻¹ y 13.2 mg kg⁻¹ en la hoja de la milpa. La concentración detectada en el cultivo de alfalfa (Santa Ana Coapan) fue mayor en la hoja encontrando una concentración de 35.3 mg kg⁻¹.

Concentración de cobre (Cu) en el sistema de producción maíz

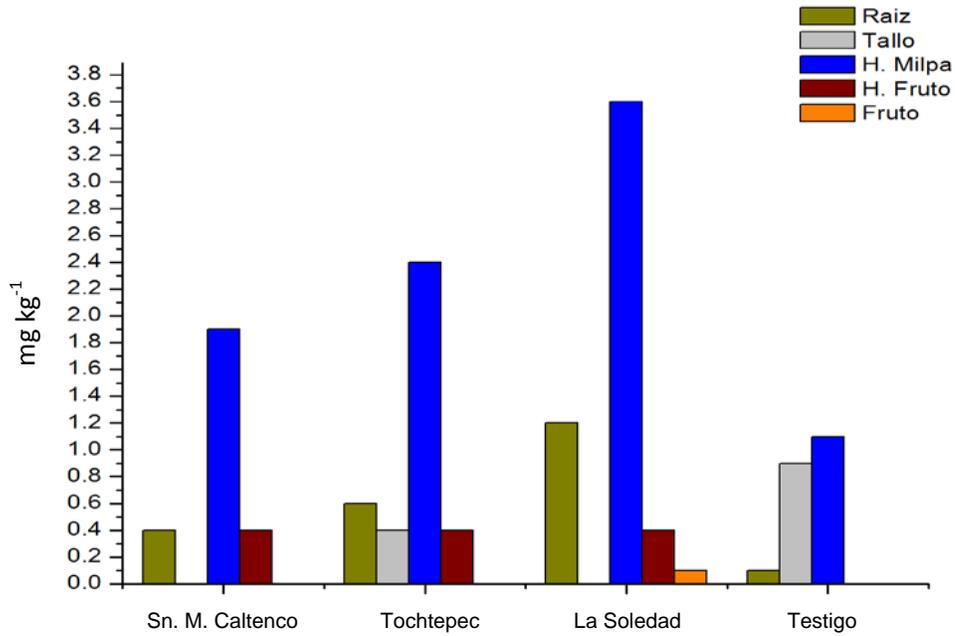


Figura 18. Concentración de cobre (Cu) en materia seca (maíz).

Concentración de cobre (Cu) en el sistema de producción alfalfa

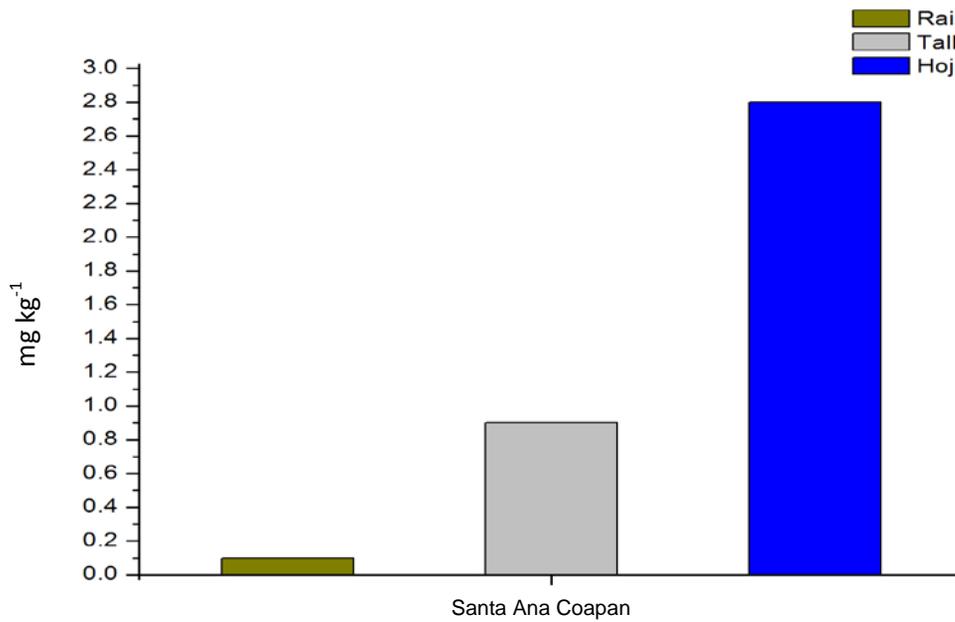


Figura 19. Concentración de cobre (Cu) en materia seca (alfalfa).

Adriano *et al.*, (2001) menciona que la deficiencia por este micronutriente en cultivos se debe a varias causas, la primera es por la deficiencia de zinc en suelo pero también puede ser debido a que no esté biodisponible para las plantas o que las prácticas de manejo disminuyan su biodisponibilidad. Jarup (2003) menciona que elevadas concentraciones de Zn en el cuerpo humano puede desvirtuar algunas funciones inmunológicas, presentando problemas gastrointestinales y hemorragias.

En las Figuras 20 y 21 se presentan los resultados obtenidos del análisis de laboratorio realizado a las plantas de maíz y alfalfa.

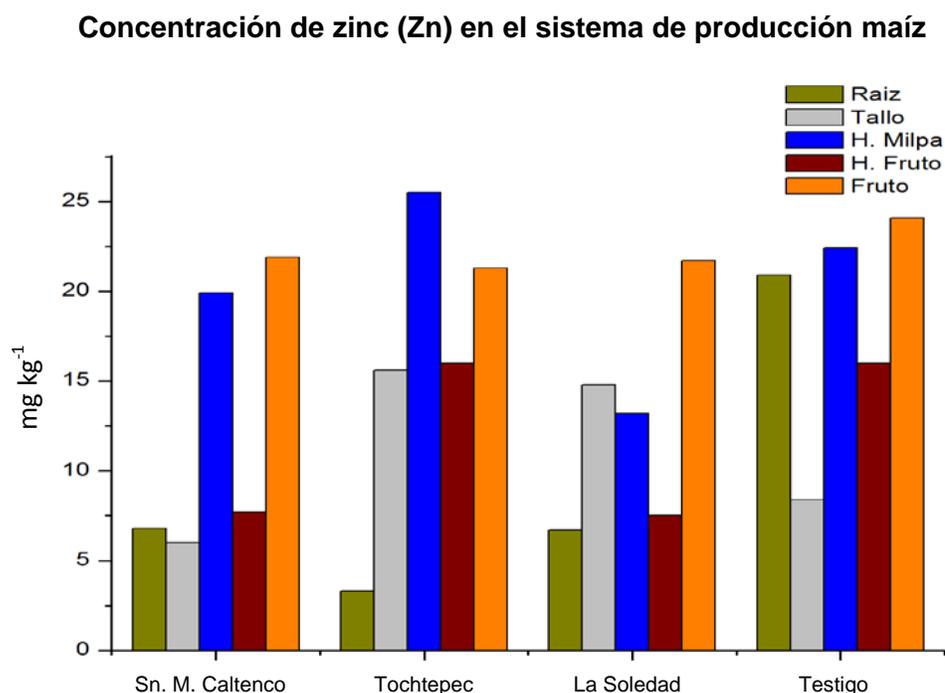


Figura 20. Concentración de zinc (Zn) en materia seca (maíz).

La concentración de hierro (Fe) en el sistema de producción alfalfa, localizado en Santa Ana Coapan, es mayor en el tallo y hoja de la planta, encontrando concentraciones de 69.3 mg kg^{-1} y 62.7 mg kg^{-1} respectivamente, y de acuerdo

con lo establecido por Mortuedt (1983), estas concentraciones se encuentran dentro de un nivel tolerable para cultivos agrícolas.

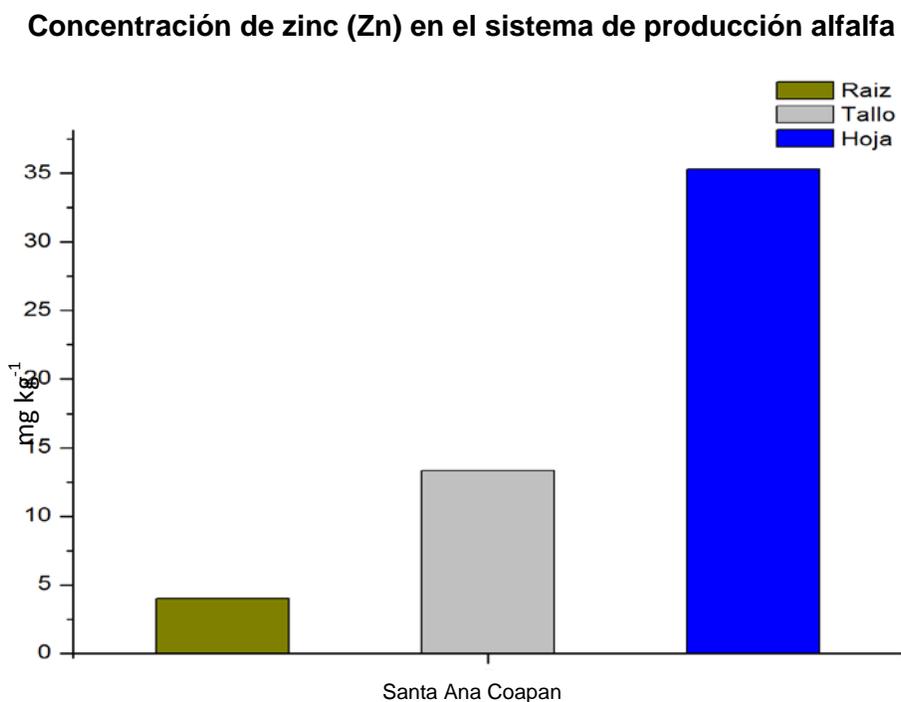


Figura 21. Concentración de zinc (Zn) en materia seca (alfalfa).

En el sistema de producción maíz, la concentración de hierro fue mayor en la hoja de la milpa, hoja del fruto y fruto, en San Martín Caltenco, La Soledad y el Testigo, encontrándose concentraciones que oscilan entre 53.3 mg kg⁻¹ y 74.3 mg kg⁻¹ en el caso de la hoja de la milpa, 53.9 mg kg⁻¹ y 63.2 mg kg⁻¹ en la hoja del fruto, y de 31.6 mg kg⁻¹ y 52.9 mg kg⁻¹ en el fruto, a diferencia de Tochtepec donde la concentración fue mayor en la raíz de la planta, registrando una concentración de 106.8 mg kg⁻¹. Malla *et al.*, (2007) menciona que el hierro tiende a acumularse en las hojas de rábanos y espinacas, y la concentración de este micronutriente es menor en la raíz de la planta. En las Figuras 22 y 23 se muestran las concentraciones de Fe detectadas en las plantas de maíz y alfalfa.

Concentración de hierro (Fe) en el sistema de producción maíz

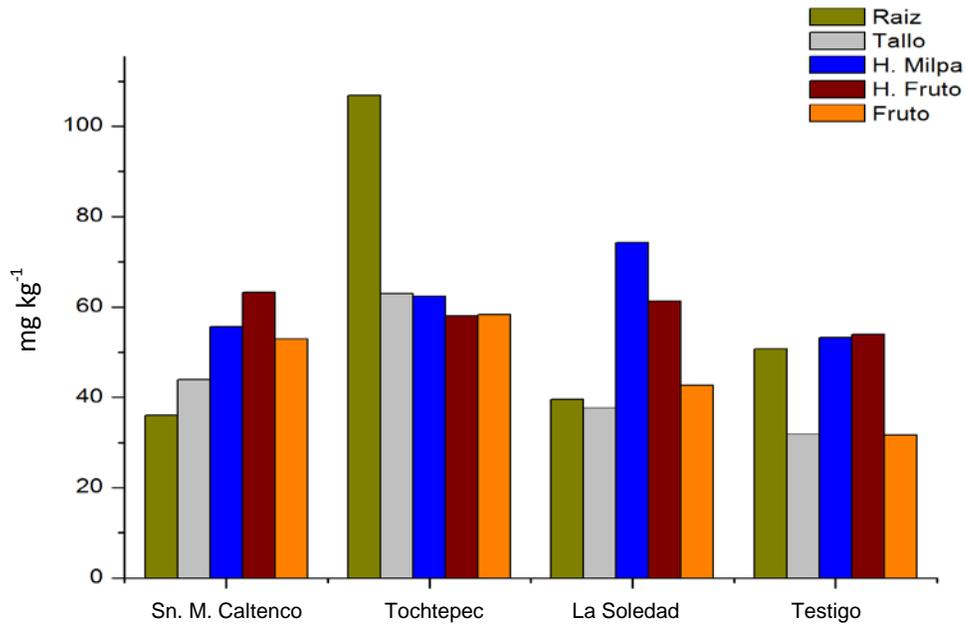


Figura 22. Concentración de hierro (Fe) en materia seca (maíz).

Concentración de hierro (Fe) en el sistema de producción alfalfa

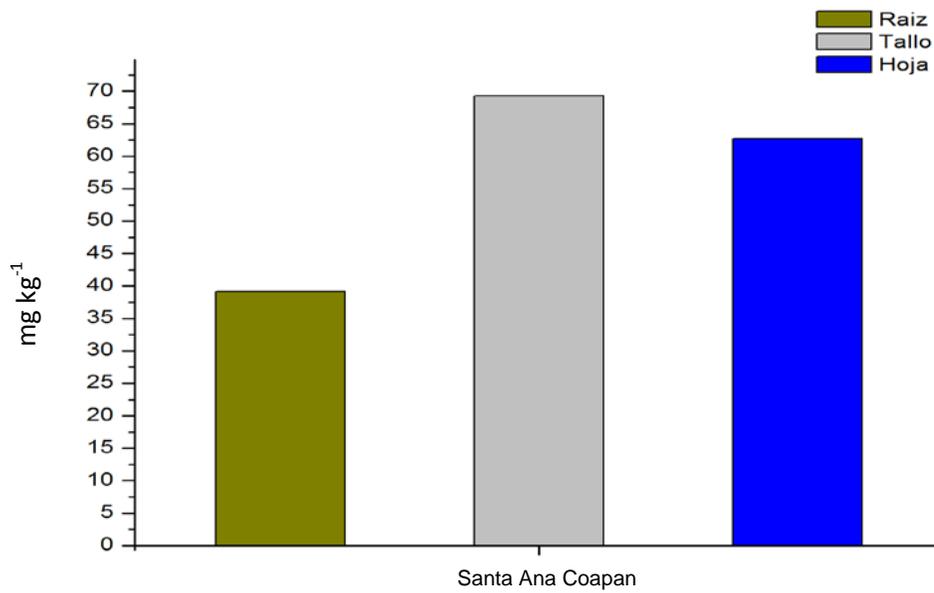


Figura 23. Concentración de hierro (Fe) en materia seca (alfalfa).

Análisis estadístico

Se realizó el análisis de correlación de Person con la finalidad de determinar si existe alguna correlación entre metales pesados disponibles en el suelo con materia orgánica y pH, utilizando un software estadístico.

En el Cuadro 25 se muestran los resultados obtenidos del análisis de materia orgánica con metales pesados disponibles en el suelo.

Cuadro 25. Análisis de correlación de Pearson de materia orgánica y metales pesados disponibles en suelo.

| Relación | Nivel de significancia | |
|----------|------------------------|-------|
| | 0.05 | |
| M. O. | Pb | 0.64* |
| | Ni | |
| | Cu | |
| | Fe | 0.77* |
| | Zn | 0.78* |

*La correlación es significante al nivel 0.05

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de correlación de Pearson, en función de los metales pesados contenidos en los suelos y el contenido de materia orgánica en ellos, se puede observar solo tres relaciones consideradas como significativas, correspondientes a Pb, Fe y Zn, con una $P < 0.05$. Méndez *et al.*, (2003) reportaron que el Pb y Fe presentaron una correlación significativa con la materia orgánica con una $P < 0.05$ en suelos agrícolas.

Por otra parte Sauquillo *et al.*, (2003) mencionan que factores como el pH, materia orgánica, textura, entre otros, influyen en la movilización de metales pesados en el suelo.

También se realizó el análisis de correlación de Pearson entre pH y metales pesados contenidos en suelo.

De acuerdo con lo establecido por Stefan y Rosa (2003), se pudo observar que no existe relación alguna entre pH del suelo y el contenido de metales pesados en el suelo (Pb, Cu, Fe y Zn) analizados en el presente trabajo de investigación, sin embargo si existe una correlación significativa entre pH y Ni, obteniendo una correlación de 0.78 con una $P < 0.05$. Siebe (1994) menciona que el pH medianamente alcalino tanto en agua como en suelo, favorece la lixiviación de metales pesados quedando inmóviles, pero siguen representando cierto riesgo en el suelo, ya que si el pH del suelo disminuye, los metales pueden quedar disponibles para las plantas.

En los Cuadros 26 y 27 se presenta el análisis de correlación de Pearson realizado entre la concentración de metales pesados y micronutrientos disponibles en suelo a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm) en cada sitio de muestreo.

Con base a los resultados de los análisis de correlación de Pearson realizados a las concentraciones de metales pesados disponibles en el suelo en ambas profundidades, se pueden observar dos correlaciones altamente significativas y dos significativas.

Cuadro 26. Análisis de correlación de Pearson entre metales pesados disponibles en el suelo a 0-30 cm y 30-60 cm de profundidad y cada sitio de muestreo.

| Relaciones entre sitios | | Relación entre metales pesados | | Probabilidad | |
|-------------------------|------------|--------------------------------|---------------|--------------|---------|
| | | | | 0.01 | 0.05 |
| Santa Ana Coapan | Tochtepec | Ni (0-30) cm | Ni (30-60) cm | 0.999** | |
| Santa Ana Coapan | La Soledad | Ni (0-30) cm | Ni (30-60) cm | 0.999** | |
| San Martín Caltenco | Tochtepec | Pb (30-60) cm | Ni (30-60) cm | | -0.972* |
| Tochtepec | La Soledad | Pb (30-60) cm | Ni (0-30) cm | | -0.966* |

*La correlación es significativa al nivel 0.05

**La correlación es significativa al nivel 0.01

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que existe una correlación altamente significativa entre la concentración de níquel (Ni) en suelo

en ambas profundidades (0-30 cm y 30-60 cm), entre los sitios de Santa Ana Coapan y Tochtepec, así como entre Santa Ana Coapan y La Soledad, la cual fue de 0.999 con una $P < 0.01$, y esto significa que cuando la concentración de Ni aumentó en el suelo a una profundidad de 0-30 cm, la concentración de éste metal a una profundidad de 30-60 cm aumentó proporcionalmente.

También se obtuvo una relación negativa significativa entre la concentración de Pb a una profundidad de 30-60 cm y Ni a la misma profundidad, la cual fue de -0.972 con una $P < 0.05$, lo cual implica que conforme disminuye la concentración de Pb en suelo, también disminuye la concentración de Ni.

La cuarta relación encontrada fue entre los metales plomo (Pb) a una profundidad 30-60 cm y níquel (Ni) en suelo a una profundidad 0-30 cm, entre los sitios de Tochtepec y La Soledad, con una correlación negativa significativa de -0.966, con una $P < 0.05$, lo cual quiere decir que conforme disminuye la concentración de Pb en suelo, también disminuye la concentración de Ni.

Según los resultados obtenidos del análisis de correlación de Pearson realizados a las concentraciones de micronutrientes presentes en el suelo, se pudieron observar tres correlaciones significativas con una $P < 0.05$, dichos resultados se muestran en el Cuadro 27.

Cuadro 27. Análisis de correlación de Pearson entre micronutrientes disponibles en el suelo a 0-30 cm y 30-60 cm de profundidad y cada sitio de muestreo.

| Relaciones entre sitios | | Relación entre micronutrientos | | Probabilidad | |
|-------------------------|------------|--------------------------------|---------------|--------------|--------|
| | | | | 0.01 | 0.05 |
| San Martín Caltenco | Tochtepec | Cu (0-30) cm | Cu (30-60) cm | 0.968** | |
| San Martín Caltenco | La Soledad | Zn (0-30) cm | Zn (30-60) cm | 0.979** | |
| Tochtepec | La Soledad | Fe (0-30) cm | Fe (30-60) cm | | 0.912* |

*La correlación es significativa al nivel 0.05

**La correlación es significativa al nivel 0.01

La primera correlación encontrada fue altamente significativa entre la concentración de cobre (Cu) en ambas profundidades, (0-30 cm y 30-60 cm) en los sitios de San Martín Caltenco y Tochtepec con una $P < 0.01$, lo cual implica que cuando la concentración de Cu aumentó en suelo a una profundidad de 0-30 cm, también aumento en 30-60 cm de profundidad.

La segunda relación que se observó fue el zinc (Zn) en ambas profundidades, con una correlación altamente significativa del 0.979, con una probabilidad $P < 0.01$, que indica que cuando la concentración de Zn en el suelo a una profundidad de 0-30 cm aumentó, la concentración de éste micronutriente aumentó proporcionalmente a una profundidad de 30-60 cm.

La tercera relación encontrada fue el caso del hierro (Fe) en ambas profundidades, obteniendo una correlación significativa del 0.912 con una $P < 0.05$, lo cual quiere decir que conforme aumenta la concentración de éste micronutriente a una profundidad de 0-30 cm, también aumenta a 30-60 cm de profundidad.

En el Cuadro 28 se presenta el análisis de correlación de Pearson realizado entre la concentración de metales pesados disponibles en suelo y la concentración de metales pesados totales encontrados en cultivos de maíz.

Cuadro 28. Análisis de correlación de Pearson entre los metales pesados disponibles en suelo y los metales pesados totales en cultivos de maíz

| Sistema de producción | Relación | | Probabilidad | |
|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------|
| | | | 0.01 | 0.05 |
| Maíz en suelo franco arenoso | Pb raíz | Pb fruto | | 0.955* |
| Maíz en suelo arenoso francoso | Ni suelo | Ni hoja milpa | | 0.979* |
| Maíz en suelo arenoso | Ni suelo | Ni hoja fruto | | 0.976* |
| Maíz en suelo franco arenoso | Ni tallo | Ni hoja milpa | | 0.985* |
| Maíz en suelo franco arcillo arenoso | Ni tallo | Ni hoja fruto | | 0.970* |
| Maíz en suelo franco arcillo arenoso | Ni hoja milpa | Ni hoja fruto | 0.997** | |
| Maíz en suelo arcillo limoso | Cu raíz | Cu hoja milpa | 0.997** | |
| Maíz en suelo franco arcillo arenoso | Zn suelo | Zn raíz | | 0.959* |
| Maíz en suelo franco arcillo arenoso | Zn suelo | Zn fruto | | 0.963* |
| Maíz en suelo arcillo limoso | Zn raíz | Zn fruto | 0.998** | |

*La correlación es significativa al nivel 0.05

**La correlación es significativa al nivel 0.01

Con base en los resultados obtenidos del análisis de correlación de Pearson realizado a las concentraciones de metales pesados disponibles en suelo y en cultivos de maíz y alfalfa, se pudieron observar diez relaciones significativas, tres de ellas correspondientes a una $P < 0.01$ y siete de ellas correspondientes a una $P < 0.05$, tales resultados se muestran en el Cuadro 28.

La primera relación encontrada se dio entre la concentración del plomo (Pb) encontrada en la raíz de la planta y la concentración de este metal en el fruto, donde el sistema de producción es maíz en suelo franco arenoso, con una correlación significativa de 0.955, es decir con una $P < 0.05$, lo cual indica que cuando la concentración de Pb aumentó en la raíz de la planta, la concentración de Pb en el fruto aumentó proporcionalmente.

López et al., (2005) menciona que en algunas plantas el Pb es capaz de acumularse principalmente en las raíces siendo mínima su presencia en otras partes de la planta.

La segunda y tercera relación corresponde a la concentración de níquel (Ni) en suelo y el Ni en la hoja de la milpa y en la hoja del fruto, donde el sistema de producción es maíz en suelo arenoso francoso y en suelo arenoso respectivamente, con una correlación significativa de 0.979 y 0.976 respectivamente, con una $P < 0.05$, lo que implica que cuando la concentración de Ni aumentó en el suelo, la concentración de éste metal aumento en la hoja de la milpa y la hoja del fruto.

Corinne *et al.*, (2006) mencionan que algunos metales como el Ni, puede llegar a ser menos adsorbido en suelos, puede ser fácilmente absorbido por las plantas y ser ligeramente tóxico para las mismas, siendo un elemento móvil en los tejidos de las plantas, se acumulan preferiblemente en las hojas y en las semillas.

La cuarta y quinta relación que se presentó fue entre la concentración de níquel (Ni) presente en el tallo de la milpa y la concentración de éste metal en la hoja de la milpa y la hoja del fruto, y el sistema de producción es maíz en suelo franco arenoso y en suelo franco arcillo arenoso, con una correlación significativa del 0.985 y 0.970 respectivamente, con una $P < 0.05$, lo que indica que cuando la concentración de Ni en el tallo aumentó, la concentración de Ni también aumentó en la hoja de la milpa y la hoja del fruto, prácticamente en la misma proporción.

La sexta relación entre la concentración de níquel (Ni) en la hoja de la milpa y en la hoja del fruto, el sistema de producción es maíz en suelo franco arcillo arenoso con una correlación del 0.997, es considerada como altamente significativa con una $P < 0.01$, lo que indica que cuando el contenido de Ni aumento en la hoja de la milpa, la concentración de éste metal en la hoja del fruto también aumentó.

Corinne et al., (2006) menciona que el Ni es el menos absorbido por el suelo, pero puede ser fácilmente absorbido por las plantas, siendo un elemento móvil en los tejidos de las plantas y se acumulan preferiblemente en las hojas y semillas.

La relación entre el cobre (Cu) presente en la raíz y la hoja de la milpa, donde el sistema de producción es maíz en suelo arcillo limoso, el cual presentó una correlación de 0.997 considerada como altamente significativa con una $P < 0.01$, que implica que cuando el contenido de Cu en la raíz de la planta aumentó, la concentración de éste metal aumentó en la hoja de la milpa en la misma proporción. Méndez *et al.*, (2003) mencionan que el Cu es considerado como el más móvil de los metales pesados y por su forma iónica se precipita fácilmente, por lo cual éste metal pesado está disponible para las plantas.

La relación entre el zinc (Zn) del suelo y la concentración del Zn en la raíz y fruto de la planta, siendo el sistema de producción maíz en suelo franco arcillo arenoso, y presentó una correlación del 0.959 y 0.963 respectivamente, lo cual implica que son correlaciones significativas con una $P < 0.05$, que implica que cuando el contenido de Zn en suelo aumenta, la concentración de éste metal aumenta proporcionalmente en la raíz y fruto de la planta. García *et al.*, (2001), menciona que conforme aumenta la concentración de metales en el suelo aumenta la concentración de estos en la raíz de la planta debido a que las raíces de la planta están en contacto directo con el suelo.

La última concentración detectada fue entre el Zn contenido en la raíz de la planta y la concentración de Zn en el fruto, donde el sistema de producción fue maíz en suelo arcillo limoso con una correlación de 0.998, considerada como altamente significativa, con una $P < 0.01$. Lo anterior indica que cuando la concentración de Zn en suelo aumentó, la concentración de Zn en el fruto aumentó proporcionalmente.

En el Cuadro 29 se presenta el análisis de correlación de Pearson realizado entre la concentración de metales pesados disponibles en suelo y la concentración de metales pesados totales encontrados en el sistema de producción alfalfa.

Cuadro 29. Análisis de correlación de Pearson entre los metales pesados disponibles en suelo y los metales pesados totales en cultivo de alfalfa

| Sistema de producción | Relación | | Probabilidad | |
|--------------------------------------|----------|------|--------------|--------|
| | | | 0.01 | 0.05 |
| Maíz en suelo franco arcillo arenoso | Tallo | Raíz | | 0.926* |
| Maíz en suelo franco arcillo arenoso | Tallo | Hoja | | 0.914* |

*La correlación es significativa al nivel 0.05

**La correlación es significativa al nivel 0.01

La relación encontrada se dio entre la concentración de metales detectada en el tallo de la alfalfa, y la detectada en la raíz y hoja de la alfalfa, con una correlación significativa del 0.926 y 0.914, con una $P < 0.05$, y según con lo establecido por García *et al.*, (2001), conforme aumenta la concentración de metales en el suelo aumenta la concentración de estos en la hoja de la alfalfa.

De manera general, el estudio de correlaciones realizadas entre la concentración de metales pesados disponibles en suelo y la concentración de metales totales en planta, reportó mediante el análisis de correlación de Pearson, que existe relación entre la concentración de Ni en suelo y el Ni contenido en las hojas de la milpa y la hoja del fruto en cultivos de maíz, y éste es un metal pesado que es fácilmente absorbido por las plantas el cual se acumula preferiblemente en las hojas y semillas de las plantas, y si se consumen productos contaminados por Ni, puede provocar cáncer pulmonar, bronquitis crónica, etc., (Prieto *et al.*, 2009).

También se pudo observar que existe correlación entre la concentración de Zn en suelo y el Zn contenido en cultivos de maíz. Intawongse and Dean (2006) mencionan que metales como el zinc (Zn) puede provocar marchitamiento en las hojas de las plantas de maíz, así como la disminución en la longitud de sus raíces

y de la biomasa, pero si se consumen productos con elevadas concentraciones de Zn, puede provocar en el ser humano problemas gastrointestinales y hemorragias.

Por otra parte, se observó que existe correlación entre el Pb contenido en raíz de la planta de maíz y el Pb en fruto, y si se consumen productos contaminados por maíz, en el ser humano puede alterar la función reproductora masculina y en la femenina puede provocar efectos adversos en el embarazo.

CONCLUSIONES

Suelo

Los sistemas de producción estudiados, ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo son medianamente alcalinos y ligeramente salinos, y se caracterizan por ser de textura franco arcillo arenosos, arenosos y arcillo limosos y son los más importantes desde el punto de vista agrícola, ya que son suelos fácilmente laborables. El mayor contenido de materia orgánica fue encontrado en el testigo.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de laboratorio, se concluye que existe la presencia de metales pesados (Pb, Ni, Cu, Zn y Fe) en suelo a dos profundidades (0-30 cm y 30-60 cm), sin embargo éstas concentraciones se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en norma.

El Cd fue el único metal que no se detectó en ningún sitio muestreado.

El bajo contenido de materia orgánica en los cinco sitios de muestreo puede influenciar sobre la concentración de metales pesados disponibles en el suelo, ya que el contenido de materia orgánica es un factor a considerar en el movimiento de los metales en el suelo, así como en la capacidad de absorción de las plantas.

Se pudo observar que existen tres correlaciones significativas entre el contenido de materia orgánica en suelo y la concentración de metales pesados disponibles en suelo (Pb, Fe y Zn). También existe una correlación significativa entre el pH del suelo y el Ni disponible en suelo.

Existen cuatro correlaciones altamente significativas entre metales pesados disponibles en suelo y cada sitio de muestreo, las cuales se dieron entre la concentración de Ni en ambas profundidades (0-30 cm y 30-60 cm) y Pb a una profundidad de 30-60 cm, de las cuales dos son positivas y dos negativas.

También se encontraron tres correlaciones entre la concentración de micronutrientes en suelo y cada sitio de muestreo, de las cuales dos son altamente significativas (Cu y Zn en ambas profundidades) y una significativa (Fe en ambas profundidades).

Planta

De acuerdo a los análisis realizados correspondientes a materia vegetal, se puede concluir que existe la presencia de metales pesados en planta (Pb, Ni, Cu, Zn y Fe), a excepción del Cd el cual no se detectó en ninguna parte de la planta analizada. La concentración de metales pesados y micronutrientes en planta se encuentran dentro de un nivel tolerable, según lo establecido por los autores mencionados en el presente trabajo de investigación.

El único elemento que excede los límites máximos permisibles es el Pb, encontrándose dentro del nivel tóxico, lo cual representa un grave problema para el ser humano, ya que sus efectos por exposición a este metal puede tener efectos negativos en el plano celular. Para el caso del Ni, la concentración se encuentran dentro del nivel tolerable, según lo establecido por los autores mencionados, sin embargo elevadas concentraciones de éste metal puede ocasionar riesgos a la salud humana.

Se pudo observar que existen diez correlaciones entre la concentración de metales disponibles en suelo y metales pesados totales en cultivos de maíz. El sistema maíz en suelo franco arcillo arenoso registró una correlación entre Ni en hoja de la milpa y Ni en la Hoja del fruto, en el sistema maíz en suelo arcillo limoso se detectó una correlación entre Cu en la raíz de la milpa y Cu en la hoja de la milpa, y Zn en la raíz de la milpa y Zn en el fruto, siendo estas correlaciones altamente significativas.

Las otras correlaciones fueron en el sistema maíz en suelo franco arenoso entre el Pb contenido en la raíz de la milpa y Pb en el fruto, siendo ésta significativa, así como Ni en tallo de la milpa y Ni en la hoja de la milpa. En el sistema maíz en suelo franco arcillo arenoso, se obtuvo correlación significativa entre el Ni en tallo y Ni en la hoja del fruto, así como Zn en suelo y Zn en la raíz y fruto de la milpa. En el sistema maíz en suelo arenoso francoso, se obtuvo correlación significativa entre Ni en suelo y Ni en la hoja de la milpa, y finalmente en el sistema maíz en suelo arenoso se encontró correlación significativa entre el Ni en suelo y Ni en la hoja del fruto.

Los metales pesados como el Pb y Ni en cultivos agrícolas como el maíz, así como el contenido de metales pesados en alfalfa, pueden traer efectos adversos en la salud humana, inclusive puede causar hasta la muerte, debido a la ingestión de alimentos contaminados.

LITERATURA CITADA

Adriano, D.C. 2001. Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, Nueva York.

Alcántar G. G. y Sandoval V. M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Nutrición Vegetal, Edafología. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Publicación Especial No.10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. México.

Angelova V., Ivanova, R., Delibaltova, V. and Ivanov, K. 2004. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). Industrial Crops and Products 19: 197-205.

Benton J. J. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press LLC. United States of America. 363 pp.

Cajuste L. J. 1977. Química de suelos con un enfoque agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 278 pp.

Cajuste, L. J., R. Carrillo G., E. Cota G y J. R. Laird. 1991. The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. Water, Air and Soil Pollution 58: 763-771.

Clemente R., Walker D. J., Bernal M. P. 2005. Uptake of heavy metals and As by Brassica juncea grown in a contaminated soil in Aznalcóllar (Spain): The effect of soil amendments. Elsevier. Science direct. Environmental Pollution 138: 46-58.

Colombo L., Mangione D., Bellicioni S. y Figlioglia A. 1999. Soil profile distribution of heavy metals in a soil amended with sewage sludge for eight years. *Agr. Med. Intern. J. of Agric. Sci.* 128: 273-283.

Corinne P. R., Fang-Jie Z., McGrath S. P. 2006. Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: Influence of soil properties, Ni solubility and speciation. *Environmental Pollution* 145: 596-605.

Environmental Protection Agency. EPA. 2007. Reporte de calidad del agua potable. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories. EPA 822-R-04-005.

García M., Watson C. y Salcedo F. (2001). Evaluación de métodos para determinar resistencia al acame de raíces en maíz dulce (*Zea mays* L.). *Bioagro* 13: 22-31.

Jarup L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *Brit. Med. Bull.* 68: 167-182.

Kabata-Pendias A. 2001. Trace elements in soils and plants. Third Edition. C. R. C. Presss. Printed in the United United States of America. Washington, D. C. 413 pp.

López P., Guzmán, F. A., Santos, E. M., Prieto, F., Román, A. D. 2005. Evaluación de la calidad física de diferentes variedades de cebada (*hordeum sativum jess*) cultivadas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala, México. *Revista Chilena de Nutrición*, 32: 247-253.

Lucho C. A., Prieto F., Del Razo L. M., Rodríguez R. y Poggi H. (2005). Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 108: 57-71.

Mahdy A. M., Elkhatib E. A. and Fathi N. O. 2007. Cadmium, Copper, Nickel, and Lead Availability in Biosolids-amended Alkaline Soils, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1: 354-363.

Mahler R.L. 2003. General overview of nutrition for field and container crops. In: Riley, L. E.; Dumroese, R. K.; Landis, T. D. Tech Coords. National Proceeding: Forest and Conservation Nursery Associations. 6: 9-12.

Malla R., Tanaka Y. and Mori K. L. 2007. Shortterm effect of sewage irrigation on chemical build up in soils and vegetables. *The Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal*. Manuscript LW 07 006 Vol. IX.

Méndez G. T., Rodríguez D. L. y Palacios M. S. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra* 18: 277-288.

Méndez R. F., Gisbert B. J., García D. J. y Marqués M. A. 2003. Relación estadística entre metales pesados y propiedades de suelos de cultivo regados con aguas residuales no depuradas. *Interciencia* 28: 281-286.

Méndez G. T., Palacios M. S. y Rodríguez D. L. 2008. Análisis de suelo, foliar y de calidad del agua para el cultivo aguacatero. *Terra Latinoamericana*. 26: 75-84.

Montenegro G., Fredes C., Mejías E., Bonomelli C. y Olivares L. 2009. Contenidos de metales pesados en suelos cercanos a un relave cuprífero Chileno. *Agrociencia*. 43: 427-435.

Mortuedt J. J., Giordano P. M., Lindsay W. L. 1983. *Micronutrientes en agricultura*. Primera Edición. A. G. T. Editor, S. A. México, D. F. 742 pp.

Navarro B. S. y Navarro G. G. 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

Paredes R. S. R., Aguilar N. J. A. y Navarro Q. A. 2001. Determinación de metales pesados y sales solubles en suelos de cultivo acondicionados con lodos residuales. *Conciencia Tecnológica*. 16: 4-8.

Pérez O. M. A., García M. R., Vázquez A. A., Colinas L. T., Pérez G. M. y Navarro G. H. 2008. Concentración de Pb, Cd, Ni y Zn en suelos contaminados y su transferencia a la pella de brócoli. *Terra Latinoamericana*. 26: 215-225.

Prieto M. J., González R. C. A., Román G. A. D. y Prieto G. F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10: 29-44.

Rattan R. K., Datta S. P., Chhonkar P. K., Suribabu K., Singh A. K. 2005. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater-a case study. Elsevier. *Science direct. Agriculture, Ecosystems and Environment* 109: 310-322.

Ramos B., R., L. Cajuste, D. Flores y N. García. 2001. Metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa en México. *Agrociencia* 35: 385-395.

Sauquillo, A., Rigol, A. and Rauret, G. 2003. Overview of the use of Leaching Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. *Trends in Analytical Chemistry*, 22: 152-159.

Siebe Ch. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales del DDR 03, Tula, Hgo., México. *Revista Int. Contam. Ambient.* 10: 15-21.

Spain, A. 2003. Implications Of Microbial Heavy Metals Tolerance in the Environment. *Reviews In Undergraduate Research* 2: 1-6.

Stefan M. W. y Rosa M. I. 2003. Diferencias en concentración de plaguicidas organoclorados persistentes en suelo, paja y granos de trigo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Volumen 19. No. 001. Universidad Nacional Autónoma de México. 5–11 pp.

Thompson L. M. y Troeh F. R. 1982. *Los suelos y su fertilidad*. Cuarta edición. Editorial Reverté, S. A. España, Barcelona. 649 pp.

Vázquez A., Cajuste L. J., R., Carrillo G., González Z. B., E. Álvarez S. y Castellanos J. Z. R. 2005. Límites permisibles de acumulación de cadmio, níquel y plomo en suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Terra Latinoamericana* 23: 447-455.

Velasco C. R. y Martínez S. D. 1985. Evaluación de métodos de muestreo para dos manejos de suelo diferentes en Valles Centrales de Oaxaca. Tesis Profesional. UACH, Chapingo, México.

Weng, L.P., Wolthoorn, A., Lexmond, T.M., Temminghoff, E.J.M. and Van Riemsdijk, W.H., 2004. Understanding the effects of soil characteristics on phytotoxicity and bioavailability of nickel using speciation models. *Environmental Science and Technology* 38: 156-162.

DISCUSIÓN GENERAL

El uso de aguas residuales se ha generalizado durante los últimos 20 años, especialmente en zonas donde la escasez de agua se hace presente, como es en zonas áridas y semiárida, tanto en países en vías de desarrollo como en países desarrollados (CNA, 2001).

En el Estado de Puebla, el agua residual, producto del uso industrial (textil, químico, automotriz, etc) y urbano, que es vertida a los cuerpos de agua como son los ríos Atoyac y Alseseca, hasta su llegada a la presa Manuel Ávila Camacho, contiene algunos metales pesados como son (Pb, Ni, Cu, Fe y Zn) (INEGI, 2008).

La norma que actualmente regula las descargas de aguas residuales en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que únicamente toma en cuenta parámetros convencionales como algunos metales y cianuros, pero cuando se realizan los estudios de laboratorio correspondientes a aguas residuales, se detectan niveles de toxicidad.

El agua proveniente de los ríos Atoyac y Alseseca se almacena en la presa Manuel Ávila Camacho, para posteriormente ser utilizada para riego en el Distrito de Riego 030 Valsequillo. La zona de estudio abarca tres de las seis módulos de riego, los cuales son el módulo uno, dos y tres. Los cultivos de mayor relevancia en el distrito son hortalizas, forrajes y cultivos básicos. Los cultivos de mayor importancia en la zona de estudio, donde se desarrollo el presente trabajo de investigación, son maíz y alfalfa.

La EPA (2007) ha establecido estándares de seguridad para más de 80 contaminantes que pueden encontrarse en el agua y presentan un riesgo a la salud humana.

La ingestión de alimentos contaminados es una fuente importante de entrada y asimilación de metales tóxicos y esenciales, en los seres humanos, debido a que en elevadas concentraciones pueden ocasionar efectos agudos, los cuales ocurren dentro de unas horas, y los efectos crónicos que ocurren después que las personas consumen un contaminante durante muchos años (Prieto et al., 2009).

Ortíz y Amado (2001) mencionan que la calidad de productos agrícolas está en función de la calidad del agua utilizada para la irrigación de cultivos, por lo que el uso de agua residual sin tratamiento previo puede ocasionar contaminación de suelos, pero principalmente es una amenaza potencial para la salud de humanos y animales.

Elevadas concentraciones de Pb en el cuerpo humano puede alterar la función reproductora masculina limitando el número de espermatozoides, en cuanto a la femenina, se han atribuido al plomo algunos efectos adversos en el embarazo. Para el caso del Ni puede provocar erupción cutánea, cáncer pulmonar y bronquitis entre otros. El Cu en elevadas concentraciones puede ser tóxico para los seres humanos ya que altera el metabolismo y puede provocar hasta su muerte. El Zn y Fe pueden desvirtuar algunas funciones inmunológicas, presentando problemas gastrointestinales y hemorragias (Prieto et al., 2009).

El agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, la cual circula sobre el canal principal y canales secundarios, abarcando los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo contiene metales pesados, tales como el Pb, Ni, Cu, Fe y Zn, pero éstas concentraciones se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en norma. Sandoval *et al.*, (2009) reporta concentraciones de metales pesados en las aguas del río Atoyac por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, estos valores son muy similares a los reportados en el presente trabajo de investigación.

De acuerdo con lo establecido por Jones y Wolf (1994), así como por Ayers y Westcot (1987), los factores físicos y químicos se encuentran dentro de un rango normal, por lo que se puede usar para la irrigación de cultivos.

De acuerdo a los resultados obtenidos se da respuesta a la primera pregunta establecida en el planteamiento del problema, la cual menciona que si el agua residual que circula sobre el canal principal que abastece al módulo uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, conforme aumenta su recorrido, disminuye la concentración de metales pesados presentes en el agua, por lo que se puede establecer que en el caso del Pb y Ni la concentración permanece constante, sin embargo para el caso del Cu, Zn y Fe la concentración disminuye a lo largo de su recorrido.

Finalmente a la segunda pregunta establecida en el planteamiento del problema se puede mencionar que el agua residual que se emplea para riego en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, contiene metales pesados, pero estas concentraciones se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Los datos obtenidos del análisis físico y químico del suelo, la textura se caracteriza por ser franco arcillo arenosa y arcillo limosa, y son de los suelos más importantes desde el punto de vista agrícola, ya que son fácilmente laborables. El pH del suelo es medianamente alcalino, lo cual favorece la precipitación de metales pesados quedando inmóviles en suelo, también se descartan problemas de salinidad en los cinco sistemas de producción estudiados.

El contenido de materia orgánica se encuentra dentro de la clasificación muy baja en cuatro de los cinco sitios estudiados, a excepción del testigo, donde el contenido de materia orgánica fue mayor, lo cual puede deberse a la aplicación de estiércol en el suelo, debido a que es un rancho productor de leche.

El contenido de calcio y magnesio en suelo, esto de acuerdo con lo establecido en la norma NOM-021-RECNAT-2000.

La concentración de metales pesados disponibles en suelo (Pb y Ni), así como de micronutrientes disponibles en suelo (Cu, Zn y Fe) se encuentran dentro de los límites máximos permisibles en la norma NOM-021-RECNAT-2000, así como lo establecido por Kabata-Pendias 2004. Estos resultados contradicen a lo que podría esperarse de encontrar altas concentraciones de metales pesados al acumularse durante unos 20 años.

En el testigo se registraron concentraciones de metales pesados que se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000 y de acuerdo con lo establecido por Kabata-Pendias (2004), en ambas profundidades. El Cd y Ni fueron los dos metales pesados que no se detectaron en el testigo, y para el caso de micronutrientes (Cu, Zn y Fe) las concentraciones detectadas fueron mayores comparadas con los otros sitios de muestreo. Es importante mencionar que los suelos del testigo son regados con agua de pozo.

Por lo anteriormente mencionado, se puede establecer que la concentración de metales pesados en el suelo no se han acumulado a través del tiempo, es los suelos estudiados, ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, dando respuesta a la tercera pregunta establecida en el planteamiento del problema.

Finalmente la concentración de Ni en planta se encuentra dentro de la clasificación tolerable según lo establecido por Kabata-Pendias (2004). El contenido de micronutrientes (Cu, Zn y Fe) en planta se encuentra dentro de la clasificación deficiente según lo establecido por Kabata-Pendias (2004) y Mortuedt 1983.

Las concentraciones de metales pesados y micronutrientos en plantas del testigo se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, a excepción de plomo (Pb) que se encuentran dentro del nivel tóxico establecido por Kabata-Pendias (2004).

El plomo (Pb) es el único metal que excede los límites máximos permisibles en planta de acuerdo con lo establecido por Kabata-Pendias (2004), en todos los sitios de muestreo, registrándose elevadas concentraciones de éste metal en la hoja del fruto y tallo para el caso del maíz, y para el caso de la alfalfa se encontraron altas concentraciones en la hoja, lo cual resulta preocupante debido a que la alfalfa se utiliza para alimentar ganado lechero en la región de Tecamachalco.

Por lo anterior es importante mencionar que la absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso de su entrada en la cadena alimentaria, ya que después de la absorción por las plantas los metales están disponibles para animales y humanos, debido a que la ingestión de alimentos y bebidas es una fuente importante de entrada y asimilación de metales tóxicos en los seres humanos. Prieto et al., (2009) menciona que elevadas concentraciones de Pb en bebés y niños puede ocasionar retardo en desarrollo físico o mental, ya que podrían sufrir leve déficit de atención y de capacidad de aprendizaje. En adultos trastornos renales e hipertensión.

Con la finalidad de dar respuesta a la última pregunta establecida en el planteamiento del problema, se puede concluir que hay presencia de metales pesados en el suelo y de igual manera en planta, pero dichas concentraciones se encuentran dentro de los límites máximos permisibles a excepción del Pb, metal que está presente en planta, lo cual representa un problema para la salud humana y animal.

CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo al análisis realizado y a la discusión de resultados, se pueden mencionar las conclusiones sobre los objetivos e hipótesis planteadas en el presente trabajo de investigación.

- **En relación a los objetivos de investigación**

De acuerdo al objetivo general planteado en el presente trabajo de investigación se cumplió ya que se realizó la determinación de la concentración de metales pesados al agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho que abastece de agua a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo, así como las determinaciones de metales pesados en suelos y plantas ubicados en la misma zona.

En relación al primer objetivo específico planteado se puede concluir que se cumplió. Se realizó la determinación de la concentración de metales pesados como Pb, Cd, Ni, Cu, Fe y Zn, en el agua que circula sobre el canal principal y canales secundarios que abastecen de agua a los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo. El único metal pesado que no se detectó en ninguno de los sitios muestreados fue el Cd, sin embargo en Pb, Ni, Cu, Fe y Zn se detectaron en todos los sitios de muestreo, y éstos se encuentran dentro de los límites máximos permisibles.

El segundo objetivo específico se cumplió satisfactoriamente, determinando la concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe y Zn) en suelos y cultivos de maíz y alfalfa que son regados con agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho, ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.

En el caso del suelo, el Cd es el metal que no fue detectado en ninguno de los sitios muestreados.

Por otra parte, se detectó la presencia de los demás metales pesados (Pb, Ni, Cu, Fe y Zn) en suelo, sin embargo la concentración de cada metal, se encuentra dentro de los límites máximos permisibles establecidos en norma.

La concentración de metales pesados en cultivos de maíz y alfalfa se encontró dentro de los límites máximos permisibles establecidos en norma, a excepción del Pb, que se encuentran dentro del nivel tóxico, lo cual es un peligro para la salud humana, debido a que puede ocasionar efectos adversos en el embarazo, y los niños son más vulnerables a los efectos del Pb, provocando lesiones en riñones, hemorragias, etc.

- **En relación a las hipótesis planteadas en el presente trabajo de investigación**

La hipótesis general planteada la cual menciona que; el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho contiene elevadas concentraciones de metales pesados, provocando la contaminación de suelo y planta, se rechaza, debido a que el agua residual que circula sobre el canal principal y canales secundarios que abastecen de agua a los módulos uno, dos y tres, contiene metales pesados, pero se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en norma. De igual manera la concentración de metales pesados (Pb, Ni, Cu, Fe y Zn) en suelo se encuentra dentro de los límites máximos permisibles establecidos en norma. La concentración de Ni, Cu, Fe y Zn se encuentra dentro de los límites máximos permisibles, sin embargo la concentración de Pb en planta, se encuentra dentro del nivel tóxico, representando así, un riesgo para la salud humana y animal.

En relación a la primera hipótesis específica la cual establece que el agua residual proveniente de la presa Manuel Ávila Camacho contiene metales pesados que rebasan los límites máximos permisibles, no se puede rechazar completamente debido a que el agua residual contiene metales pesados, pero no rebasan los límites máximos permisibles establecidos en norma.

La segunda hipótesis específica establece que la concentración de metales pesados en el suelo y cultivos de maíz y alfalfa rebasan los límites máximos permisibles establecidos en norma no se puede rechazar por completo, ya que la concentración de metales pesados en los suelos muestreados se encuentran dentro de los límites máximos permisibles.

Para el caso de cultivos de maíz y alfalfa, la concentración de metales pesados como el Ni, Cu, Fe y Zn se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en norma, pero en el caso del Pb la concentración detectada se encuentra dentro del nivel tóxico, lo cual representa un riesgo para la salud humana y animal.

ESTRATEGIA PROPUESTA

Concepto de estrategia

Es la necesidad de cambiar o modificar elementos de la naturaleza de forma racional, con la finalidad de implementar y desarrollar acciones en función del tiempo, sin comprometer el medio ambiente (Notas del curso de estrategias).

La estrategia se convierte finalmente en el medio a través del cual se establecen una serie de acciones para contribuir a resolver un problema específico. Por lo anterior se deben considerar los objetivos del presente trabajo de investigación y el conjunto de acciones a implementar, con el objeto de cambiar de una situación actual a una diferente.

ANÁLISIS Y DESARROLLO DE LA ESTRATEGIA

A partir del diagnóstico de la situación actual identificada en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo (región de Tecamachalco), se logro conocer uno de los problemas más graves en la zona de estudio. Dicho problema está relacionado con una alta concentración de plomo (Pb) así como níquel (Ni) identificado en los cultivos de maíz y alfalfa, lo anterior representa un riesgo para la salud humana y animal, dado que ambos cultivos son de consumo en la unidad familiar. Las elevadas concentraciones de plomo (Pb) en planta, correspondieron al tallo y hoja del fruto para el caso del maíz, y en hoja para el caso de la alfalfa. El níquel (Ni) se detectó en el tallo, hoja de la milpa y hoja del fruto para el caso del maíz, y en el tallo para el caso de la alfalfa.

Con base en toda una metodología de campo y análisis de laboratorio de muestras de agua, suelo y planta, obtenidas en la zona de influencia donde se realizó el presente trabajo de investigación, se establece una estrategia, con algunas líneas de acción a seguir para contribuir a disminuir las concentraciones de Pb y Ni en los cultivos ya mencionados.

La estrategia que se propone, se prevé modificara constantemente el conocimiento y la realidad actual, por lo tanto se intenta prevenir lo que pueda ocurrir durante la aplicación de la misma.

Para realizar un análisis de los objetivos y como consecuencia formular estrategias para alcanzarlos, se realizó un análisis tipo FODA. A partir de los resultados de este análisis se definieron las estrategias que permitirán alcanzar los objetivos planteados.

Asignación de objetivos

OBJETIVO GENERAL

Contribuir a evitar la contaminación por plomo (Pb) en cultivos agrícolas producidos en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.



OBJETIVO ESPECÍFICO

Reducir la concentración de plomo (Pb), metal pesado presente en cultivos de maíz y alfalfa ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.



ACCIONES GENERALES A CONSIDERAR

- 1.- Informar a los agricultores sobre los daños por metales pesados
 - 2.- Capacitación sobre como disminuir el plomo (Pb) en el sistema de producción.
 - 3.- Identificar con precisión el origen del plomo (Pb) en planta.
 - 4.- Identificar con precisión en la zona de estudio, la gravedad del problema de salud ocasionada por metales pesados.
 - 5.- Búsqueda de tecnología apropiada para disminuir el plomo (Pb) en el sistema.
 - 6.- Conformar un equipo interdisciplinario para la implementación de la estrategia.
-
-



RESULTADOS ESPERADOS

- 1.- Disminuir la concentración de metales pesados en cultivos de maíz y alfalfa.
 - 2.- Mayor conocimiento por parte de los agricultores de los riesgos que hay al consumir productos contaminados por metales pesados.
 - 3.- Identificación del origen de la concentración de plomo (Pb) en planta.
 - 4.- Adopción de nuevas tecnologías para la disminución de plomo (Pb) en el sistema.
 - 5.- Equipos y programas de trabajo para la implementación de la estrategia.
-
-

Los resultados del presente trabajo muestran que hay presencia de metales pesados en suelo y planta, en los diferentes sistemas de producción estudiados donde se cultiva maíz y alfalfa, entre ellos están: plomo, níquel, cobre, hierro y zinc.

Si bien, los últimos tres son considerados como micro-nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas, y que sus concentraciones no son consideradas como tóxicas, en el caso de Pb y Ni, ocurre lo contrario estos son un peligro para los seres humanos y animales que los ingieren a través de la ingesta, sobre todo cuando el agricultor desconoce la presencia de los mismos en sus cosechas.

Debido a la ingestión de productos contaminados por plomo (Pb), éste puede alterar la función reproductora masculina, en cuanto a la femenina, puede ocasionar efectos adversos en el embarazo. Para el caso del níquel (Ni) alguno de los síntomas por la ingestión de éste metal, o en su defecto, el contacto directo con la piel puede provocar erupción cutánea, cáncer pulmonar, bronquitis crónica, entre otras.

Análisis FODA

El FODA es una herramienta de análisis estratégico que permite analizar elementos internos o externos de programas y proyectos, el cual se representa a través de una matriz de doble entrada llamada Matriz FODA, en la que el nivel horizontal se analizan los factores positivos y los negativos, en la lectura vertical se analizan los factores internos y por tanto controlables del programa o proyecto y los factores externos, considerando no controlables. Son cuatro las acciones que propone revisar: Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (Notas del curso de estrategias).

En el Cuadro 30 se presenta la matriz FODA.

Cuadro 30. Matriz de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas

| | | |
|---|--|---|
| <p>Objetivo: Contribuir a evitar la contaminación por plomo (Pb) en cultivos agrícolas ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo.</p> | <p>Fortalezas Disponibilidad de los agricultores para realizar actividades productivas. Disponibilidad anual de un volumen seguro de agua de la presa Valsequillo. Suelos de muy buena calidad para la producción de cultivos. Excelentes vías de comunicación en Tecamachalco y acceso a otros municipios.</p> | <p>Debilidades Volumen incierto de agua y carencia de sistemas de uso eficiente para irrigación de cultivos. Zona vedada para la perforación de nuevos pozos de extracción de agua subterránea. Abatimiento de mantos acuíferos para cubrir el servicio de agua potable y las actividades agrícolas. Carencia de tecnología e infraestructura en el sector agropecuario de subsistencia.</p> |
| <p>Oportunidades Disponer de recursos y/o programas que estén dirigidos al desarrollo agrícola en la región de Tecamachalco. Cercanía y acceso al mercado más grande de productos agrícolas del sureste del país.</p> | <p>Potencialidad Expansión de mercados, nacionales e internacionales.</p> | <p>Desafíos Lograr el financiamiento para tecnología.</p> |
| <p>Amenazas Clima semiárido y escasa precipitación pluvial. Pérdida de recursos naturales (agua). Efectos negativos en la salud humana y animal, debido a elevadas concentraciones de plomo (Pb) en cultivos de maíz y alfalfa. Elevadas concentraciones de Pb puede ocasionar hasta la muerte en seres humanos. Sobreexplotación de agua subterránea. Uso de agua residual para irrigación de cultivos.</p> | <p>Riesgos Elevadas concentraciones de plomo (Pb), metal presente en cultivos de maíz y alfalfa. Absorción de metales pesados por las plantas es el primer paso para la entrada de estos a la cadena alimentaria.</p> | <p>Limitaciones Información parcial de los posibles daños que puede ocasionar el uso de aguas de la presa Valsequillo. Acceso a la información de primera mano sobre la situación que priva en la agricultura de riego con agua de la presa Valsequillo.</p> |

En el Cuadro 31 se presenta el planteamiento de la estrategia, de acuerdo los resultados obtenidos del análisis FODA.

Cuadro 31. Planteamiento de la estrategia

| Objetivo general | |
|---|---|
| Contribuir a evitar la contaminación por plomo (Pb) en cultivos agrícolas ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo. | |
| Objetivo específico: | Estrategias: |
| 1. Reducir la concentración de plomo (Pb), metal pesado presente en cultivos de maíz y alfalfa ubicados en los módulos uno, dos y tres del Distrito de Riego 030 Valsequillo. | <p>1.1 Realizar reuniones y talleres participativos para informar a los agricultores de la zona estudiada los problemas que ocasiona al ser humano y animales la ingestión de productos contaminados por metales pesados como es el caso del plomo (Pb).</p> <p>1.2 Realizar cursos de capacitación con los agricultores para hacerles llegar técnicas para disminuir la concentración de plomo y níquel en los sistemas agrícolas de producción.</p> <p>1.3 Realizar más estudios de laboratorio para identificar si el plomo (Pb) contenido en planta se debe a fuentes aéreas.</p> <p>1.4 Realizar un censo en la zona de estudio para determinar si existe casos graves en la salud humana por ingestión o exposición de metales pesados.</p> <p>1.5 Tecnificación de las actividades agropecuarias, planteando la utilización de sistemas riego económicos y accesibles para los agricultores de la zona, que permitan el uso eficiente del agua.</p> <p>1.6 Formar equipos de trabajo conformados por investigadores, estudiantes y agricultores con la finalidad de implementar y llevar a cabo estrategias de solución a corto plazo.</p> |

LITERATURA GENERAL CITADA

Aksu, Z., 2001. Equilibrium and kinetic modelling of cadmium(II) biosorption by *C. vulgaris* in a batch system: effect of temperature. *Sep. Purif. Technol.* 21: 285-294.

Al-Lahham O., El Assi N. M., Fayad M. 2007. Traslocation of heavy metals to tomato (*Solanum lycopersicom L.*) fruit irrigated with treated wastewater. *Elsevier. Scientia Horticulturae* 113: 250-254.

Al-Jamal, M. S. Sammis, T. W. Mexal, J. G. Picchioni G. A. and Zachritz, W. H. 2002. A growth-irrigation scheduling model for wastewater use in forest production. *Agricultural Water Management.* 51: 53-78.

Al-Nakshabandi, G. A. Saqqar, M. M. Shatanawi, M. R. Fallad, M. R. and Al-Horani, M.H. 1997. Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan. *Agricultural Water Management.* 32: 307-320.

Alloway, B.J. 1995. Cap.3: The origin of the heavy metals in soils. In: Alloway, B.J. (ed.). *Heavy metals in soils.* Blackie Academic and Professional, London, 2da. Edition. 38-57 pp.

Arnason, J. y Fletcher, B., 2003. A 40+ year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition in sediments of Patroon Reservoir, Albany Country, NY, USA. *Environmental Pollution.* 123: 383-391.

Atlas del agua en México. 2009. Comisión Nacional del Agua. Primera impresión. 126 pp.

Barceló, J. and Poschenrieder, C. 2003. Phytoremediation: principles and perspectives. *Contributions to Science* 2: 333-344.

Bhattacharyya P., Tripathy S., Chakrabarti K., Chakraborty A., Banik P. 2008. Fractionation and bioavailability of metals and their impacts on microbial properties in sewage irrigated soil. Elsevier. *Chemosphere* 72: 543-550.

Bohn H. L., McNeal B. L. y O'Connor G. A. 1993. Química del suelo. Primera Edición. Editorial Limusa. México, D. F. 370 pp.

Carrillo G. R. y Cajuste L. J. 1991. Concentraciones de Pb, Cr y Cd en alfalfa regada con aguas residuales. La investigación Edafológica en México 1990-1991. Memorias del XXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hidalgo, México. pp 73.

Carrillo G. R. and Cajuste L. J. 1992. Heavy metals in soils and alfalfa (*Medicago sativa* L.) irrigated with three sources of wastewater. *Rev. J. Environ. SCI. Health A*. 27: 1771-1783.

Castillo D. L., López R. L., Ticante R. J. A., Muñoz G. A. A. 2007. Incidencia de enterobacterias multirresistentes a los antibióticos y metales pesados en aguas residuales de la ciudad de Puebla, México. VI Congreso Internacional y XII Nacional de Ciencias Ambientales. Chihuahua, Chih. México

Chang, A.C.; Granato, T.C.; Page, A.L. 1992. A methodology for establishing phytotoxicity criteria for chromium, copper, nickel, and zinc in agricultural land application of municipal sewage sludges. *Journal Environmental Quality*, 21: 521-536.

Clemente R., Walker D. J., Bernal M. P. 2005. Uptake of heavy metals and As by *Brassica juncea* grown in a contaminated soil in Aznalcóllar (Spain): The effect of soil amendments. Elsevier. Science direct. *Environmental Pollution* 138: 46-58.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2000a. Diagnóstico de cobertura de lirio acuático en la presa Manuel Ávila Camacho "Valsequillo", México, Puebla.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2010. Subdirección de Consejos de Cuenca, Gestión Social y Atención de Emergencias. México, Puebla.

Corinne P. R., Fang-Jie Z., Steve P. 2006. Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: Influence of soil properties, Ni solubility and speciation, *Environmental Pollution* 145: 596-605.

Diario Oficial. 2009. Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero 2101 Valle de Tecamachalco y se modifican los límites y planos de localización que respecto del mismo se dieron a conocer en el acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización.

Environmental Protection Agency (EPA). 2004. Reporte de calidad del agua potable. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories EPA 822-R-04-005.

Fergusson J.F., 1990. *The heavy Elements. Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Pergamon Press.

Frieden E., 1972. The Chemical Elements of life. *Scientific American*. 52-60 pp.

García I. and Dorronsoro C. 2005. Contaminación por metales pesados. En tecnología de suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. <http://edafologia.ugr.es>.

Gupta U. C. y Gupta S. C. 1998. Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: implications for management. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29:1491-1522.

Hettiarchchi G. M. and Pierzynski G. M. 2002. In situ stabilization of soil lead using phosphorus and manganese oxide: Influence of plant growth. *Journal Environmental Quality*. 31: 564-573.

Inglezakis, V. J., Loizidou, M. D., Grigoropoulou, H. P. 2002. Equilibrium and Kinetic ion exchange studies of Pb^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} and Cu^{2+} on natural clinoptilolite. *Water Res.* 36: 2784-2792.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2008. Estados Unidos Mexicanos. Sistema de Información Geográfica.

Jarup L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *Brit. Med. Bull.* 68: 167-182.

Kabata-Pendias A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue. *Geoderma*, 122: 143-149.

Kiziloglu F. M., Turan M., Sahin U., Kuslu Y., Dursun A. 2008. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. Elsevier. *Science Direct. Agricultural Water Management* 95: 716-724.

Kunwar P. S., Dinesh M., Sinha S. y Dalwani R. 2004. Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural and environmental quality in the wastewater disposal area. Elsevier. *Chemosphere* 55: 227-255.

Lacour, S., Bollinger, J. C., Serpaud, B., Chantron, P., Arcos, R., 2001. Removal of heavy metals in industrial wastewaters by ion-exchanger grafted textiles. *Anal. Chim. Acta* 428: 121-132.

Lasat M.M., 2000. The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow. 33pp.

Lee S. and Moon H. S. 2003. Heavy metals in the bed and suspended sediments of Anyang River, Korea: Implications for water quality. *Environmental Geochemistry and Health*. 25: 433-452.

Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). 2006. Agenda Ecológica. Ediciones Fiscales ISEF S. A.

Lucho-Constantino C. A., Prieto G. F., Del Razo L. M., Rodríguez V. R., Poggi V. H. M. 2004. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. Elsevier. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 108: 57-71.

Lucho C. A., Prieto F., Del Razo L. M., Rodríguez R. y Poggi H. (2005). Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 108: 57-71.

Mahmood, B. Wall G. L. and Russell J. M. 2002. A physical model to make shortterm management decisions at effluent-irrigated land treatment system. *Agricultural Water Management*. 56: 57-79.

Mahdy A. M., Elkhatib E. A. and Fathi N. O. 2007. Cadmium, Copper, Nickel, and Lead Availability in Biosolids-amended Alkaline Soils, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 1: 354-363.

Mahler R.L. 2003. General overview of nutrition for field and container crops. In: Riley, L. E.; Dumroese, R. K.; Landis, T. D. Tech Coords. National Proceeding: Forest and Conservation Nursery Associations. 6: 9-12.

Malla R., Tanaka Y. and Mori K. L. 2007. Shortterm effect of sewage irrigation on chemical build up in soils and vegetables. The Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal. Manuscript LW 07 006 Vol. IX.

Martínez R. L. M., Carranza M. A., García M. y Aguirre G. A. 1998. Impacto sobre los recursos naturales del Río Ayuquila por actividades agropecuarias urbanas e industriales. La investigación Edafológica en México 1997-1998. XXIX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Tapachula, Chiapas. pp 56.

Méndez G. T., Rodríguez D. L., Palacios M. S. 1998. Índices de contaminación por Cu, Cd, Ni, Pb y Zn en suelos agrícolas regados con agua residual del Río Atoyac, Estado de Puebla. La investigación Edafológica en México 1997-1998. XXIX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Tapachula, Chiapas. pp 50.

Méndez G. T., Rodríguez D. L., Palacios M. S. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. Terra Latinoamericana. 18: 277-288.

Miller J. R., Hudson-Edwards K. A., Lechler P. J., Preston D., Macklin M. G. 2003. Heavy metal contamination of water, soil and produce within riverine communities of the Río Pilcomayo basin, Bolivia. Elsevier. Science of the Total Environment 320: 189-209.

Mortuedt J. J., Giordano P. M., Lindsay W. L. 1983. Micronutrientes en la agricultura. Primera Edición. AGT Editor, S. A. México D. F. 742 pp.

Murray B. M. 1994. Environmental chemistry of soils. New York Oxford. Oxford University Press. 3th Edition. New York, New York, U.S.A. 308pp.

Navarro B. S. y Navarro G. G. 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

Navarro A. J. P., Aguilar A. I. y López M. J. R. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. Vol. XVI. No. 002.

Nriagu, J.O. 1990. Global metal pollution. Poisoning the biosphere? *Environment*, 32: 28-33.

Oliver M. A. 1997. Soil and human health: a review. *European Journal of Soil Science* 48: 573-592.

Ortíz F. P. y Amado A. J. P. 2001. Uso del agua de la laguna de Bustillos para la producción de maíz. *Terra Latinoamericana*. 19: 183-189.

Paredes R. S. R., Aguilar N. J. A. y Navarro Q. A. 2001. Determinación de metales pesados y sales solubles en suelos de cultivo acondicionados con lodos residuales. *Conciencia Tecnológica*. 16: 4-8.

Pérez O. M. A., García M. R., Vázquez A. A., Colinas L. T., Pérez G. M. y Navarro G. H. 2008. Concentración de Pb, Cd, Ni y Zn en suelos contaminados y su transferencia a la pella de brócoli. *Terra Latinoamericana*. 26: 215-225.

Prieto F., Báez A. O., Scoot W., Gaytán J. C. and Zúñiga A. 2006. Acumulación, Toxicidad y teratogénesis provocada por presencia de arsenic en aguas en el pez cebra (*Danio rerio*). Revista AquaTIC, Revista científica de la Sociedad Española de Acuicultura. 24: 72-85.

Prieto G. F., Martínez P. F. H., Méndez M. A. and Prieto M. J. 2007. Presencia de metales pesados en cultivos de Actopan e Ixmiquilpan, Valle del Mezquital, México, por riego con aguas negras. Revista Latinoamericana. Recursos Naturales. México 3: 100-111.

Prieto M. J., González R. C. A., Román G. A. D. y Prieto G. F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 10: 29-44.

Rattan R. K., Datta S. P., Chhonkar P. K., Suribabu K., Singh A. K. 2005. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater-a case study. Elsevier. Science direct. Agriculture, Ecosystems and Environment 109: 310-322.

Rodier J. M. 1990. Análisis de las aguas. Aguas naturales, aguas residuales y aguas de mar. Ediciones Omega. 1059 pp.

Sandoval V. A. M., Pulido F. G., Monks S., Martínez G. A. J. y Villegas V. E. C. 2009. Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del Río Atoyac, México. Interciencia. 12: 880-887.

Seoáñez C. M. 1999a. Contaminación del Suelo: Estudios, tratamiento y gestión. Ediciones Mundi Prensa. Barcelona – México. pp 152.

Seoáñez C. M. 1999b. Aguas residuales urbanas. Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento. Segunda Edición, Mundi prensa. España. 76 pp.

Spain, A. 2003. Implications of microbial heavy metals tolerance in the environment. *Reviews In Undergraduate Research*. 2:1-6.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2008. Superficie sembrada y cosechada, volumen y valor de la producción agrícola y principales cultivos. Año agrícola, 2009. México, Puebla.

Puga S., Sosa M., Lebgue T., Quintana C. y Campos A. 2006. Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*. 5: 149-155.

Tamaríz F, J.V. 1996. Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados en el municipio de Atlixco, Puebla. Tesis de Maestría en Edafología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México

Tisdale L. S. y Werner L. N. 1970. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Ed. Montaner y Simen, S. A. Barcelona, España. 760 pp.

Thompson L. M. y Troeh F. R. 1982. Los suelos y su fertilidad. Cuarta Edición. Editorial Reverté, S. A. Barcelona, España. 649 pp.

Urbano T. P. y Rojo H. C. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas. Primera Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 1045 pp.

Valdés, P. yM. Cabrera. 1999. La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México. Texas Center for Policy Studies. Ciudadanía Lagunera por los Derechos Humanos y En Defensa del Ambiente (CILADHAC). Torreón, Coah., México.

Vázquez A. A., Cajuste L. J., Siebe G. C., Alcántar G. G., y De la Isla B. M. L. 2001. Cadmio, Niquel y Plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México, *Agrociencia* 35: 267-274.

Velasco C., R. y S. Martínez, D. 1985. Evaluación de métodos de muestreo para dos manejos de suelo diferentes en Valles Centrales de Oaxaca. Tesis Profesional. UACH, Chapingo, México.

Volesky, B., 2001. Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy* 59: 203-216.

Walker C., and Lin H. S. 2008. Soil property changes after four decades of wastewater irrigation: A landscape perspective. *Catena* 73: 63-74.

Woodwell G. M. 1967. Toxic substances and ecological cycles. *Scientific American*. 24 -31 pp.

Yépez T. G., Luque O., Rodríguez O., Silva O. 2003. Boletín Vetiver. Publicación divulgativa de la Red Latinoamericana del Vetiver. RLAV. Caracas, Venezuela.