

---

Universidad Nacional Autónoma  
de México



Facultad de Estudios Superiores  
Iztacala



**“Estudio de la contaminación por metales pesados en el municipio de  
Guadalupe, Zacatecas.”**

TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
B I Ó L O G O  
P R E S E N T A :  
**MARCO ANTONIO SÁNCHEZ GUERRA**

Director de tesis: Dr. Mario A. Yarto Ramírez

Tlalnepantla, Estado de México, 2005

---



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Dedicatorias

**A mi madre:** con mucho cariño y admiración,  
Por sus esfuerzos, apoyo y confianza,  
Sobre todo por hacer de mi lo que soy  
E inspirarme a ser mejor cada día.

A mi padre por su apoyo brindado  
Durante toda mi vida  
Y enseñarme a valerme por mi mismo.

A mis hermanos por existir, ser como son  
Y brindarme su apoyo en momentos difíciles,  
Ojala sigan superándose y sean mejores personas.

A mi abuelo Roberto quien siempre estuvo pendiente  
Y me enseñó grandes cosas y con el cual viví  
Momentos extraordinarios.

**A la memoria de mi Madre Amalia Guerra Hernández  
Y a mi abuelo Roberto Sánchez Pérez**

## **Agradecimientos**

Al **Instituto Nacional de Ecología** (INE) por todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A mi asesor: **Dr. Mario Alberto Yarto Ramírez**, por su apoyo, tiempo y hacer posible el trabajar bajo su asesoría y permitirme realizarme no solo como profesionalista sino también como persona.

Al **M. en C. Arturo Gavilán García** quien siempre me apoyo durante el desarrollo de la tesis con sus amplios conocimientos en el tema y sus excelentes sugerencias para hacer posible esta tesis. Mil gracias.

A mis revisores de tesis: Dr. Chazaro Olvera; M. en C. Irma Delfín; M. en C. Jonathan Franco y al M. en C. Rafael Chávez, por sus valiosas contribuciones a mi trabajo y mejorarlo. Gracias por su valioso tiempo.

A los subdirectores: José Castro y a la M. en C. Irina Ana Rosa Izel Lema, del departamento de Investigación sobre Sustancias Químicas y Riesgos Ecotoxicológicos del Instituto Nacional de Ecología por su apoyo y amabilidad mostrada durante mi estancia en el Instituto.

Al Dr. Raymundo Montoya por su apoyo, tiempo y ayudarme a realizar los mapas de la tesis. Gracias.

Al Biólogo Ángel Lara por su apoyo en el análisis estadístico y por su amistad.

A Gretchen Stevens quien me ayudo y asesoro en la parte de Salud Publica; Gracias por su amistad y apoyo durante todo el tiempo que la conozco.

A mis tíos: Miguel Sánchez y Raquel García por su apoyo.

A mis amigos: Atzel Chávez y Daniel Flores con los que he pasado muchas locuras y crudas, y que me han brindado su apoyo y amistad incondicionalmente.

A Monse por su amistad sincera y apoyo, que me han ayudado muchísimo. Y sobre todo por los buenos momentos de trabajo en arrecifes de coral.

A todas mis amigas y amigos de la maestría por su amistad.

A todos mis compañeros y todos lo que ahora pudiera olvidar, pero que son parte importante de mi vida.

## Índice

|  |    |
|--|----|
| Introducción                                       | 7  |
| Antecedentes                                       | 10 |
| a) Históricos                                      |    |
| b) Sobre trabajos realizados en el área de estudio |    |
| Objetivo General                                   | 13 |
| A) Objetivos específicos                           |    |
| Alcances   | 14 |
| Justificación                                      | 15 |
| Descripción del área de estudio                    | 16 |
| a) Geología  |    |
| b) Estratigrafía                                   |    |
| c) Geología económica                              |    |
| d) Yacimientos minerales                           |    |
| e) Fisiográfica                                    |    |
| f) Edafología                                      |    |
| g) Agricultura y ganadería                         |    |
| h) Usos principales del agua                       |    |
| i) Vegetación                                      |    |
| j) Fauna   |    |
| k) Climas  |    |

|  |    |
|--|----|
| Muestreo y análisis de metales en el municipio de Guadalupe, Zacatecas | 25 |
| Metodología  | 26 |
| a) Caracterización del sitio   |    |
| b) Muestreo de suelos  |    |
| c) Muestreo de cultivos  |    |
| d) Análisis estadístico y digitalización de mapas                      |    |
| e) Evaluación de riesgos   |    |
| f) Diagrama de flujo de la metodología                                 |    |
| Resultados   | 33 |
| a) Análisis de suelos agrícolas  |    |
| b) Mapas digitales de distribución de la contaminación por metales     |    |
| c) Análisis de suelos superficial en escuelas                          |    |
| d) Análisis de cultivos  |    |
| e) Evaluación de riesgos   |    |
| a. Adultos   |    |
| b. Niños   |    |
| Análisis de resultados   | 59 |
| Conclusiones   | 63 |
| Recomendaciones  | 64 |
| Literatura citada  | 65 |
| Anexo A  | 70 |

## Resumen

En los últimos años la contaminación por metales pesados se ha convertido en tema de interés público tanto en el campo ambiental como en el de salud pública, por los daños que estos pueden ocasionar. Este trabajo se realizó con la finalidad de evaluar la contaminación por metales pesados y los problemas que estos pudieran generar a la salud en el Municipio de Guadalupe, Zacatecas, región caracterizada por haber sido una zona muy importante en la actividad minera y en la cual se han depositado grandes cantidades de jales. Se determinaron niveles de metales pesados (Cd, Hg y Pb incluido el As más por su toxicidad que por su peso específico) en muestras de suelo, vegetales (frijol y maíz) y muestras de suelo de patios escolares, además se realizó una estimación del riesgo a la salud mediante el cálculo del Índice de Peligro (HQ), en la zona de estudio la contaminación se restringe a la zona que se encuentra al norte de la Presa la Zacatecana y al sur de Zoquite -de todos los metales evaluados el Cd nunca estuvo por arriba del nivel establecido por la EPA-, no se encontró correlación entre los niveles en el suelo y los niveles detectados en las muestras de vegetación, lo cual nos indica que los metales no se encuentran biodisponibles y al hacer el Cálculo de HQ la población que pudiera estar en riesgo son los niños, sin embargo se cree que no hay ningún riesgo de desarrollar enfermedades ocasionados por estos metales.

## Introducción

En los últimos años los metales pesados se han convertido en un tema de interés público tanto en el campo ambiental como en el de salud pública. Los daños que éstos pueden causar son severos y en muchas ocasiones se presentan de manera asintomática, por lo que las autoridades ambientales y de salud a nivel mundial han puesto especial atención en minimizar la exposición de la población, en particular de la población infantil, a estos elementos tóxicos.

Algunos de los casos más sonados de contaminación por metales ocurridos en México son, el envenenamiento por plomo entre la población infantil de Torreón, Coahuila por la operación de la empresa Industrias Peñoles<sup>46</sup>; el de contaminación de suelos por la empresa Cromatos de México, que hasta 1978 operó en el municipio de Tultitlán, Estado de México, en la cual se encuentran depósitos estimados en 75,000 toneladas de cromo hexavalente<sup>30</sup>, lo que ha traído como consecuencia un aumento en los casos de cáncer en pulmones, daño permanente en ojos, irritación en nariz, garganta y pulmones<sup>36</sup>. Otra fuente importante de contaminación por metales pesados en México son los sitios mineros, en los cuales se presentan dos principales fuentes contaminantes: el proceso primario de extracción de metales, y la generación de residuos mineros (jales). Al respecto cabe mencionar que la minería genera 65% de los residuos industriales que se producen en México<sup>37</sup>. En un sitio minero, las principales rutas de exposición pueden ser atribuidas al material particulado en el aire; el suelo contaminado (por el polvo generado desde la mina, por el material proveniente de los jales o por la depositación del material particulado del aire); el polvo contaminado y dependiendo del área geográfica, la contaminación de cuerpos de agua por el lavado de jales o de suelos contaminados. En consecuencia, las zonas mineras deben ser consideradas como sitios potencialmente peligrosos para la salud<sup>22</sup> hasta contar con estudios que nos permitan evaluar el riesgo asociado a estas actividades.



La actividad minera en la zona de estudio se inicio en el siglo XVI, con la extracción de plata y oro principalmente. Está actividad económica resulta importante para el Estado de Zacatecas y actualmente representa el 3.3% del PIB<sup>1</sup>. Sin duda la industria minera es una de las más antiguas y de mayor utilidad para el hombre, pero también tiene un alto impacto en virtud de que afecta el ambiente, desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua superficiales y sub-superficiales. Esta actividad genera una gran cantidad de desechos sólidos, líquidos y gaseosos, principalmente en forma de gases, humos, partículas, aguas residuales y jales (colas y escorias), además de aceites, llantas, plásticos, etcétera<sup>13</sup>.

A pesar de que no existe suficiente información para apreciar el costo del impacto ambiental que ha causado la minería en México, se reconoce que tiene efectos significativos y que supera a la afectación generada por otras ramas industriales. La actividad minera, que ha sido uno de los pilares del desarrollo de México, se inició en la época prehispánica. De dicha época datan los trabajos mineros subterráneos realizados en las zonas de Taxco, Pachuca, Guanajuato y la Sierra Gorda de Querétaro. Fue en la época colonial cuando la minería se desarrolló con mayor intensidad y de hecho se constituyó en un motor importante de la colonización del territorio de la Nueva España. Gracias a la minería se fundaron la mayoría de las ciudades coloniales y se construyeron caminos, además de que se estimuló la investigación. La mayor parte de los distritos mineros se ubicaron en zonas montañosas, áridas y apartadas. No se tienen registros de explotación de yacimientos de importancia en las llanuras costeras, ni en Chiapas y tampoco en la península de Yucatán. Entre los elementos potencialmente tóxicos más comúnmente presentes en los jales de las minas mexicanas están: plomo, cadmio, zinc, arsénico, selenio y mercurio.

A este respecto, la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA) fue creada por Canadá, México y los Estados Unidos, en 1994, para abordar las preocupaciones ambientales por las sustancias químicas, tóxicas y persistentes en América del Norte. Mediante la instrumentación de Planes de

Acción Regional de América del Norte (PARANs), se establecen acciones trinacionales para reducir o eliminar el uso, producción, almacenamiento y manejo de las sustancias que han sido seleccionadas por un Comité conjunto. A la fecha se han desarrollado cuatro Planes de Acción Regional para América del Norte (PARANs) de manejo de sustancias químicas de interés para los tres países. Entre estas se incluye al mercurio<sup>7,17</sup>.

Este trabajo de investigación fue coordinado por el Instituto Nacional de Ecología para proporcionar información relevante para el cumplimiento de algunas de las acciones comprometidas por el gobierno de México en el Plan de Acción Regional en lo que respecta a la contaminación por mercurio. En adición al mercurio, se incluyó a otro grupo de metales como el plomo, cadmio, y arsénico en muestras de suelo del municipio de Guadalupe, Zacatecas, lugar donde previamente se realizó un muestreo prospectivo con la finalidad de conocer el grado de contaminación en el suelo por metales pesados, y sentar las bases para realizar un estudio con mayores alcances en la región, debido a que el mercurio, plomo y cadmio se incluyen entre los metales tóxicos más generalizados y a que han generado casos de intoxicación en la población expuesta en la zona. A pesar de que a este grupo de metales se le conoce normalmente como “**metales pesados**”, en él se suele incluir a otros elementos como el **arsénico**, más por su toxicidad que por su peso específico, además de ser un componente importante de los jales mineros y estar registrado en la literatura como un elemento tóxico y carcinogénico responsable de serios problemas ambientales en todo el mundo. Ejemplo de esto, son las altas concentraciones en el agua de beber que causara envenenamientos crónicos en la India, Bangladesh, Mongolia, Argentina, Chile y Taiwán<sup>18, 23</sup>.

## **Antecedentes**

Desde finales del siglo XV, en el municipio de Guadalupe en el Estado de Zacatecas, se acumularon depósitos de jales procedentes de la actividad minera de extracción de plata por el proceso de amalgamación en el cual se mezcla el mineral de oro y plata con mercurio y sales de cobre y hierro para formar una amalgama a partir de la cual se puedan recuperar los metales preciosos. Posteriormente se realiza la recuperación final del metal precioso con un fuerte calentamiento de la aleación (evaporación del mercurio) o la utilización de ácido nítrico (disolución del mercurio), proceso de recuperación que tiene una baja eficiencia, tal que en la actualidad el contenido de oro y plata presente en dichos jales, los hace económicamente atractivos, sin embargo son ricos también en mercurio<sup>29</sup>. Actualmente, la actividad minera en la zona representa el 3.3% del PIB del estado de Zacatecas<sup>1</sup> estando por arriba de los servicios bancarios (1.2% PIB) y de la electricidad, gas y agua (2.0% PIB).

El proceso de beneficio de jales, utilizado para la extracción de metales preciosos de jales previamente procesados, utiliza los métodos de lixiviación y precipitación, en el cual se utiliza una solución de hiposulfito doble de calcio y cobre para la recuperación de los metales, conteniendo 1.5% de hiposulfito de calcio y 0.15% de hiposulfito de cobre<sup>8</sup>.

Los primeros reportes de estudios realizados en la zona para determinar niveles de metales pesados en los jales, fueron realizados por Stihlknecht en 1916, Wuench en 1931 y la Comisión de Fomento Minero en 1981<sup>29</sup>. Los resultados de estos estudios se resumen en la Tabla 1

| Estudio/Informe/Reporte | Toneladas (ton) de jales | Concentración de Hg (g de metal/ton de jale) | Concentración de otros metales. |
|-------------------------|--------------------------|--|---------------------------------|
| Stihlknecht             | 5,950,000                | 650g/ton                                     | ND                              |
| Wuench                  | 9,100,000                | 346g/ton                                     | ND                              |
| Fomento minero          | 4,210,290                | 500g/ton                                     | 2580g Pb/ton<br>350g As/ton     |

ND: No Disponible

**Tabla 1 Concentración de metales en jales, resultados de estudios realizados en el Estado de Zacatecas.**

En 1994 Kilborn Engineering Pacific Ltd. realizó una proyección económica de los jales, reportados por Wuench, asumiendo que estos han permanecido estables a lo largo del tiempo, y reporta una concentración de 350 g de Hg/ton<sup>29</sup>.

En 1994 la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) reportó un análisis de los sedimentos de la Presa La Zacatecana (Pedernalillo), mismo que señala la presencia de altas concentraciones de: arsénico, mercurio y bario<sup>29</sup> debido a escurrimientos y lixiviación.

La compañía Plata Panamericana, realizó estudios de impacto ambiental en sedimentos y aguas de la Presa La Zacatecana en 1995, así como del agua subterránea en la zona del Pedernalillo, encontrando concentraciones de mercurio, plomo, arsénico y bario por encima de la concentración máxima permisible por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA)<sup>29</sup>.

En septiembre de 1998 la Universidad Autónoma de San Luis Potosí realizó estudios de concentración de Hg y Pb en suelo del Pedernalillo, agua y trabajadores de 2 plantas de reprocesamiento de jales, en los cuales se detectaron niveles por encima del límite permitido tanto para el mercurio como para el plomo<sup>29</sup>.

En 2002 la Unidad Académica de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) realizó un inventario del contenido de arsénico en agua potable, embotellada, superficial y subterránea del Estado de Zacatecas. En este estudio todos los puntos estuvieron por debajo del límite permitido por la USEPA <sup>29</sup>.

En julio del 2002 se llevo a cabo un muestreo prospectivo por parte de la empresa Canadiense BARENCO, Inc. y el Instituto Nacional de Ecología (INE) con la finalidad de determinar el grado de contaminación por metales pesados y así tener un mejor panorama para delimitar el área donde sería necesario realizar un muestreo más completo; en dicho muestreo prospectivo se hicieron análisis de cuatro muestras de suelo, cinco de vegetales y una del suelo de una escuela. Como resultado del estudio prospectivo se concluyó que era necesario evaluar con mayor amplitud el grado y alcance de la contaminación del suelo y la vegetación en la región de Guadalupe, Zacatecas<sup>31</sup>.

## **Objetivos:**

### **Objetivo general**

- Determinar el grado de la contaminación ambiental por metales pesados y los riesgos a la salud de la población, derivados de la contaminación de suelos agrícolas por residuos de origen minero en el municipio de Guadalupe, Zacatecas.

### **Objetivos específicos**

- Identificar las principales zonas con jales con un alto contenido de metales pesados en el municipio de Guadalupe, Zacatecas.
- Realizar un muestreo de suelos y cultivos agrícolas para el análisis de metales pesados: plomo, mercurio, cadmio y arsénico.
- Evaluar la contaminación presente, a través de los resultados de los muestreos realizados.
- Estimar los riesgos asociados con la presencia de metales pesados en suelos de uso agrícola en la región de Guadalupe, Zacatecas.

## Alcances

En este estudio sólo se analizaron muestras de suelo en la zona ubicada entre las poblaciones de San Jerónimo y Tacoaleche, en el municipio de Guadalupe.

La estimación de riesgos se realizó utilizando información geográfica disponible, los resultados analíticos de las muestras tomadas en el sitio de estudio, y las técnicas de evaluación de riesgos de *Integrated Risk Information System* (IRIS) de la USEPA <sup>44</sup>.

El presente estudio no considera la contaminación por otros metales que pudiesen estar contenidos en los jales como el zinc, cobre, antimonio o plata, entre otros. Debido a que de acuerdo a la literatura revisada, el mercurio, el cadmio, el arsénico y el plomo son los metales de mayor peligrosidad y que con mayor frecuencia se encuentran en los jales.

El diseño y toma de muestras (vegetación y suelo) se realizaron previo al inicio del presente estudio, por personal del Instituto Nacional de Ecología (INE) y de la empresa Canadiense Barenco Inc<sup>31</sup>, las muestras fueron analizadas por PSC Analytical Services, en Burlington; Ontario, institución acreditada por la Asociación Canadiense de Laboratorios de Análisis Ambientales (CAEAL).

## Justificación

El problema de la contaminación de suelos asociado a la actividad minera en México es de gran importancia debido a los impactos ambientales y riesgos a la salud humana por la presencia de metales tóxicos. Por lo tanto es necesario realizar estudios que complementen la información generada previamente por otros autores, así como dar seguimiento a estudios que conduzcan a un mejor entendimiento de la dinámica de la contaminación en el sitio bajo estudio y que permitan tomar decisiones que faciliten el control de la contaminación y justificar las posibles acciones de remediación del sitio por las autoridades responsables.

El estudio se realizó en el municipio de Guadalupe, Zacatecas, por la problemática que enfrenta al estar ubicado en una zona minera que por sus condiciones geológicas favoreció el depósito de jales de amalgamación. Por otro lado, este estudio fue considerado como prioritario por el INE para aportar información y elementos científicos de apoyo a algunas de las acciones incluidas en el Plan de acción Regional de América del Norte para el Manejo adecuado del Mercurio (PARAN-Mercurio) de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), el cual tiene como meta el *“Reducir la concentración de mercurio en determinados ambientes y los flujos entre ellos, de modo que se aproximen a los niveles de concentración y flujos naturales, y se evite o minimice la exposición de los ecosistemas, peces, vida silvestre y seres humanos en América del Norte a concentraciones que excedan las que se originan naturalmente en el ambiente”*<sup>29</sup>.



## **Descripción del área de estudio:**

### **Geología<sup>16</sup>**

La historia de Zacatecas está íntimamente ligada a la extracción de metales preciosos (oro y plata) y éstos han sido fuente de grandes riquezas para el país y de trabajo para los habitantes de la entidad.

Con más de 15 distritos mineros y otras tantas zonas ricas en minerales potencialmente explotables, Zacatecas ocupa un lugar prominente por su potencialidad minera, dentro del país.

Los tradicionales distritos mineros de Fresnillo y Zacatecas tienen en la actualidad una intensa actividad extractiva y en lo que se refiere a la producción auro-argentífera, la mayoría de las empresas continúan realizando trabajos de exploración con el fin de aumentar sus reservas e incrementar los ritmos de producción.

Por otra parte, el Estado de Zacatecas cuenta con yacimientos de minerales no-metálicos como fosforita, wollastonita, fluorita, barita, caolín y bentonita que aunque son explotados en pequeña escala son fuente de trabajo permanente en las zonas donde estos existen.

Para la construcción de tipo colonial típica de Zacatecas, se han explotado tradicionalmente canteras que existen en los cerros que bordean la ciudad.

En Zacatecas existen rocas de todos los tipos fundamentales; ígneas, sedimentarias y metamórficas, cuyas edades de formación abarcan desde el Triásico hasta el Reciente. Las más antiguas son rocas metamórficas (filitas, pizarras y esquistos), sin embargo, las de mayor distribución territorial son las rocas ígneas del Terciario (andesitas, tobas, riolitas y basaltos) que afloran en la mayor parte de la Sierra Madre Occidental y en algunas áreas de las otras provincias geológicas que abarcan al estado. Las rocas sedimentarias, del Mesozoico, (Jurásico y Cretácico) forman estructuras plegadas (anticlinales y sinclinales) que a su vez han sido dislocadas por fracturas y fallas de tamaño regional. Estas dislocaciones también afectan a los otros tipos de roca existentes en Zacatecas<sup>16</sup>.

Las rocas ígneas cenozoicas se presentan con sus estructuras típicas, (aparatos volcánicos y coladas de lava) y en forma de cuerpos intrusivos que afectan a las rocas preexistentes. Estos cuerpos intrusivos han contribuido al fenómeno de mineralización de los diferentes distritos de Zacatecas.

El Estado de Zacatecas está comprendido en cuatro provincias geológicas que son: La **Sierra Madre Occidental**, La **Sierra Madre Oriental**, La **Mesa del Centro** y El **Eje Neovolcánico**.

El Municipio de Guadalupe, Zacatecas pertenece a la **Sierra Madre Occidental**, esta provincia comprende la porción sur del Estado, en los límites con Jalisco y limita al norte y al oriente con la Mesa del Centro y al sur con el Eje Neovolcánico<sup>16</sup>.

### **Estratigrafía**

Los afloramientos más antiguos que se conocen en Zacatecas existen en esta provincia son rocas metamórficas de bajo grado (pizarras, filitas y esquistos), que se presentan en los alrededores de la Ciudad de Zacatecas. Son de una edad que puede incluir los pisos del Triásico Inferior.

En esta provincia predominan las rocas ígneas extrusivas ácidas, Terciarias, que forman un grueso paquete de pseudo estratos de tobas y riolitas ínter digitados que sobreyacen a rocas andesíticas del Terciario Medio<sup>16</sup>.

### **Geología económica**

La minería es quizá el aspecto económico más importante de esta provincia tanto por su actividad extractiva actual en los distritos mineros de Zacatecas, Sombrerete-San Martín y Chalchihuites, como por su potencialidad en los de Veta Grande y en la zona de Jalpa.

### **Yacimientos minerales**

La explotación de los ricos yacimientos minerales se inició desde el Siglo XVI, extrayendo principalmente plata y oro, contenidos en las zonas de oxidación de los depósitos minerales. Por tal motivo, la metalurgia que se empleaba para la separación de oro y plata, requería de mercurio. Esta tecnología se utilizó en los dos primeros tercios del Siglo XX.

Hasta antes de los años setenta La minería en la región, no fue de grandes volúmenes de extracción, la capacidad de las minas no rebasaba las 100 ton/día. Lo trascendental, fue que durante esos 400 años, los productos de los jales, terreros y el intemperismo de las rocas, se depositaron en el Valle de Guadalupe, concentrándose los materiales aluviales a partir de 1938 en la presa La Zacatecana<sup>29</sup>.

### **Fisiografía**

Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos: Se localiza en la parte sureste de la provincia, casi desde el límite entre Durango y Zacatecas, y abarca toda la parte occidental de este último, quedando sus límites con la Mesa Central en las cercanías de las ciudades de Sombrerete, Fresnillo y Zacatecas. Incluye además toda la mitad occidental de Aguascalientes y pequeñas porciones del Estado de Jalisco.

Esta subprovincia se caracteriza por sus sierras altas, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas, que se alternan con valles, cuyos pisos son a veces de pendiente suave, y con más frecuencia presentan terrazas y lomeríos que son probables productos de la erosión de antiguos pisos de valle más altos que el actual.

Esta subprovincia es la que mayor superficie ocupa en el Estado, con una superficie de 21,036.61 km<sup>2</sup>, que corresponden al 29% de la superficie total de la entidad.

### **Edafología**

El suelo en la región, principalmente la de Zóquite, se caracteriza por ser de migajón arcilloso limoso arenoso, xerosol cálcico y regosol calcárico. Sus coloraciones varían en diferentes tonalidades, que van de rojizo oscuro a café claro. Las profundidades oscilan entre 0.50 a 1.50 metros, además presentan buen drenaje interior.

En el ejido de La Zacatecana, se reporta la siguiente descripción del suelo: arcilloso arenoso; estructura granular; consistencia suave, color castaño rojizo a

grisáceo, drenaje interno bueno, pedregosidad de 0 a 10 %, sin rocosidad, con pH de 7.0 a 8.0 <sup>29</sup>.

### **Agricultura y ganadería**

Las principales especies cultivadas son frijol y maíz, avena y pastos.

La actividad pecuaria es dirigida a la crianza y reproducción de ganado bovino, ovino y caprino <sup>29</sup>.

### **Usos principales del agua**

El agua de la Presa la Zacatecana es utilizada principalmente para riego y según acuerdos del Departamento de Asuntos Agrarios y Colonización, de fechas diversas, el agua se distribuyo de la siguiente manera: para regar una superficie de 381 ha del ejido la Zacatecana con 484,622 m<sup>3</sup>, que significa el 14.1 % del volumen anual captado en la laguna, 31 % al ejido Santa Mónica para regar una superficie de 198 ha, 29 % para regar 178 ha y ampliación de 7% para regar 42 ha para el ejido Zóquite<sup>29</sup>.

En fecha 24 de diciembre de 1947, por resolución presidencial, se concede al ejido de Guadalupe el 17.5 % del volumen captado para regar una superficie de 111 ha.

Actualmente, la presa presenta una superficie de aproximadamente 120 ha de extensión cubierta de agua, observándose que el nivel tiende a bajar, por los requerimientos de las comunidades para regar sus predios agrícolas, mediante la autorización de la Comisión Nacional del Agua. Hasta 1998 se contó con fauna acuática introducida, identificándose tres especies de peces: carpa de israel *Cyprinus carpio* variedad *specularis*, carpa barrigona *Cyprinus carpio rubrufuscus* y tilapia áurea *Oreochromis aurea*. A causa de los problemas detectados desde 1986 por problemas de metales pesados, y en el año de 1998, por motivo de la fuerte sequía que ya empezaba a dañar la producción agropecuaria, la Comisión Nacional del Agua (CNA) atiende la petición de los campesinos de la localidad para la extracción de agua de la Presa para regar sus cultivos ante la escasez de lluvias de casi tres años, lo cual provocó la total desaparición de peces en la Presa <sup>29</sup>.

## Vegetación

Originalmente estuvo caracterizada por matorral crasicáule y por matorral desértico micrófilo y en menor proporción matorral desértico rosetófilo, pastizal natural y vegetación halófito.

Actualmente la mayor parte de dicha vegetación ha sido reemplazada por cultivos agrícolas.

La vegetación nativa actualmente está formada por nopal duraznillo, nopal cardón, álamo, sauce, mezquite, huizache, matorral inerme y zonas con pastizal abierto <sup>29</sup>. En las tablas 2 a 4 se mencionan otras especies de la zona:

**Tabla 2. Estrato arbustivo del Valle de Guadalupe, Zac.**

| <b>Nombre Común</b> | <b>Nombre Científico</b>     | <b>Familia</b> |
|---------------------|------------------------------|----------------|
| Nopal cardón        | <i>Opuntia streptacantha</i> | Cactaceae      |
| Nopal rastrero      | <i>Opuntia rastreta</i>      | Cactaceae      |
| Nopal tapón         | <i>Opuntia robusta</i>       | Cactaceae      |
| Duraznillo          | <i>Opuntia leucotricha</i>   | Cactaceae      |
| Cholla              | <i>Opuntia cholla</i>        | Cactaceae      |
| Cardencha           | <i>Opuntia imbricata</i>     | Cactaceae      |
| Maguey              | <i>Agave asperrima</i>       | Agavaceae      |
| Lechuguilla         | <i>Agave lechequilla</i>     | Agavaceae      |
| Maguey pulquero     | <i>Agave atrovicensis</i>    | Agavaceae      |
| Huizache            | <i>Acacia farnesiana</i>     | Mimosaceae     |
| Chaparro            | <i>Acacia rigidula</i>       | Mimosaceae     |
| Uña de gato         | <i>Acacia sp.</i>            | Mimosaceae     |
| Mezquite            | <i>Prosopis juliflora</i>    | Mimosaceae     |
| Pinillo             | <i>Asclepias sp.</i>         | Asclepiadaceae |
| Escobilla           | <i>Baccharis sp.</i>         | Compositae     |
| Sauz o jarilla      | <i>Salix sp.</i>             | Gramineae      |
| Jarilla             | <i>Senecio sp.</i>           | Asteraceae     |
| Trompillo           | <i>Solanum sp.</i>           | Solanaceae     |
| Escobilla           | <i>Buddleia sp.</i>          | Solanaceae     |
| Tabascón            | <i>Nicotiana glauca</i>      | Solanaceae     |
| Sangre de grado     | <i>Jatropha dioica</i>       | Euphorbiaceae  |
| Carrizo             | <i>Juncus sp.</i>            | Juncaceae      |
| Engordacabra        | <i>Dalea sp.</i>             | Leguminosae    |

**Fuente:** Sistemas de Protección Ambiental y Geotécnica. Plata Panamericana. Proyecto Laguna Pedernalillo, Guadalupe Zacatecas, México. México, D.F. 1995 <sup>39</sup>.

**Tabla 3. Estrato herbáceo del Valle de Guadalupe, Zac.**

| <b>Nombre Común</b>  | <b>Nombre Científico</b>        | <b>Familia</b> |
|----------------------|---------------------------------|----------------|
| Estafiate            | <i>Ambrosia artemisaefolia</i>  | Compositae     |
| Estafiate            | <i>Artemisa ambrosoides</i>     | Compositae     |
| Chayotillo           | <i>Sicvos angulatus</i>         | Compositae     |
| Árnica               | <i>Heterotheca inuloides</i>    | Compositae     |
| Cempazúchil          | <i>Tegetes lucida</i>           | Compositae     |
| Epazote de comer     | <i>Chenopodium ambrosoides</i>  | Convolvulaceae |
| Quelite de zorrillo  | <i>Chenopodium foetidum</i>     | Convolvulaceae |
| Malva                | <i>Malva silvestre</i>          | Malvaceae      |
| Platago              | <i>Plantago sp.</i>             | Gramineae      |
| Zacate de agua       | <i>Digitaria sp.</i>            | Gramineae      |
| Zacate               | <i>Andropogon sp.</i>           | Gramineae      |
| Zacate borreguero    | <i>Bouteloa gracilis</i>        | Gramineae      |
| Biznaga              | <i>Mammillaria sp.</i>          | Cactaceae      |
| Biznaga              | <i>Ferocactus sp.</i>           | Cactaceae      |
| Lemna                | <i>Lemna minor</i>              | Lemnaceae      |
| Berro de agua        | <i>Nasturtium officinale</i>    | Cruciferae     |
| Tule                 | <i>Scyrpus sp.</i>              | Cyperaceae     |
| Tifa                 | <i>Tipha sp.</i>                | Typhaceae      |
| Manrubio             | <i>Manrubium vulgare</i>        | Labiataeae     |
| Heno                 | <i>Tillandsia sp.</i>           | Brometaciadeae |
| Hierba del negro     | <i>Sphaeralcea angustifolia</i> | Malvaceae      |
| Ojo de tordo         | <i>Sanvitalia sp.</i>           | Compositae     |
| Hierba de pájaro     | <i>Lepidium sp.</i>             | Cruciferae     |
| Hierba de golondrina | <i>Euphorbia hirta</i>          | Euphorbiaceae  |
| Maravilla            | <i>Miriabilis sp.</i>           | Nyctaginaceae  |
| Quintonil            | <i>Amaranthus sp.</i>           | Amaranthaceae  |
| Calabacilla loca     | <i>Cucurbita foetidissima</i>   | Cucurbitaceae  |
| Aceitilla            | <i>Bidens pilosa</i>            | Compositae     |
| Rábano               | <i>Raphanus raphanistrum</i>    | Cruciferae     |
| Verdolaga            | <i>Portulaca sp.</i>            | Portulacaceae  |
| Toloache             | <i>Datura stramonium</i>        | Solanaceae     |
| Mostaza              | <i>Brassica campestris</i>      | Cruciferae     |
| Correhuela           | <i>Convolvulus sp.</i>          | Convolvulaceae |
| Aster                | <i>Aster sp.</i>                | Asteraceae     |
| Rosetilla            | <i>Schenchrus sp.</i>           | Asteraceae     |
| Chicalote            | <i>Argemone mexicana</i>        | Papaveraceae   |

**Fuente:** Sistemas de Protección Ambiental y Geotécnica. Plata Panamericana. Proyecto Laguna Pedernalillo, Guadalupe Zacatecas, México. México, D.F. 1995 <sup>39</sup>.

**Tabla 4. Plantas para autoconsumo en el Valle de Guadalupe, Zac.**

| <b>Nombre común</b> | <b>Nombre científico</b>       | <b>Utilización</b> |
|---------------------|--------------------------------|--------------------|
| Huizache            | <i>Acacia farnesiana</i>       | Leña               |
| Mezquite            | <i>Prosopis juliflora</i>      | Leña               |
| Nopal               | <i>Opuntis spp.</i>            | Tunas              |
| Sangre de grado     | <i>Jatropha dioica</i>         | Medicinal          |
| Estafiate           | <i>Ambrosia artemisaefolia</i> | Medicinal          |
| Estafiate           | <i>Artemisa ambrosoides</i>    | Medicinal          |
| Árnica              | <i>Hetherotheca inuloides</i>  | Medicinal          |
| Gordolobo           | <i>Tithonia sp.</i>            | Medicinal          |
| Yerbanis            | <i>Tegetes lucida</i>          | Medicinal          |
| Epazote             | <i>Chenopodium ambrosoides</i> | Medicinal          |
| Quelite de zorrillo | <i>Chenopodium foetidum</i>    | Medicinal          |
| Malva               | <i>Malva silvestris</i>        | Medicinal          |
| Manrubio            | <i>Manrubium sulgare</i>       | Medicinal          |
| Estramonio          | <i>Datura stramonium</i>       | Medicinal          |

**Fuente:** Sistemas de Protección Ambiental y Geotécnica. Plata Panamericana. Proyecto Laguna Pedernalillo, Guadalupe Zacatecas, México. México, D.F. 1995 <sup>39</sup>.

## **Fauna**

Se han identificado 19 especies de aves acuáticas migratorias, 4 especies de aves rapaces, 21 aves terrestres, 6 especies de reptiles y 6 especies de mamíferos.

Entre otras, se ha observado la presencia del ganso de Canadá (*Branta canadensis*), aguililla (*Buteo jamaicensis*), cerceta café (*Anas acuta*), cascabel colanegra (*Crotalus molossus*) y zorra (*Urocyon cinereoargenteus*). La Presa La Zacatecana se caracteriza por recibir en invierno una gran variedad de aves acuáticas migratorias destacando su importancia como lugar de paso y descanso para especies que siguen las rutas del Pacífico, Centro y Golfo de México, entre las especies más importantes se encuentran: pato golondrino y ganso canadiense <sup>29</sup>. En cuanto a la presencia de reptiles, se han identificado víboras de cascabel jaspeada (*Crotalus lepidus*) y diamantada (*Crotalus atrox*), alicantes (*Pituophis melanoleuca*) culebras (*Thamnophis melanogaster*) y diversas especies de tortugas y lagartijas aún no clasificadas. En cuanto a la presencia de anfibios, se observó la presencia de especies de ranas y sapos, aún no clasificadas<sup>8</sup>.

En las tablas 5 y 6 se pueden observar las especies de aves y mamíferos más frecuentes, vistas en la región.

**Tabla 5. Aves terrestres del Valle de Guadalupe**

| <b>Nombre Común</b> | <b>Nombre Científico</b>     | <b>Familia</b> |
|---------------------|------------------------------|----------------|
| Torcaza             | <i>Scardafela inca</i>       | Columbidae     |
| Paloma huilota      | <i>Zenaida macroura</i>      | Columbidae     |
| Paloma alas blancas | <i>Zenaida asiatica</i>      | Columbidae     |
| Cuervo              | <i>Corvus corax</i>          | Corvidae       |
| Cardenal            | <i>Cardinalis cardinalis</i> | Fringillidae   |
| Chirino             | <i>Spinus psaltria</i>       | Fringillidae   |
| Zanate              | <i>Cassidix mexicanus</i>    | Icteridae      |
| Calandria           | <i>Icterus spurius</i>       | Icteridae      |
| Tordo               | <i>Agelaius phoeniceus</i>   | Icteridae      |
| Chirula             | <i>Sturnella neglecta</i>    | Icteridae      |
| Clarín              | <i>Myadestes unicolor</i>    | Muscicapidae   |
| Jilguero            | <i>Myadestes obscurus</i>    | Muscicapidae   |
| Cenzontle cabezón   | <i>Lanius hidovicianus</i>   | Laniidae       |
| Cenzontle común     | <i>Mimus polyglottos</i>     | Mimidae        |
| Potacoche           | <i>Toxostoma curvirostre</i> | Mimidae        |
| Carpintero          | <i>Colaptes cafer</i>        | Picidae        |
| Codorniz común      | <i>Colinus virginianus</i>   | Phasianidae    |
| Gorrión             | <i>Passer domesticus</i>     | Ploceidae      |
| Chuparrosa          | <i>Amazilia violiceps</i>    | Trochilidae    |
| Saltapurricha       | <i>Salpinctes abzaletos</i>  | Troglodytidae  |
| Turdo               | <i>Turdus rufitorques</i>    | Turdidae       |

**Fuente:** Sistemas de Protección Ambiental y Geotécnica. Plata Panamericana. Proyecto Laguna Pedernalillo, Guadalupe Zacatecas, México. México, D.F. 1995<sup>39</sup>.

**Tabla 6. Mamíferos del Valle de Zacatecas**

| <b>Nombre Común</b> | <b>Nombre Científico</b>       | <b>Familia</b> |
|---------------------|--------------------------------|----------------|
| Orden: Carnívora    |                                |                |
| Coyote              | <i>Canis latrans</i>           | Canidae        |
| Zorra               | <i>Vulpex macrotis</i>         | Canidae        |
| Orden: Rodentia     |                                |                |
| Ardilla o Tachalote | <i>Spermophilis variegatus</i> | Sciuridae      |
| Orden: Marsupialia  |                                |                |
| Tlacuache           | <i>Didelphis virgiana</i>      | Dipelphidae    |
| Orden: Lagomorpha   |                                |                |
| Liebre              | <i>Lepus californicus</i>      | Leporidae      |
| Conejo              | <i>Sylvilagus floridanus</i>   | Leporidae      |



**Fuente:** Sistemas de Protección Ambiental y Geotécnica. Plata Panamericana. Proyecto Laguna Pedernalillo, Guadalupe Zacatecas, México. México, D.F. 1995 <sup>39</sup>.

## **Climas**

En términos generales, el clima en el Estado de Zacatecas es seco, con una temperatura media anual de 16° C y una precipitación pluvial media de 510 mm. Las variaciones extremas en la temperatura y precipitación son: 35° C máxima y 6° C mínima; 910 mm máxima y 324 mm mínima.

Los climas semisecos se concentran en una región que abarca todo el centro y este, de la entidad, en la etapa de transición entre la zona desértica y la Sierra Madre Occidental.

Dada la descripción del área de estudio es de importancia dar un seguimiento acerca de la contaminación y las posibles implicaciones que ésta ha tenido en el Estado de Zacatecas, al ser la minería su principal actividad por muchos años, ya que ésta tiene un alto impacto en virtud de que afecta al ambiente desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua superficiales y sub-superficiales, al generar una gran cantidad de desechos sólidos, líquidos y gaseosos, principalmente en forma de gases, humos, partículas, aguas residuales y jales.

## **Muestreo y análisis de metales en el municipio de Guadalupe, Zacatecas**

Los resultados obtenidos en la primera fase del estudio<sup>31</sup> mostraron la necesidad de ampliar el mismo a través de una segunda fase, para determinar la contaminación en la zona agrícola del municipio de Guadalupe. Para esta segunda fase se estableció que los contaminantes a analizar debían incluir mercurio total, metilmercurio, arsénico, plomo, cadmio, zinc, antimonio, cobre y plata. Para fines del presente trabajo de tesis sólo se realizará la estimación de riesgo para aquellas sustancias cuyas concentraciones reportadas en el primer estudio fueron las más elevadas: mercurio total, arsénico, cadmio y plomo.

## **Metodología**

### **Caracterización del sitio**

Se caracterizó la zona de estudio a través de búsqueda bibliográfica en la cual se revisaron mapas, información de la página de INEGI, así como de documentos que permitieran tener una buena descripción de la zona, además se hizo una revisión de las propiedades físicas, químicas y toxicológicas de los metales evaluados en este estudio (As, Cd, Hg y Pb).

### **Muestreo de suelos**

Una vez delimitada la zona de estudio, en diciembre de 2002, se elaboró una cuadrícula con 32 puntos de muestreo, dispuesta a manera de cubrir la zona que se extiende desde San Jerónimo, en el sur, hasta Tacoaleche, en el norte, con un área de aproximadamente 140.8 km<sup>2</sup>.

En todos los puntos, el programa de muestreo se centró en campos de labranza, con el fin de aportar información acerca de la posible incorporación de los metales en los cultivos y también sobre la exposición humana y animal como consecuencia de la contaminación de los suelos.

El muestreo se realizó en enero del 2003 a dos niveles de profundidad (0-15 cm y 15-30 cm) en cada punto ya que usualmente es la profundidad a la cual se realizan los cultivos y el sustrato inferior donde suele ubicarse la zona de alimentación radicular de las plantas con raíces más profundas respectivamente. Debido a la contaminación del superficial suelo y a la consiguiente exposición, contacto dérmico, ingestión e inhalación, que suelen representar importantes vías de absorción y acumulación en los niños, se decidió llevar a cabo muestreos en patios escolares de 9 poblados de la zona de estudio, con una profundidad de 0 a 5 cm.

Las muestras de suelo y vegetación (frijol y maíz) obtenidas fueron enviadas para realizar el análisis de parámetros inorgánicos a PSC Analytical

Services, en Burlington, Ontario, institución acreditada por la Asociación Canadiense de Laboratorios de Análisis Ambientales (CAEAL).

**Características de la recolección de las muestras: (a) para el suelo y (b) para las de patios escolares.**

- a) Se utilizó un mapa topográfico para acercarse lo más posible a todos los sitios de muestreo previamente determinados;
- Se dio preferencia para el muestreo a las áreas donde había campos con cultivos agrícolas activos;
- en los casos en que no se encontraron campos cultivados en las inmediaciones del sitio de muestreo, se eligió para la obtención de muestras el área con menores signos de alteración;
- una vez identificado el sitio, el área precisa en donde se obtendría la muestra se ubicó a una distancia de entre 10 y 20 metros de las orillas del campo del cultivo y de los caminos y carreteras, o de cualquier otro elemento que pudiera dar lugar a alteraciones del entorno;
- al llegar al punto elegido se activó un receptor GPS operado a base de pilas para registrar las coordenadas del sitio (longitud y latitud en grados, minutos y segundos), así como la altitud en metros sobre un elipsoide de referencia;
- en cada sitio de la cuadrícula se eligió un área de dos metros de radio en cuyo interior se ubicaron dos puntos de muestreo;
- para obtener las muestras se excavaron, con ayuda de una pala y, cuando fue necesario, de un pico, dos hoyos (uno por muestra) de 30 cm de profundidad;
- una vez cavados los hoyos se utilizó un desplantador de acero inoxidable para eliminar la tierra que hubiese podido entrar en contacto con el pico o la pala, y para preparar una pared lateral vertical de donde extraer las muestras;
- las muestras se obtuvieron con el mismo desplantador de acero inoxidable, extrayendo porciones de suelo de cada uno de los hoyos, primero a una profundidad de entre 15 y 30 cm y luego de 0 a 15 cm;

- en todos los casos, la persona encargada de tomar la muestra utilizó un guante de látex nuevo para asegurar que en ningún momento hubiera contacto directo de la mano con las muestras de suelo;
  - las muestras de suelo recolectadas a ambas profundidades en cada uno de los dos hoyos se colocaron en recipientes de acero inoxidable y se les disgregó con cuidado para garantizar que en todos los casos se trataba de muestras representativas;
  - luego, para el análisis de contenido de materia inorgánica, se le pasó de los recipientes de acero inoxidable a botellas de plástico (PET) de 500 ml, previamente etiquetadas y bien tapadas;
  - en cada sitio se hicieron apuntes de las coordenadas registradas con el receptor GPS, la descripción del suelo y la ubicación de los puntos de los que se extrajeron las muestras,
  - una vez colocadas las muestras en el recipiente adecuado, se les guardó en una hielera de material aislante a efecto de conservarlas frías a lo largo del día, mientras se continuaba con el muestreo;
  - concluida la obtención de muestras, se procedió a lavar y tallar el equipo de muestreo con agua embotellada y se le roció con metanol para eliminar cualquier partícula que pudiera haber conservado aun después del lavado;
  - al final de cada jornada se envolvieron los recipientes con las muestras en bolsas de plástico dobles y se les agregó más hielo para transportarlas a las instalaciones de PSC Analytical en Burlington, Ontario;
  - Los niveles de metales pesados en las muestras fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica.
- 
- **b)** Además de los procedimientos identificados para el muestreo de suelo, se utilizaron los siguientes métodos específicos para la obtención de muestras en patios escolares:

- todas las muestras se obtuvieron en puntos ubicados en un radio de dos metros alrededor de aquellas zonas en las que los niños tendrían más probabilidades de estar expuestos al contacto con tierra y polvo;
- las muestras de suelo de 0-5 cm de profundidad se recogieron con desplantadores de acero inoxidable en cuando menos diez puntos de muestreo en el área de dos metros a la redonda de cada sitio, y
- se colocaron primero en recipientes de acero inoxidable en los que se les disgregó con cuidado, y luego en botellas de plástico (PET) de 500 ml.
- Los niveles de metales pesados en las muestras fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica.

### **Muestreo de cultivos**

Además de los procedimientos identificados para el muestreo de suelo, se utilizaron los siguientes métodos específicos para la obtención de muestras de vegetación:

- todas las muestras de vegetación se recogieron en tierras de la cuadrícula donde se había obtenido una muestra de suelo;
- debido a la limitada disponibilidad de cultivos en esta área en esta época del año, se obtuvieron muestras de vegetación de zonas no cultivadas o bien, en las propias tierras de cultivo, de plantas que habían sobrevivido a la cosecha del año anterior;
- dada la época del año, todas las muestras de vegetación fueron de frijol o de maíz, con excepción de una muestra de avena obtenida en una pequeña área en donde las plantas habían escapado a la cosecha;
- si bien se encontraron algunos sitios con trigo que aún no había dado espigas, la decisión de recolectar sólo muestras de partes comestibles de las plantas descartó el muestreo en estos casos;
- en todos los casos se utilizaron guantes de látex para eliminar con la mano las partes protectoras de las muestras vegetales (las hojas tratándose del maíz y

las vainas o la cascarilla en el caso de frijol o de avena), y así obtener muestras de granos que no hubiesen estado en contacto con el suelo.

- Los niveles de metales pesados en las muestras fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica.

### **Análisis estadístico y digitalización de mapas**

Se realizó un análisis estadístico para identificar el comportamiento de los metales en el sitio de estudio utilizando las pruebas F y t student, además se hizo el análisis de regresión para identificar la correlación entre las concentraciones encontradas en la vegetación y en las muestra de suelo y que entre otras cosas nos permitió tomar la decisión sobre cuáles mapas tendrían que generarse para hacer la representación gráfica de la dispersión de la contaminación y contar con mas herramientas que nos permitieran entender el comportamiento de los metales en el área de estudio y en los cuales se identifican las zonas de riesgo según los niveles permitidos por la USEPA<sup>45</sup>, para lo que se creó una base de datos y se procedió a realizar la digitalización de los mapas, para lo cual se utilizó una computadora con el programa ArcView 3.2 facilitada por el laboratorio de cómputo de la Unidad de Biotecnología y Prototipos (UBIPRO) de la FES- Iztacala.

### **Evaluación de riesgos**

IRIS es una herramienta que proporciona la identificación de peligro e información para la evaluación dosis-respuesta, pero no proporciona información circunstancial en casos individuales de exposición. Combinado con la información de exposición específica, los datos en IRIS se pueden utilizar para la caracterización de los riesgos sobre la salud pública de un producto químico dado en una situación particular, que puede entonces conducir a una decisión para el manejo de riesgo diseñada para proteger salud pública.

Por consiguiente, se cálculo el Índice de Peligro **HQ** para estimar los riesgos a la salud en el sitio. Este índice sirve para estimar la probabilidad de tener

efectos adversos a la salud debido a un contaminante, utilizando la base de datos de IRIS, base de datos electrónica que contiene información de los efectos a la salud humana que pueden resultar de la exposición a sustancias presentes en el ambiente<sup>44</sup>.

El HQ se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}$$

Donde:

HQ: Índice de peligro

ADD: Dosis diaria promedio que se calcula de la siguiente manera.

$$ADD = \frac{(C) (IR) (D_E) (A)}{(BW) (D_T)}$$

Donde:

C: Concentración del contaminante en el suelo

IR: Tasa de ingestión (mg/día)

D<sub>E</sub>: Tiempo de exposición que en este caso sería de 365 días por ser una exposición crónica

A: factor de absorción que es igual a 1

BW: peso en kg de la persona

D<sub>T</sub>: es la duración total de la exposición

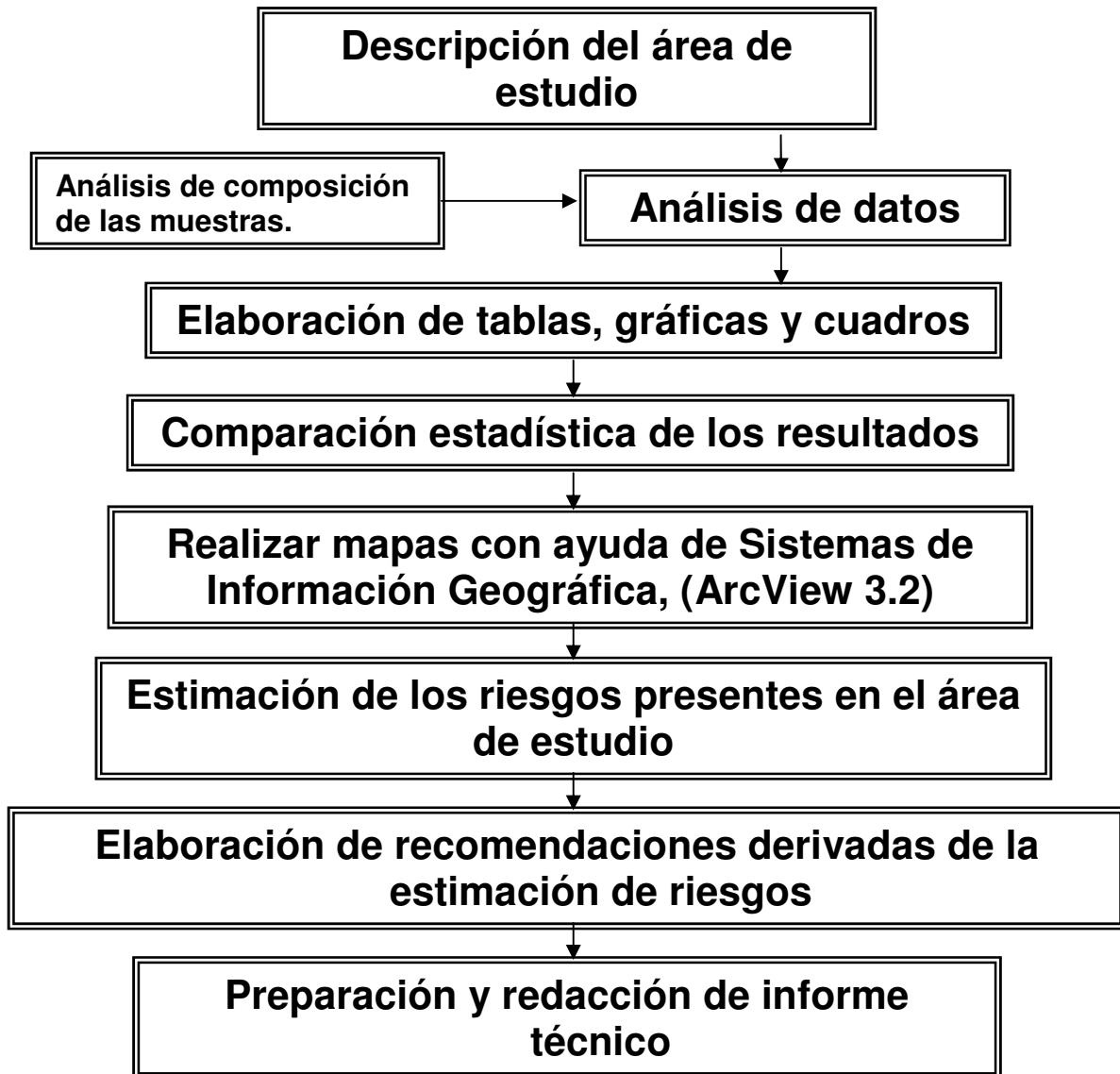
Como D<sub>E</sub>=D<sub>T</sub> se cancelan, por lo tanto

$$HQ = \frac{(C) (IR) / BW}{RfD}$$

RfD: Dosis de referencia<sup>44</sup>.



Diagrama de flujo de la metodología.



## Resultados

### *Análisis de suelos agrícolas*

Se analizaron muestras de 32 puntos los cuales son presentados en la figura 1 y en la tabla 7 donde se pueden ver clasificados como G-1 hasta G-32, para el análisis de concentración de metales (As, Cd, Hg y Pb), además se describe brevemente el lugar indicando el tipo de zona: cultivo, pastizal, maleza, etc. También se presentan las coordenadas geográficas de cada sitio.

En su mayoría se muestrearon zonas de cultivo y principalmente de frijol (13) seguido en número por de maíz (12) y el resto fueron zonas de maleza, pastizal, etc.

| <b>Punto de muestreo (clave)</b> | <b>Lugar</b>            | <b>Coordenadas</b>                                    |
|----------------------------------|-------------------------|---|
| G-1                              | Cultivo de maíz         | N 22°40'18.15"<br>O 102°33'52.8"<br>m.s.n.m:2308m     |
| G-2                              | Cultivo de maíz y melón | N 22°40'24.86"<br>O 102°32'13.35"<br>m.s.n.m:2308m    |
| G-3                              | Cultivo de maíz         | N 22°41'18.32"<br>O 102°31'31.72"<br>m.s.n.m:2291m    |
| G-4                              | Cultivo de frijol       | N 22°42'36.96"<br>O 102°31'21.24"<br>m.s.n.m:2268.7m  |
| G-5                              | Maleza                  | N 22°43'32.96"<br>O 102°30'49.06"<br>m.s.n.m: 2257.8m |
| G-6                              | Cultivo de maíz         | N 22°44'26.15"<br>O 102°29'36.04"<br>m.s.n.m: 2237m   |
| G-7                              | Cultivo de maíz         | N 22°39'56.14"<br>O 102°29'40.97"<br>m.s.n.m: 2256m   |
| G-8                              | Cultivo de maíz         | N 22°40'11.13"<br>O 102°28'50.41"<br>m.s.n.m: 2243m   |
|                                  |                         | N 22°41'13.00"  |

| <b>Punto de muestreo<br/>(clave)</b> | <b>Lugar</b>      | <b>Coordenadas</b>                                     |
|--------------------------------------|-------------------|--|
| G-9                                  | Cultivo de frijol | O 102°29'52.92"<br>m.s.n.m: 2255m                      |
| G-10                                 | Cultivo de maíz   | N 22°43'07.01"<br>O 102°29'59.79"<br>m.s.n.m: 2235.8m  |
| G-11                                 | Maleza            | N 22°43'38.74"<br>O 102°29'29.58"<br>m.s.n.m: 2219.5m  |
| G-12                                 | Cultivo de maíz   | N 22°42'51.62"<br>O 102°28'10.16"<br>m.s.n.m: 2201.9m  |
| G-13                                 | Cultivo de frijol | N 22°42'13.40"<br>O 102°27'46.98"<br>m.s.n.m: 2215.6m  |
| G-14                                 | Cultivo de maíz   | N 22°44'36.94"<br>O 102°28'18.04"<br>m.s.n.m: 2194.0m  |
| G-15                                 | Recién arado      | N 22°44'14.22"<br>O 102°28'27.84"<br>m.s.n.m: 2190.3m  |
| G-16                                 | Cultivo de frijol | N 22°44'47.27"<br>O 102°25'23.13"<br>m.s.n.m: 2184.6m  |
| G-17                                 | Cultivo de frijol | N 22°44'40.92"<br>O 102°26'58.50"<br>m.s.n.m: 2185.6m  |
| G-18                                 | Cultivo de frijol | N 22°46'03.28"<br>O 102°27'27.20"<br>m.s.n.m: 2175.3m  |
| G-19                                 | Cultivo de frijol | N 22°46'16.05"<br>O 102°28'32.97"<br>m.s.n.m: 2213.4m  |
| G-20                                 | Pasto y maleza    | N 22°46'03.86"<br>O 102°29'53.47"<br>m.s.n.m: 2253.45m |
| G-21                                 | Cultivo de frijol | N 22°47'19.60"<br>O 102°29'15.85"<br>m.s.n.m: 2252.24m |
| G-22                                 | Cultivo de frijol | N 22°48'38.43"<br>O 102°29'18.86"<br>m.s.n.m: 2252.3m  |

| <b>Punto de muestreo<br/>(clave)</b> | <b>Lugar</b>      | <b>Coordenadas</b>                                     |
|--------------------------------------|-------------------|--|
| G-23                                 | Cultivo de maíz   | N 22°49'02.51"<br>O 102°25'43.14"<br>m.s.n.m: 2136.0m  |
| G-24                                 | Cultivo de maíz   | N 22°47'24.72"<br>O 102°25'58.56"<br>m.s.n.m: 2154.9m  |
| G-25                                 | Cultivo de frijol | N 22°47'22.45"<br>O 102°27'37.41"<br>m.s.n.m: 2197.4m  |
| G-26                                 | Cultivo de frijol | N 22°48'06.86"<br>O 102°27'21.25"<br>m.s.n.m: 2189.1m  |
| G-27                                 | Cultivo de maíz   | N 22°45'42.13"<br>O 102°26'05.33"<br>m.s.n.m: 2159.95m |
| G-28                                 | Cultivo de avena  | N 22°45'06.43"<br>O 102°27'09.86"<br>m.s.n.m: 2174.6m  |
| G-29                                 | Cultivo de maíz   | N 22°45'19.71"<br>O 102°29'14.39"<br>m.s.n.m: 2218.4m  |
| G-30                                 | Cultivo de frijol | N 22°41'14.72"<br>O 102°28'19.71"<br>m.s.n.m: 2228.6m  |
| G-31                                 | Zona de pastoreo  | N 22°39'41.03"<br>O 102°27'52.97"<br>m.s.n.m: 2262.3m  |
| G-32                                 | Cultivo de frijol | N 22°42'28.54"<br>O 102°27'25.14"<br>m.s.n.m: 2208.8m  |

**Tabla 7. Puntos donde se llevaron a cabo los muestreos en el campo.**

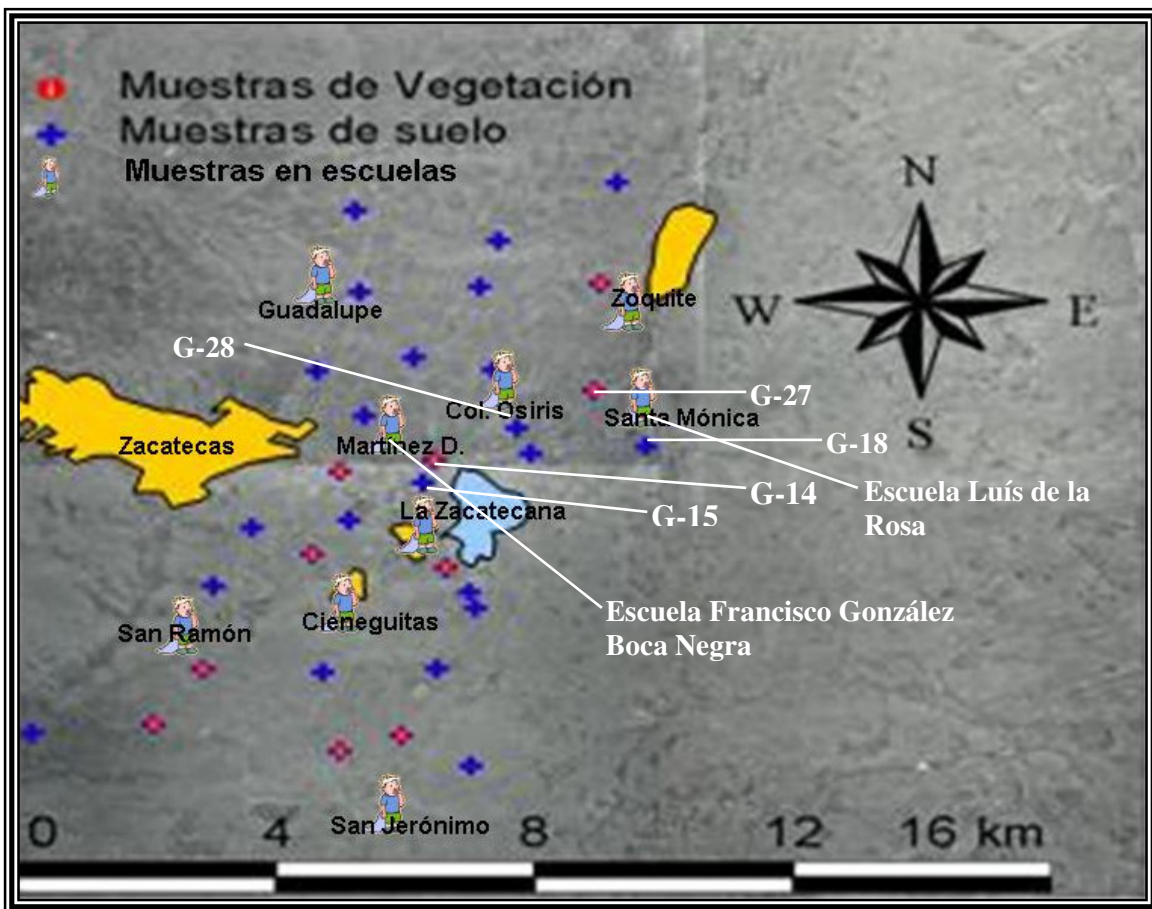


Fig. 1. Puntos de muestreo en la zona de estudio.

Se realizaron análisis de As, Cd, Hg y Pb en los 32 puntos a dos diferentes profundidades 0 a 15 cm y de 15 a 30 cm.

La concentración de metales encontrada en los puntos de muestreo se comparó con los niveles de concentración recomendados en suelos, por la EPA, debido a la carencia de normas ambientales mexicanas que establezcan las concentraciones máximas permisibles para recomendar la remediación de suelos en sitios contaminados por metales tóxicos<sup>24</sup>. En base a este criterio, los sitios con niveles elevados de As, Hg y Pb fueron caracterizados como: G-14, G-15, G-27 y G-28, correspondiendo tales puntos a zonas de cultivo de maíz, a un campo recién arado, otro de cultivo de maíz y el último a uno de cultivo de avena respectivamente, estos se ubican en la zona cercana a las poblaciones: Colonia

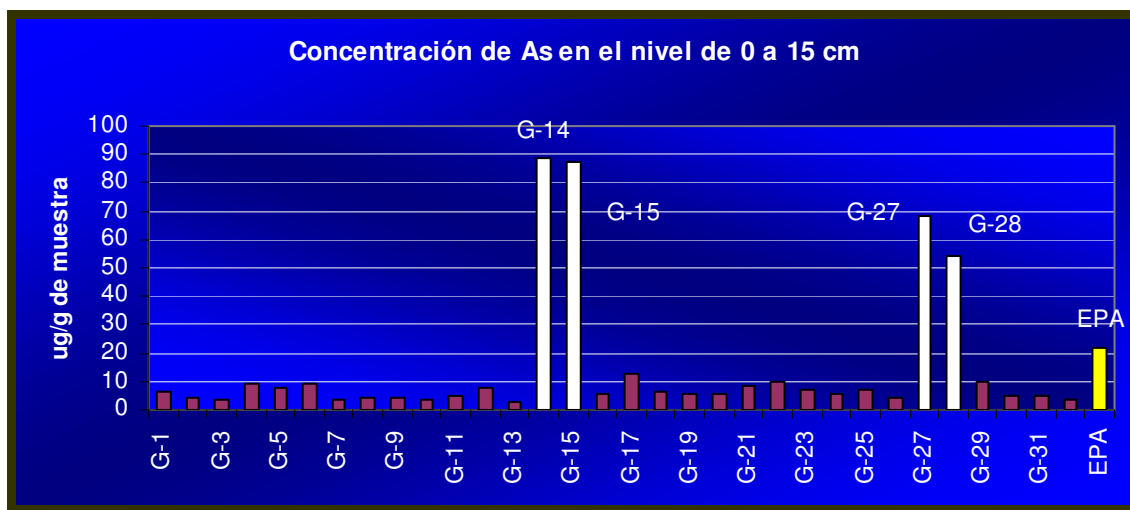
Osiris, Sta. Mónica y Zoquite. En el caso del cadmio, todos los puntos analizados presentaron concentraciones por debajo del nivel recomendado por la EPA y, en la mayoría de los casos por debajo del límite de detección del equipo, lo que sugiere que en estos niveles de profundidad el problema de contaminación por dicho metal no es considerable.

En la Tabla 8 y en las graficas 1 a 4 se presentan los datos de la concentración de As, Cd, Hg y Pb en suelo del nivel de 0 a 15 cm.

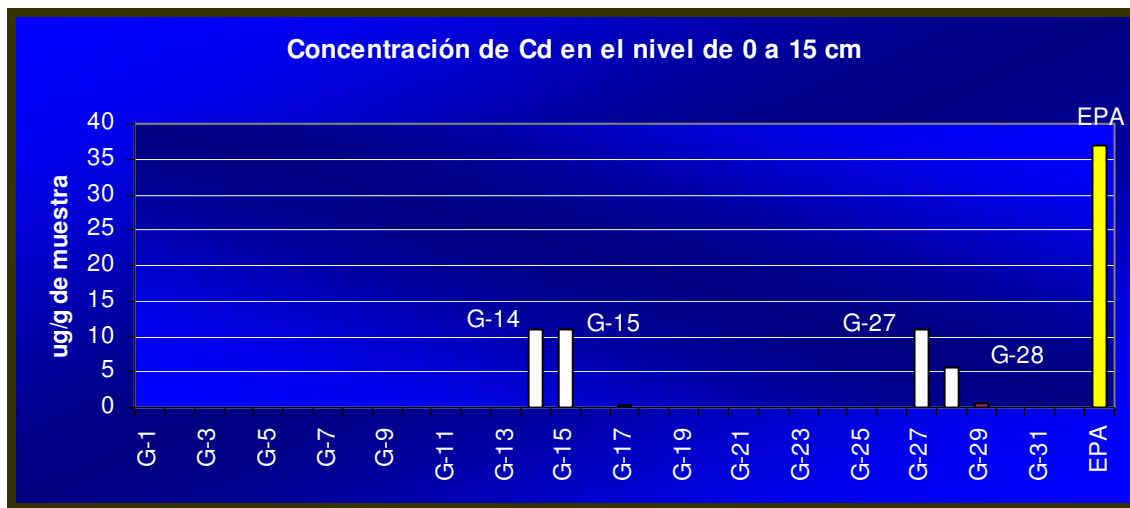
| <b>Punto de muestreo</b>                      | <b>Arsénico<br/>µg/g</b> | <b>Cadmio<br/>µg/g</b> | <b>Mercurio<br/>µg/g</b> | <b>Plomo<br/>µg/g</b> |
|---|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Nivel permitido para suelos EPA <sup>45</sup> | 22                       | 37                     | 23                       | 400                   |
| G-1   | 6.3                      | <                      | 1.6                      | 16                    |
| G-2   | 4.2                      | <                      | 0.07                     | 14                    |
| G-3   | 3.3                      | <                      | 0.08                     | 11                    |
| G-4   | 9.5                      | <                      | 0.12                     | 11                    |
| G-5   | 7.6                      | <                      | 0.24                     | 15                    |
| G-6   | 9.4                      | <                      | 0.99                     | 38                    |
| G-7   | 3.6                      | <                      | 0.09                     | 14                    |
| G-8   | 4.3                      | <                      | 0.14                     | 17                    |
| G-9   | 4.2                      | <                      | 0.05                     | 10                    |
| G-10  | 3.6                      | <                      | 0.18                     | 12                    |
| G-11  | 4.6                      | <                      | 0.34                     | 19                    |
| G-12  | 7.9                      | <                      | 0.40                     | 18                    |
| G-13  | 3                        | <                      | 0.09                     | 10                    |
| G-14  | 89                       | 11                     | 32                       | 620                   |
| G-15  | 87                       | 11                     | 52                       | 650                   |
| G-16  | 5.4                      | <                      | 0.15                     | 13                    |
| G-17  | 13                       | 0.3                    | 3.5                      | 53                    |
| G-18  | 6.2                      | <                      | <                        | 29                    |
| G-19  | 5.5                      | <                      | 0.48                     | 26                    |
| G-20  | 5.6                      | <                      | 0.52                     | 26                    |
| G-21  | 8.3                      | <                      | 0.83                     | 33                    |
| G-22  | 10                       | <                      | 0.57                     | 23                    |
| G-23  | 7.2                      | <                      | 0.53                     | 17                    |
| G-24  | 5.6                      | <                      | 0.65                     | 21                    |
| G-25  | 6.7                      | <                      | 0.78                     | 31                    |
| G-26  | 4.5                      | <                      | 0.40                     | 17                    |
| G-27  | 68                       | 11                     | 290                      | 1300                  |

| Punto de muestreo | Arsénico<br>µg/g | Cadmio<br>µg/g | Mercurio<br>µg/g | Plomo<br>µg/g |
|-------------------|------------------|----------------|------------------|---------------|
| G-28              | 54               | 5.7            | 110              | 720           |
| G-29              | 9.9              | 0.6            | 2.3              | 80            |
| G-30              | 4.7              | <              | 0.09             | 12            |
| G-31              | 4.6              | <              | 0.13             | 16            |
| G-32              | 3.7              | <              | 0.11             | 13            |

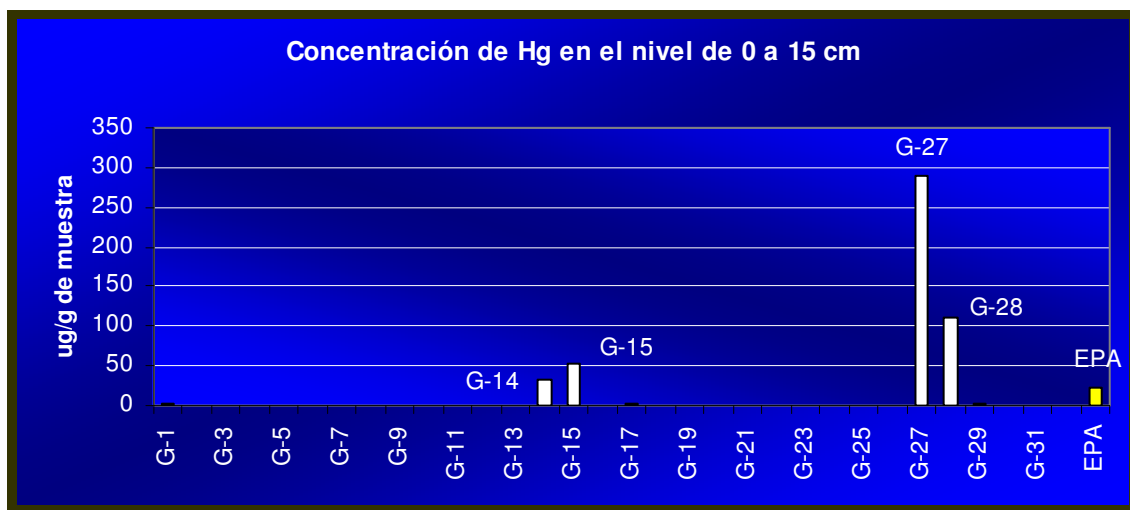
Tabla 8. Concentración de metales pesados en el nivel de 0 a 15 cm



Grafica 1. Concentración de arsénico de los 32 puntos de muestreo comparados con el nivel permitido por la EPA.

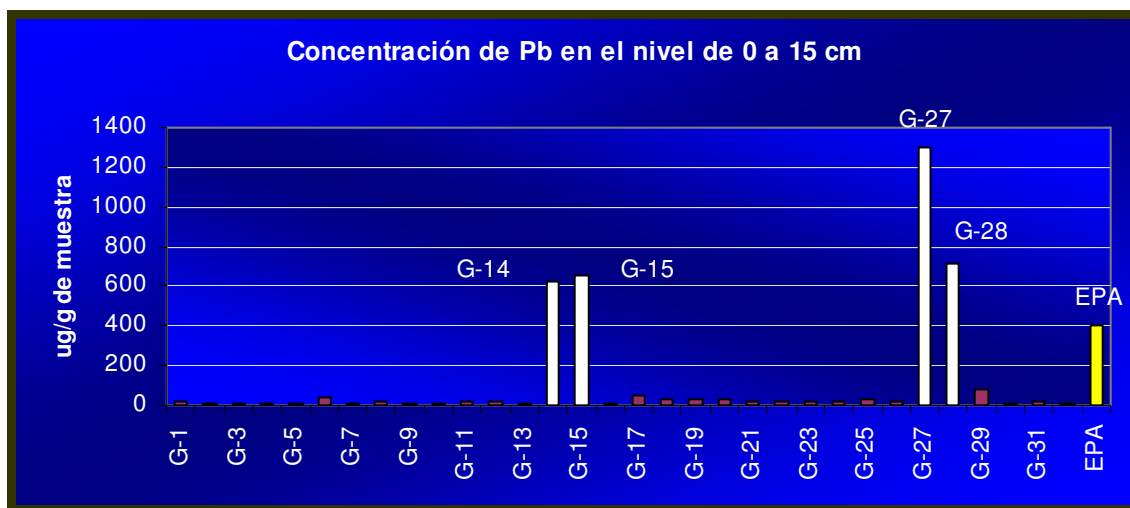


**Grafica 2. Concentración de cadmio en los 32 puntos de muestreo comparados con el nivel permitido por la EPA.**



**Grafica 3. Concentración de mercurio de los 32 puntos de muestreo comparados con el nivel permitido por la EPA.**





**Grafica 4. Concentración de plomo de los 32 puntos de muestreo comparados con el nivel permitido por la EPA.**

En la Tabla 9 y en las gráficas 5 a 8 se muestra la concentración de los mismos metales para los muestreos a 15 a 30 cm de profundidad, en la cual se puede observar la misma tendencia en cuanto a la concentración de los contaminantes estudiados; se observa que en los sitios G-14, G-15, G-27 y G-28 se encuentran concentraciones por arriba del nivel recomendado por la EPA. Así mismo el cadmio se encuentra por debajo del nivel recomendado y en la mayoría de los puntos se observó que la concentración está por debajo del límite de detección del equipo de laboratorio, lo que sugiere que también en este nivel, el cadmio no se encuentra en concentraciones considerables como para ser considerado como un contaminante en dicha zona.

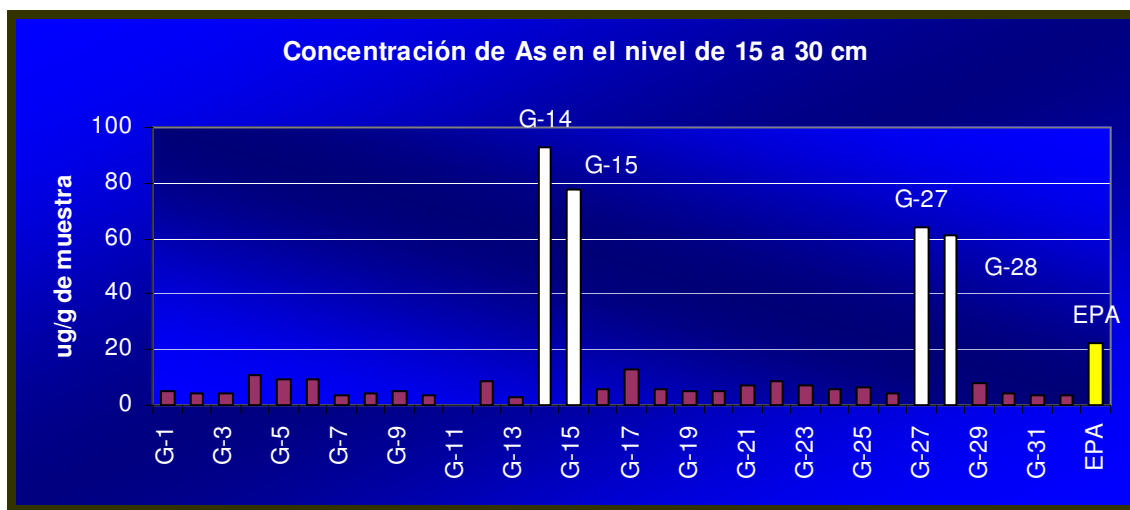
Los resultados de las concentraciones presentados tanto en las tablas (2 y 3) como en las graficas (1 - 8) sugieren que el comportamiento de dichos metales es el mismo en ambas profundidades por lo que se realizaron análisis estadísticos para corroborar dicha observación, para esto se aplicó una prueba de F para varianzas de dos muestras y una de t student, los cuales arrojaron la siguiente información: para el As  $P(F \leq f)$  de una cola fue de  $1.0685 \leq 1.8221$  y para el Hg  $P(F \leq f)$  de una cola fue de  $1.04612 \leq 1.8221$  por lo tanto las varianzas se consideraron equivalentes por lo que se realizó una prueba de t para dos muestras

suponiendo varianzas iguales y los resultados fueron para As el  $P(T \leq t)$  de una cola fue de  $0.0972 \leq 1.6698$ , mientras que para el Hg  $P(T \leq t)$  de una cola  $0.0710 \leq 1.6698$ , por lo tanto no se observaron diferencias significativas y el comportamiento de ambos metales a los dos diferentes niveles (0-15 cm y 15 – 30 cm) se consideró equivalente. Para el caso del Cd  $P(F \leq f)$  de una cola el resultado fue de  $0.9543 \leq 0.5488$  y en el caso del Pb  $P(F \leq f)$  de una cola fue de  $0.9921 \leq 0.5488$  por lo tanto las varianzas fueron desiguales; se realizó una prueba de t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales y los resultados fueron para Cd  $P(T \leq t)$  una cola  $0.0073 \leq 1.6698$  y para el Pb  $P(T \leq t)$  una cola  $0.04446 \leq 1.6698$  por lo tanto el comportamiento de estos dos metales también es equivalente a ambos niveles de profundidad, corroborando la hipótesis de que el comportamiento de los cuatro metales analizados es el mismo en los dos niveles de muestreo.

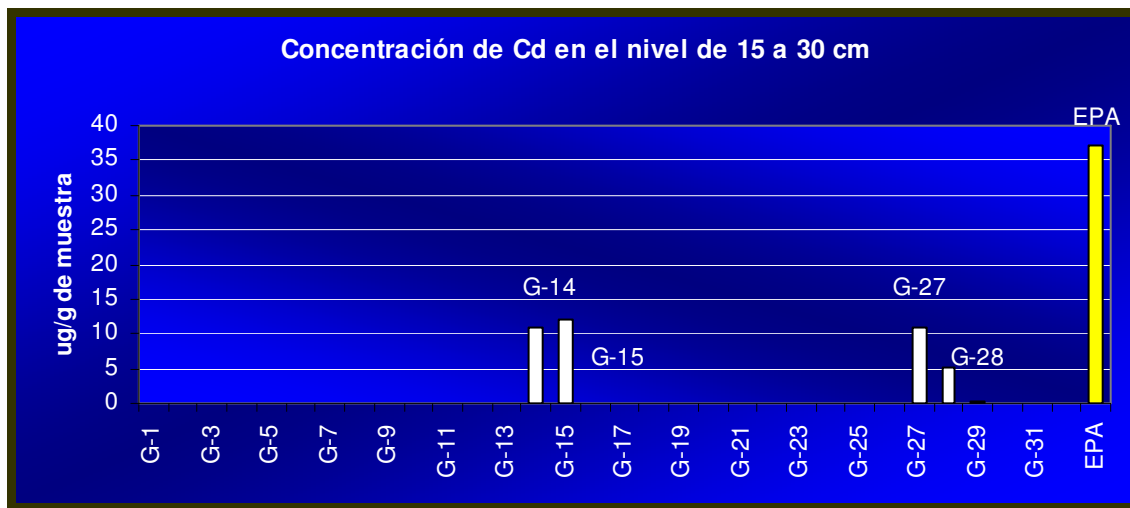
| <b>Punto de muestreo</b>                      | <b>Arsénico<br/>µg/g</b> | <b>Cadmio<br/>µg/g</b> | <b>Mercurio<br/>µg/g</b> | <b>Plomo<br/>µg/g</b> |
|---|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Nivel permitido para suelos EPA <sup>45</sup> | 22                       | 37                     | 23                       | 400                   |
| G-1   | 4.8                      | <                      | 0.11                     | 8.7                   |
| G-2   | 4.3                      | <                      | 0.08                     | 12                    |
| G-3   | 4.2                      | <                      | 0.07                     | 12                    |
| G-4   | 11                       | <                      | 0.12                     | 7.7                   |
| G-5   | 9.7                      | <                      | 0.11                     | 15                    |
| G-6   | 9.4                      | <                      | 0.30                     | 27                    |
| G-7   | 3.6                      | <                      | 0.04                     | 14                    |
| G-8   | 4.3                      | <                      | 0.12                     | 16                    |
| G-9   | 4.8                      | <                      | 0.05                     | 11                    |
| G-10  | 3.6                      | <                      | 0.16                     | 12                    |
| G-11  | -                        | <                      | -                        | -                     |
| G-12  | 8.5                      | <                      | 0.44                     | 16                    |
| G-13  | 3                        | <                      | 0.07                     | 9.2                   |
| G-14  | 93                       | 11                     | 34                       | 610                   |
| G-15  | 78                       | 12                     | 53                       | 730                   |
| G-16  | 5.6                      | <                      | 0.19                     | 14                    |
| G-17  | 13                       | 0.1                    | <                        | 43                    |

| Punto de muestreo | Arsénico<br>µg/g | Cadmio<br>µg/g | Mercurio<br>µg/g | Plomo<br>µg/g |
|-------------------|------------------|----------------|------------------|---------------|
| G-18              | 5.9              | <              | <                | 28            |
| G-19              | 5.3              | <              | 0.39             | 26            |
| G-20              | 5.3              | <              | 0.20             | 14            |
| G-21              | 7.4              | <              | 0.86             | 33            |
| G-22              | 8.9              | <              | 0.98             | 18            |
| G-23              | 7.2              | <              | 0.49             | 17            |
| G-24              | 5.4              | <              | 0.62             | 20            |
| G-25              | 6.8              | <              | 0.84             | 32            |
| G-26              | 4.4              | <              | 0.39             | 16            |
| G-27              | 64               | 11             | 290              | 1300          |
| G-28              | 51               | 5.1            | 83               | 650           |
| G-29              | 8.1              | 0.2            | 1.9              | 55            |
| G-30              | 4.4              | <              | 0.06             | 11            |
| G-31              | 3.7              | <              | 0.11             | 13            |
| G-32              | 3.7              | <              | 0.07             | 12            |

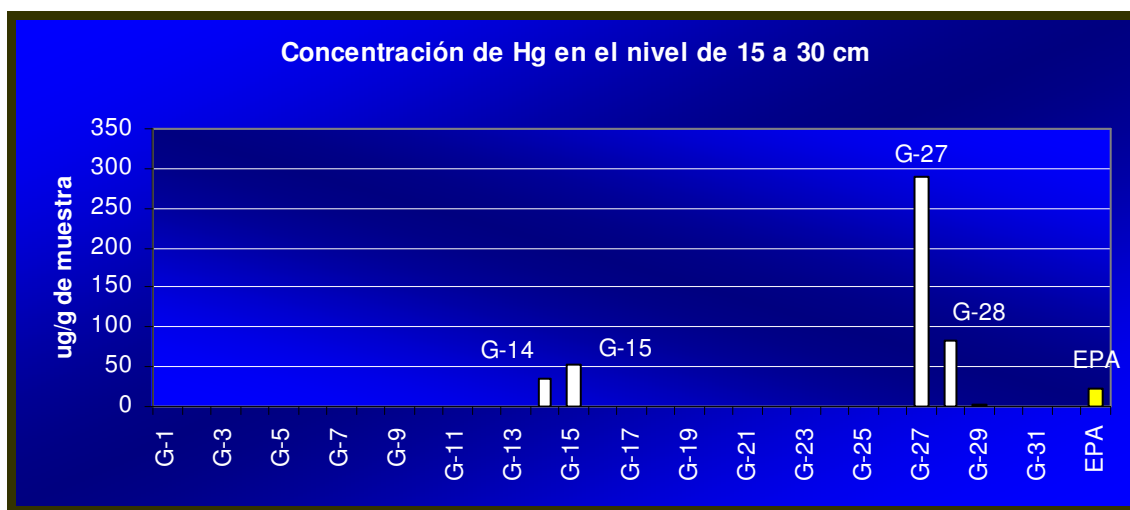
Tabla 9. Concentración de metales pesados en el nivel de 15 a 30 cm



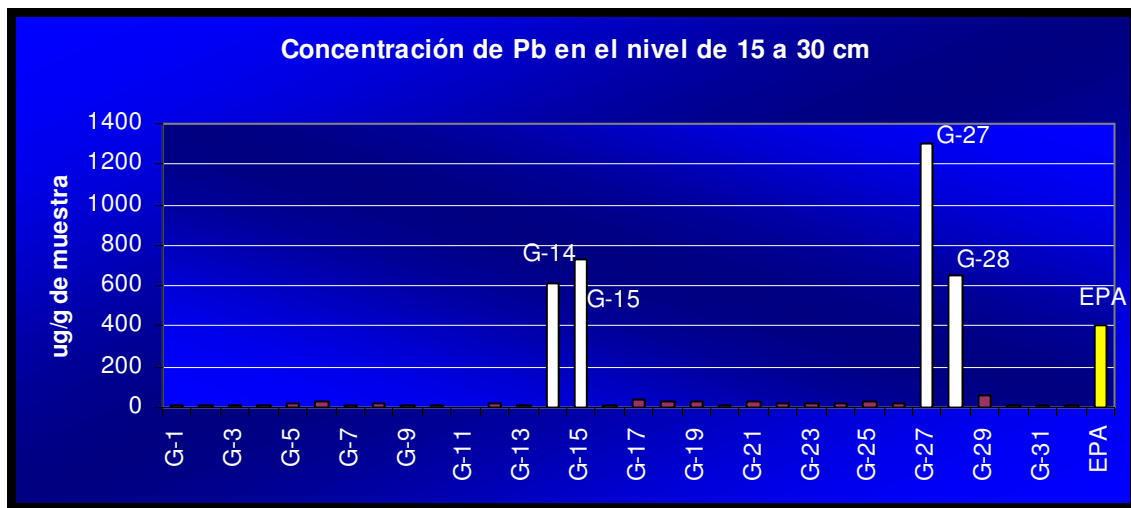
Grafica 5. Concentración de arsénico en los 32 puntos de muestreo comparados con el nivel permitido por la EPA.



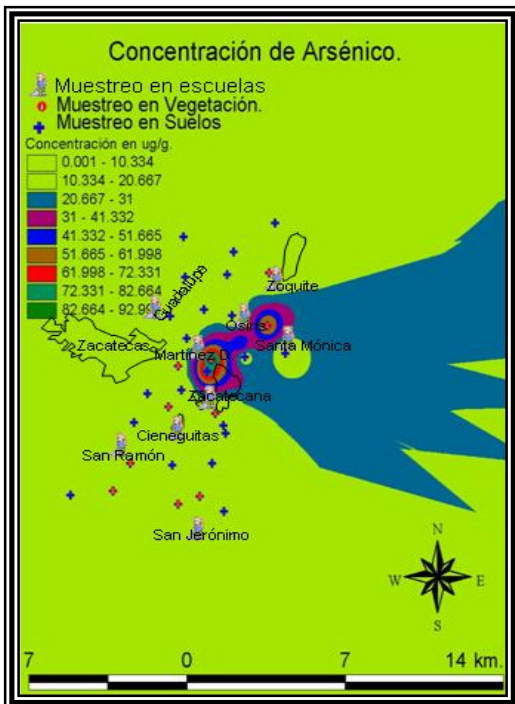
Grafica 6. Concentración de cadmio en los 32 puntos de muestreo comparados con el nivel permitido por la EPA.



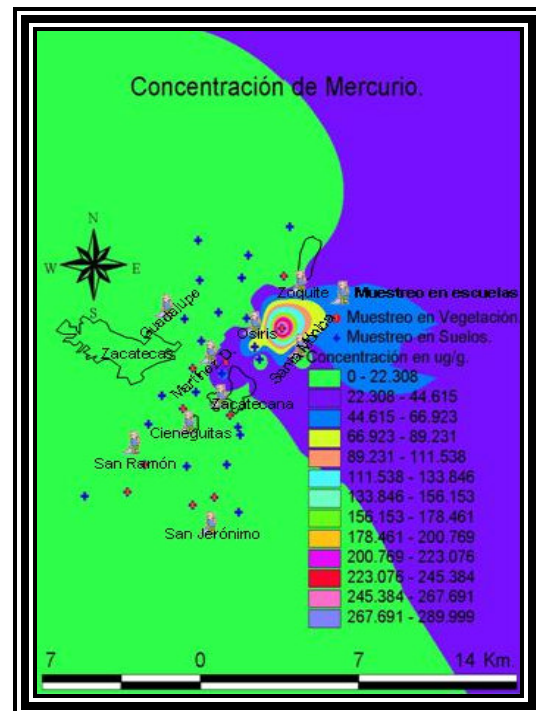
Grafica 7. Concentración de mercurio de los 32 puntos de muestreo comparados con el nivel permitido por la EPA.



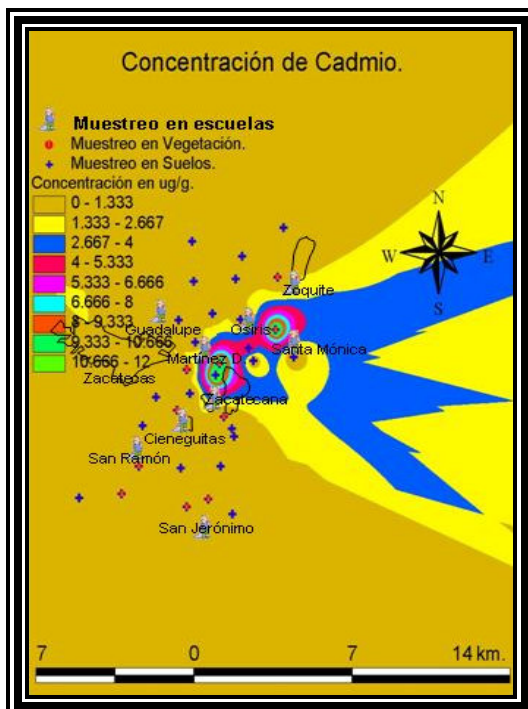
**Grafica 8. Concentración de plomo de los 32 puntos de muestreo comparados con el nivel permitido por la EPA.**



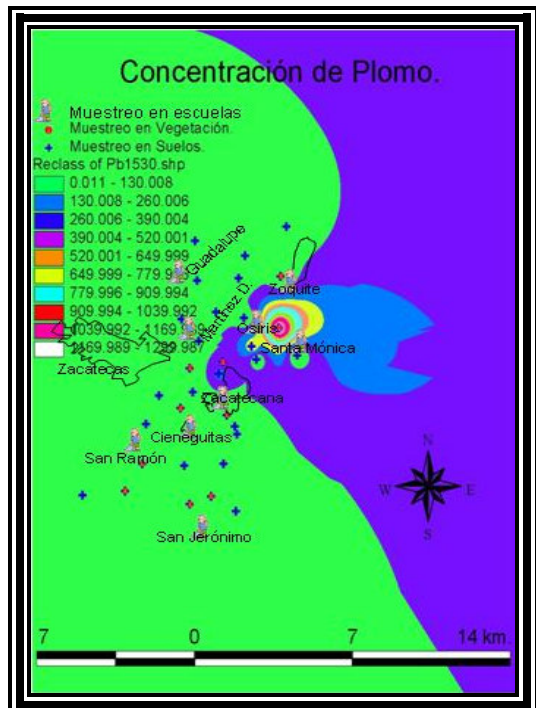
Mapa 1. Distribución de la contaminación por arsénico



Mapa 3. Distribución de la contaminación por mercurio



Mapa 2. Distribución de la contaminación por cadmio



Mapa 4. Distribución de la contaminación por plomo

En el caso de los mapas 1 a 4 se puede ver que en todos los casos se encuentra una mayor concentración de metales en la zona que comprende el norte de la Presa la Zacatecana y al sur de Zoquite. En el caso del As y el Cd se forman dos anillos uno al norte de la presa y el otro a sur de Zoquite lo cual hace pensar que la contaminación por esos dos metales se extiende en un área mayor que la zona contaminada en el caso del Hg y Pb que tan solo formo un anillo al sur de Zoquite.

### ***Análisis de suelo superficial en escuelas***

En las tablas 10 y 11, así como en las gráficas 9 a 12 se muestra la información acerca de las escuelas donde se tomaron muestras de suelo superficial en el nivel de 0 a 5 cm. y los datos de las concentraciones detectadas de los metales.

| <b>Punto de muestreo</b> | <b>Escuela</b>                   | <b>Poblado</b>   | <b>Coordenadas</b>                                     |
|--------------------------|----------------------------------|------------------|--|
| S-1                      | Emiliano Zapata                  | San Ramón        | N 22°41'48.35"<br>O 102°31'31.75"<br>m.s.n.m: 2290.4 m |
| S-2                      | Daniel Camarena                  | San Jerónimo     | N 22°39'01.85"<br>O 102°29'11.64"<br>m.s.n.m: 2261 m   |
| S-3                      | Belisario Domínguez              | Cieneguitas      | N 22°42'35.08"<br>O 102°29'30.47"<br>m.s.n.m: 2228.4 m |
| S-4                      | Felipe Carrillo Puerto           | Laguna de Arriba | N 22°43'22.02"<br>O 102°28'18.84"<br>m.s.n.m: 2212.8 m |
| S-5                      | Luis de la Rosa                  | Santa Mónica     | N 22°45'14.05"<br>O 102°25'23.48"<br>m.s.n.m: 2170.3 m |
| S-6                      | Francisco González<br>Boca Negra | Colonia Osiris   | N 22°45'57.28"<br>O 102°27'17.99"<br>m.s.n.m: 2171.8 m |
| S-7                      | Miguel de Cervantes<br>Saavedra  | Zoquite          | N 22°47'10.19"<br>O 102°25'27.95"<br>m.s.n.m: 2306.4 m |

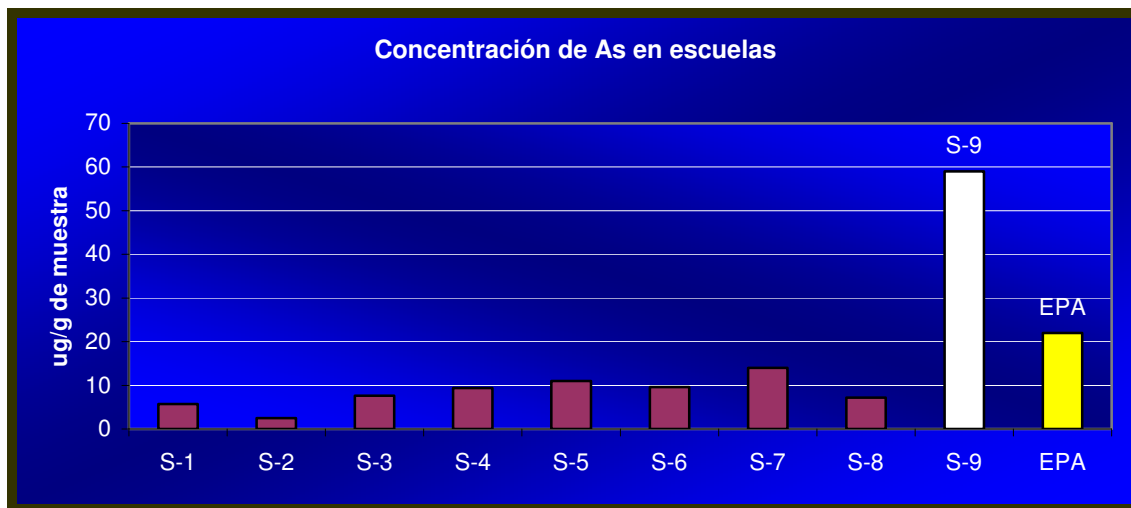
| Punto de muestreo | Escuela                          | Poblado               | Coordenadas  |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------|--|
| S-8               | José Vasconcelos                 | Guadalupe             | N 22°46'12.59"<br>O 102°30'28.19"<br>m.s.n.m: 2306.4 m |
| S-9               | Francisco González<br>Boca Negra | Martínez<br>Domínguez | N 22°44'57.38"<br>O 102°28'44.09"<br>m.s.n.m: 2207.9 m |

Tabla 10. Muestreo de suelos en escuelas de Guadalupe, Zacatecas.

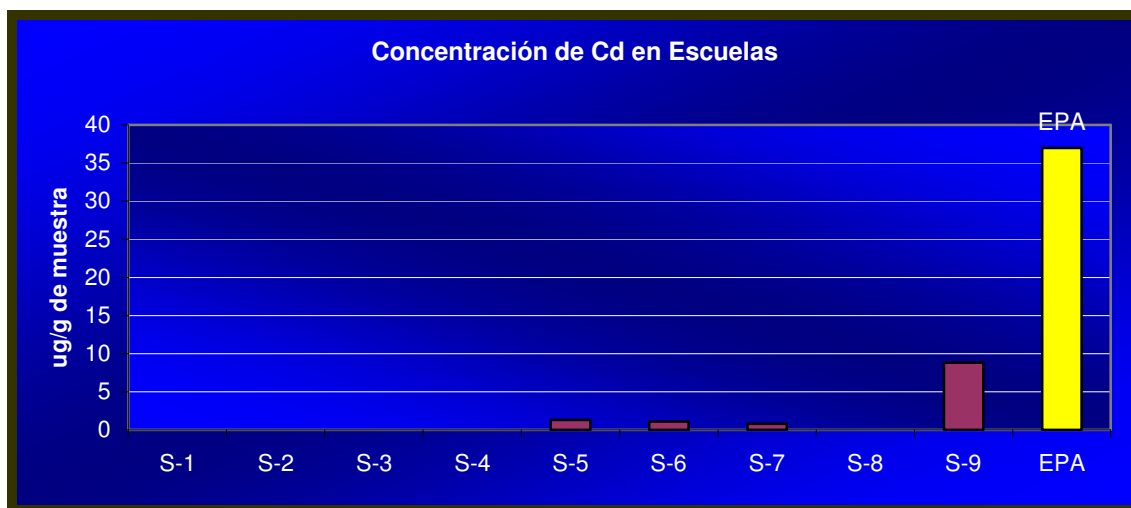
| Punto de muestreo (clave)                     | Arsénico $\mu\text{g/g}$ | Cadmio $\mu\text{g/g}$ | Mercurio $\mu\text{g/g}$ | Plomo $\mu\text{g/g}$ |
|---|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Nivel permitido para suelos EPA <sup>45</sup> | 22                       | 37                     | 23                       | 400                   |
| S-1   | 5.7                      | 0                      | 0.27                     | 19                    |
| S-2   | 2.5                      | 0                      | 0.04                     | 9.9                   |
| S-3   | 7.6                      | 0                      | 0.34                     | 16                    |
| S-4   | 9.4                      | 0                      | 0.49                     | 13                    |
| S-5   | 11                       | 1.3                    | 14                       | 120                   |
| S-6   | 9.6                      | 1.1                    | 5.1                      | 96                    |
| S-7   | 14                       | 0.8                    | 3.9                      | 87                    |
| S-8   | 7.2                      | 0                      | 1.1                      | 72                    |
| S-9   | 59                       | 8.8                    | 42.5                     | 78.                   |

Tabla 11. Cconcentración de metales pesados a en el nivel de 0 a 5 cm de las escuelas contempladas en el área de estudio.

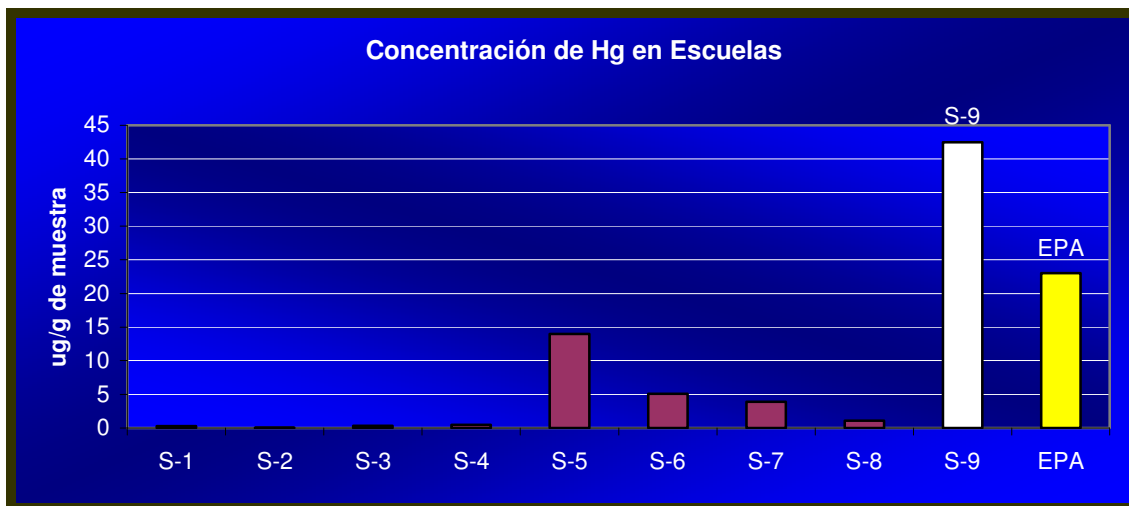




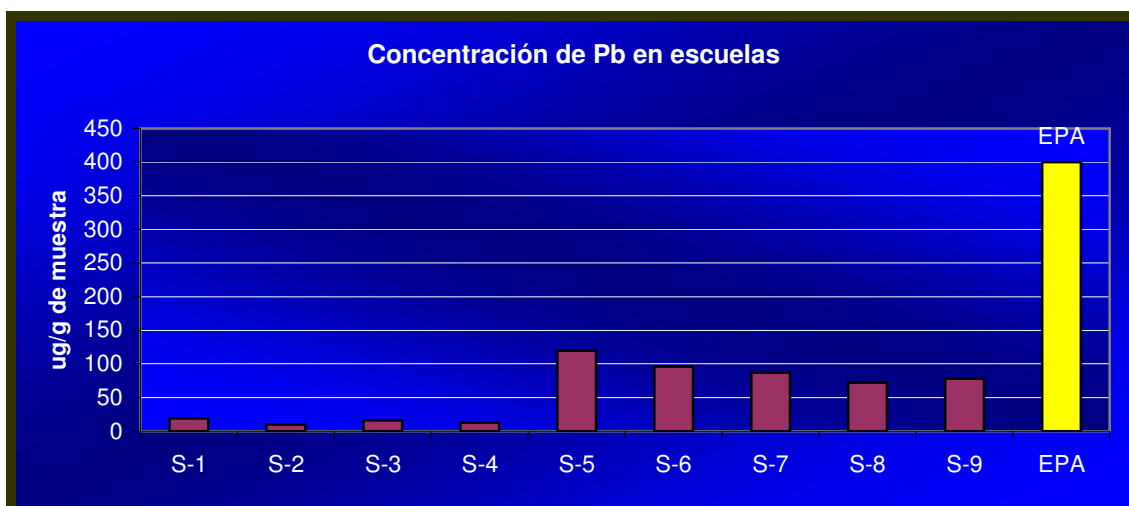
**Grafica 9. Concentración de arsénico en suelo de las escuelas de Guadalupe, Zacatecas.**



**Grafica 10. Concentración de cadmio en suelo de las escuelas de Guadalupe, Zacatecas.**



Grafica 11. Concentración de mercurio en suelo de las escuelas de Guadalupe, Zacatecas.



Grafica 12. Concentración de plomo en suelo de las escuelas de Guadalupe, Zacatecas.

### **Análisis de cultivos**

Como se menciona anteriormente la finalidad de determinar los niveles de metales en cultivos es evaluar como se comportan los metales con respecto a su concentración en suelo y la concentración en la parte comestible del vegetal y tener idea de que tanto pueden dañar a la salud y contar con herramientas que nos apoyen para tomar las medidas necesarias para actuar en caso de algún peligro que se pudiera tener en la zona con los metales evaluados.

En la tabla No. 12 se presentan los puntos de muestreo de vegetación y sus coordenadas geográficas.

| <b>Punto de muestreo</b> | <b>Sitio</b> | <b>Muestra</b>     | <b>Coordenadas</b>                                     |
|--------------------------|--------------|--------------------|--|
| V-1                      | G-2          | Granos de maíz     | N 22°40'24.86"<br>O 102°32'13.35"<br>m.s.n.m:2308 m    |
| V-2                      | G-3          | Granos de maíz     | N 22°41'18.32"<br>O 102°31'31.72"<br>m.s.n.m:2291m     |
| V-3                      | G-4          | Semillas de frijol | N 22°42'36.96"<br>O 102°31'21.24"<br>m.s.n.m:2268.7m   |
| V-4                      | G-6          | Granos de maíz     | N 22°44'26.15"<br>O 102°29'36.04"<br>m.s.n.m: 2237m    |
| V-5                      | G-7          | Granos de maíz     | N 22°39'56.14"<br>O 102°29'40.97"<br>m.s.n.m: 2256 m   |
| V-6                      | G-8          | Granos de maíz     | N 22°40'11.13"<br>O 102°28'50.41"<br>m.s.n.m: 2243 m   |
| V-7                      | G-8          | Granos de maíz     | N 22°40'11.13"<br>O 102°28'50.41"<br>m.s.n.m: 2243 m   |
| V-8                      | G-9          | Semillas de frijol | N 22°41'13.00"<br>O 102°29'52.92"<br>m.s.n.m: 2255 m   |
| V-9                      | G-10         | Granos de maíz     | N 22°43'07.01"<br>O 102°29'59.79"<br>m.s.n.m: 2235.8 m |
|                          |              |                    | N 22°42'51.62"<br>O 102°28'10.16"                      |

| Punto de muestreo | Sitio | Muestra            | Coordenadas   |
|-------------------|-------|--------------------|---|
| V-10              | G-12  | Granos de maíz     | m.s.n.m: 2201.9m  |
| V-11              | G-14  | Granos de maíz     | N 22°44'36.94"<br>O 102°28'18.04"<br>m.s.n.m: 2194.0 m  |
| V-12              | G-22  | Semillas de frijol | N 22°48'38.43"<br>O 102°29'18.86"<br>m.s.n.m: 2252.3 m  |
| V-13              | G-24  | Granos de maíz     | N 22°47'24.72"<br>O 102°25'58.56"<br>m.s.n.m: 2154.9 m  |
| V-14              | G-26  | Semillas de frijol | N 22°48'06.86"<br>O 102°27'21.25"<br>m.s.n.m: 2189.1m   |
| V-15              | G-27  | Granos de maíz     | N 22°45'42.13"<br>O 102°26'05.33"<br>m.s.n.m: 2159.95 m |
| V-16              | G-28  | Granos de avena    | N 22°45'06.43"<br>O 102°27'09.86"<br>m.s.n.m: 2174.6 m  |

**Tabla No. 12 Información recabada de los puntos de muestreo para la vegetación.**

En la tabla No. 13 se presentan los resultados de los niveles de metales encontrados en las muestras de vegetación sobre la base de su peso fresco.

| Sitio | Muestra            | As      | Cd      | Hg      | Pb      |
|-------|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| V-1   | Granos de maíz     | <0.0700 | <0.0140 | <0.0056 | <0.0420 |
| V-2   | Granos de maíz     | <0.0420 | <0.0084 | <0.0034 | <0.0252 |
| V-3   | Semillas de frijol | <0.0330 | <0.0066 | <0.0002 | <0.0198 |
| V-4   | Granos de maíz     | <0.0550 | <0.0110 | <0.0044 | <0.0330 |
| V-5   | Granos de maíz     | <0.0500 | <0.0100 | <0.0040 | <0.0300 |
| V-6   | Granos de maíz     | <0.0315 | <0.0063 | <0.0025 | <0.0189 |
| V-7   | Granos de maíz     | <0.0455 | <0.0091 | <0.0036 | <0.0273 |
| V-8   | Semillas de frijol | <0.0485 | <0.0097 | <0.0039 | <0.0291 |
| V-9   | Granos de maíz     | <0.0440 | <0.0088 | <0.0035 | <0.0264 |

| <b>Sitio</b> | <b>Muestra</b>     | <b>As</b> | <b>Cd</b> | <b>Hg</b> | <b>Pb</b> |
|--------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| V-10         | Granos de maíz     | <0.0505   | <0.0101   | <0.0041   | <0.0303   |
| V-11         | Granos de maíz     | <0.0405   | <0.0081   | <0.0032   | 0.0243    |
| V-12         | Semillas de frijol | <0.0350   | <0.0070   | <0.0028   | <0.0210   |
| V-13         | Granos de maíz     | <0.0750   | <0.0150   | <0.0060   | <0.0450   |
| V-14         | Semillas de frijol | <0.0455   | <0.0091   | <0.0036   | 0.073     |
| V-15         | Granos de maíz     | <0.0425   | <0.0085   | <0.0034   | 0.034     |
| V-16         | Granos de avena    | <0.0380   | 0.008     | <0.0030   | 0.106     |

**Tabla No. 13 Concentración de los metales encontrados en cultivos en base húmeda.**

En la tabla No. 14 se muestran los resultados del análisis de cultivos en base húmeda y se comparan con la concentración de los mismos contaminantes en el suelo en el mismo sitio de recolección. Para ver la correlación que existe entre la concentración de metales pesados en el suelo y la de los cultivos se elaboró un análisis de regresión lineal, observando que la probabilidad fue mayor a 0.05 (los datos no se presentan) y los valores de correlación entre el suelo y cultivos fueron muy bajos en el caso de las muestras de maíz, el As presentó un coeficiente de correlación de 0.4286, para el Hg de 0.3013 y para el Pb de 0.0547, en cuanto a la concentración de frijol se hizo el cálculo pero no se obtuvieron resultados confiables por lo que se decidió no presentar los datos ya que solo se colectaron 5 muestras y por lo cual se recomienda realizar un muestreo mas grande y que pueda reflejar mejor que esta pasando con respecto a la presencia de metales en el suelo y su posible absorción por cultivos, en el caso del Cd no se pudo determinar la correlación, ya que no se presentaron niveles detectables en el suelo.

| <b>Sitio</b> | <b>Muestra</b>     | <b>Arsénico<br/>µg/g</b> | <b>Cadmio<br/>µg/g</b> | <b>Mercurio<br/>µg/g</b> | <b>Plomo<br/>µg/g</b> |
|--------------|--------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| V-1          | Granos de maíz     | <0.0700                  | <0.0140                | <0.0056                  | <0.0420               |
| G-2          | Suelo              | 4.25                     | 0                      | 0.075                    | 13                    |
| V-2          | Granos de maíz     | <0.0420                  | <0.0084                | <0.0034                  | <0.0252               |
| G-3          | Suelo              | 3.75                     | 0                      | 0.075                    | 11.5                  |
| V-3          | Semillas de frijol | <0.0330                  | <0.0066                | <0.0002                  | <0.0198               |
| G-4          | Suelo              | 10.25                    | 0                      | 0.12                     | 9.35                  |
| V-4          | Granos de maíz     | <0.0550                  | <0.0110                | <0.0044                  | <0.0330               |
| G-6          | Suelo              | 9.4                      | 0                      | 0.645                    | 32.5                  |
| V-5          | Granos de maíz     | <0.0500                  | <0.0100                | <0.0040                  | <0.0300               |
| G-7          | Suelo              | 3.6                      | 0                      | 0.065                    | 14                    |
| V-6          | Granos de maíz     | <0.0315                  | <0.0063                | <0.0025                  | <0.0189               |
| G-8          | Suelo              | 4.3                      | 0                      | 0.13                     | 16.5                  |
| V-7          | Granos de maíz     | <0.0455                  | <0.0091                | <0.0036                  | <0.0273               |
| G-8          | Suelo              | 4.3                      | 0                      | 0.13                     | 16.5                  |
| V-8          | Semillas de frijol | <0.0485                  | <0.0097                | <0.0039                  | <0.0291               |
| G-9          | Suelo              | 4.5                      | 0                      | 0.05                     | 10.5                  |
| V-9          | Granos de maíz     | <0.0440                  | <0.0088                | <0.0035                  | <0.0264               |
| G-10         | Suelo              | 3.6                      | 0                      | 0.17                     | 12                    |
| V-10         | Granos de maíz     | <0.0505                  | <0.0101                | <0.0041                  | <0.0303               |
| G-12         | Suelo              | 8.2                      | 0                      | 0.42                     | 17                    |
| V-11         | Granos de maíz     | <0.0405                  | <0.0081                | <0.0032                  | 0.0243                |
| G-14         | Suelo              | 91                       | 11                     | 33                       | 615                   |
| V-12         | Semillas de frijol | <0.0350                  | <0.0070                | <0.0028                  | <0.0210               |
| G-22         | Suelo              | 9.45                     | 0                      | 0.775                    | 20.5                  |
| V-13         | Granos de maíz     | <0.0750                  | <0.0150                | <0.0060                  | <0.0450               |
| G-24         | Suelo              | 5.5                      | 0                      | 0.635                    | 20.5                  |
| V-14         | Semillas de frijol | <0.0455                  | <0.0091                | <0.0036                  | 0.073                 |

| <b>Sitio</b> | <b>Muestra</b>  | <b>Arsénico<br/>µg/g</b> | <b>Cadmio<br/>µg/g</b> | <b>Mercurio<br/>µg/g</b> | <b>Plomo<br/>µg/g</b> |
|--------------|-----------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| G-26         | Suelo           | 4.45                     | 0                      | 0.395                    | 16.5                  |
| V-15         | Granos de maíz  | <0.0425                  | <0.0085                | <0.0034                  | 0.034                 |
| G-27         | Suelo           | 66                       | 11                     | 290                      | 1300                  |
| V-16         | Granos de avena | <0.0380                  | 0.008                  | <0.0030                  | 0.106                 |
| G-28         | Suelo           | 52.5                     | 5.4                    | 96.5                     | 685                   |

**Tabla No. 14 Concentración de los metales encontrados en la vegetación sobre la base húmeda contra la concentración media en suelo.**

### ***Evaluación de riesgos (Cálculo del HQ)***

#### ***Adultos***

Se realizaron cálculos de índice de peligro para daños no carcinogénicos, para As, Cd y Hg y se excluyó al plomo debido a que no se ha establecido una RfD, dado que no hay evidencia de un umbral por debajo del cual no sean experimentados efectos nocivos. En este sentido una decisión para establecer un nivel límite y de preocupación sería arbitraria y proporcionaría resultados inciertos<sup>9</sup>, para los demás metales se evaluó y se consideró a la unidad (1) para establecer si existía riesgo o no para las enfermedades mostradas en la tabla 15.

| Efectos críticos para un HQ ≥ 1   | Referencia.  |
|---|--|
| <b>As.</b><br>Hiperpigmentación, keratosis y Posibles complicaciones vasculares.  | Tseng, 1977 <sup>41</sup> ; Tseng <i>et al.</i> , 1968 <sup>42</sup>   |
| <b>Cd.</b><br>Proteinuria<br>Dato de estudios en humanos con exposición crónica.  | U.S. EPA, 1985 <sup>43</sup>   |
| <b>Hg.*</b><br>Temblor de mano, incrementos en los disturbios de la memoria, y hay una pequeña evidencia de la disfunción autónoma.<br>Datos de estudios de exposición ocupacional. | Fawer <i>et al.</i> , 1983 <sup>11</sup> ;<br>Piikivi and Hanninen, 1989 <sup>32</sup> ,<br>Piikivi, 1989 <sup>33</sup> ,<br>Ngim <i>et al.</i> , 1992 <sup>26</sup> ,<br>Liang <i>et al.</i> , 1993 <sup>20</sup> |

- \*La (RfC) para inhalación es análoga a la RfD oral y se basa en asumir que los umbrales existentes son iguales para ciertos efectos tóxicos tales como necrosis celular.

**Tabla No. 15 Efectos que se podrían desarrollar por la exposición crónica a As, Cd y Hg.**

Se realizó el cálculo para adultos con una ingestión promedio de suelo de 50mg/día<sup>44</sup>, en la tabla 16 se puede observar que hay poco riesgo de desarrollar alguna enfermedad por parte de los adultos como consecuencia de los metales pesados analizados pues el valor máximo calculado para mercurio fue de 0.69 valor que está por debajo de la unidad (sitio G-27) y el valor mas bajo para mercurio fue de 0.076. El Cd presentó los valores mas bajos de riesgo, en cuanto a la media de los metales los niveles fueron muy bajos por lo que se considera un riesgo bajo de desarrollar enfermedades asociadas con los metales pesados en la población expuesta.



|                          |              | <b>Arsénico</b>  | <b>Cadmio</b>   | <b>Mercurio</b>  |
|--------------------------|--------------|------------------|-----------------|------------------|
|                          | <b>G-14</b>  | <b>89 µg/g</b>   | <b>11 µg/g</b>  | <b>32 µg/g</b>   |
| Índice de peligro-adulto |              | 0.2119           | 0.00785714      | 0.07619048       |
|                          | <b>G-15</b>  | <b>87 µg/g</b>   | <b>11 µg/g</b>  | <b>52 µg/g</b>   |
| Índice de peligro-adulto |              | 0.20714          | 0.00785714      | 0.12380952       |
|                          | <b>G- 27</b> | <b>68 µg/g</b>   | <b>11 µg/g</b>  | <b>290 µg/g</b>  |
| Índice de peligro-adulto |              | 0.1619           | 0.00785714      | 0.69047619       |
|                          | <b>G-28</b>  | <b>54 µg/g</b>   | <b>5.7 µg/g</b> | <b>110 µg/g</b>  |
| Índice de peligro-adulto |              | 0.12857          | 0.00407143      | 0.26190476       |
|                          | <b>media</b> | <b>6.15 µg/g</b> | <b>0 µg/g</b>   | <b>0.58 µg/g</b> |
| Índice de peligro-adulto |              | 0.01466          | 0               | 0.00138095       |

**Nota:** la media no contempla a los sitios G-14, 15, 27 y 28

**Tabla No. 16 Cálculo de HQ para adultos con 50mg/día de suelo ingerido.**

### **Niños**

En el caso de los niños se realizó el cálculo del HQ tomando como referencia dos datos de ingesta de suelo, uno de 190mg/día, y otro de 90mg/día<sup>4</sup> (Ver tabla No. 17 y 18) como se recomienda en la literatura (HQ).

| <b>Índice calculado para una ingestión de 190mg/día</b> |              |                 |                 |                 |
|---|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|   |              | <b>Arsénico</b> | <b>Cadmio</b>   | <b>Mercurio</b> |
|   | <b>G-14</b>  | <b>89 µg/g</b>  | <b>11 µg/g</b>  | <b>32 µg/g</b>  |
| Índice de peligro-niño<br>190mg/día                     |              | 1.6105          | 0.0597          | 0.579           |
|   | <b>G-15</b>  | <b>87 µg/g</b>  | <b>11 µg/g</b>  | <b>52 µg/g</b>  |
| Índice de peligro-niño<br>190mg/ día                    |              | 1.5743          | 0.0597          | 0.941           |
|   | <b>G- 27</b> | <b>68 µg/g</b>  | <b>11 µg/g</b>  | <b>290 µg/g</b> |
| Índice de peligro-niño<br>190mg/ día                    |              | 1.2305          | 0.0597          | 5.2476          |
|   | <b>G-28</b>  | <b>54 µg/g</b>  | <b>5.7 µg/g</b> | <b>110 µg/g</b> |
| Índice de peligro-niño                                  |              | 0.9771          | 0.0309          | 1.9905          |

|                                      |                       |               |                      |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|
| 190mg/ día                           |                       |               |                      |
| <b>media</b>                         | <b>6.157<br/>µg/g</b> | <b>0 µg/g</b> | <b>0.58<br/>µg/g</b> |
| Índice de peligro-niño<br>190mg/ día | 0.1114                | 0             | 0.0105               |

**Nota:** la media no contempla a los sitios G-14, 15, 27 y 28

**Tabla No. 17 Cálculo de HQ para niños con el valor de 190mg/día de suelo ingerido.**

Como se puede ver en la tabla 17 el máximo valor calculado se obtuvo para el mercurio que dio 5.24 para una ingesta de 190mg/día (sitio G-27) seguido por otro, que es para el G-28 el cual también rebaso la unidad y que para la media de las concentraciones de Hg estuvo muy por debajo de la unidad con 0.0105. En el caso del As en todos los puntos se rebaso la unidad siendo en el punto G-14 donde se tiene el valor mas alto de 1.6105 mientras que la media estuvo por debajo con 0.1114 y con el Cd se aprecia que no representa riesgos considerables.

| <b>Índice calculado para una ingestión de 90mg/día</b> |              |                       |                 |                      |
|--|--------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
| Índice de peligro-niño<br>90mg/ día                    |              | 0.1114                | 0               | 0.0105               |
|  | <b>G-14</b>  | <b>89 µg/g</b>        | <b>11 µg/g</b>  | <b>32 µg/g</b>       |
| Índice de peligro-niño<br>90mg/ día                    |              | 0.7629                | 0.0283          | 0.2743               |
|  | <b>G-15</b>  | <b>87 µg/g</b>        | <b>11 µg/g</b>  | <b>52 µg/g</b>       |
| Índice de peligro-niño<br>90mg/ día                    |              | 0.7457                | 0.0283          | 0.4457               |
|  | <b>G- 27</b> | <b>68 µg/g</b>        | <b>11 µg/g</b>  | <b>290 µg/g</b>      |
| Índice de peligro-niño<br>90mg/ día                    |              | 0.5829                | 0.0283          | 2.4857               |
|  | <b>G-28</b>  | <b>54 µg/g</b>        | <b>5.7 µg/g</b> | <b>110 µg/g</b>      |
| Índice de peligro-niño<br>90mg/ día                    |              | 0.46                  | 0.0147          | 0.9429               |
| <b>media</b>   |              | <b>6.157<br/>µg/g</b> | <b>0 µg/g</b>   | <b>0.58<br/>µg/g</b> |
| Índice de peligro-niño<br>90mg/ día                    |              | 0.0528                | 0               | 0.005                |

**Nota:** la media no contempla a los sitios G-14, 15, 27 y 28

**Tabla No. 18 Cálculo de HQ para niños con el valor de 90mg/día de suelo ingerido.**

Se calculo nuevamente el HQ con un valor de ingesta de 90mg/día para comparar los resultados dependiendo del nivel de ingesta, en la tabla número 18 se puede apreciar que los valores son menores a los calculados con 190mg/día pero aun así en el caso del Hg G-27 presenta el valor mas elevado de 2.4857 y el resto ya dio por debajo de la unidad, lo mismo paso con el As donde el máximo valor fue de 0.7629 lo cual aparentemente representa un bajo riesgo, para la media siguió la misma tendencia solo que esta vez fueron todavía mas pequeños los valores calculados.

### **Análisis de resultados:**

En la literatura se reporta que las concentraciones de Pb halladas en sedimentos no contaminados oscilan entre 10  $\mu\text{g/g}$  y 50  $\mu\text{g/g}$  <sup>6, 21, 35</sup>. En el presente estudio se encontró que la mayoría de los puntos en los que se evaluó la concentración de Pb, presentaron concentraciones por debajo del nivel recomendado por la EPA (400  $\mu\text{g/g}$ ), siendo sólo cuatro los puntos en los que se rebaso dicho nivel. El mismo fenómeno se vio con los demás metales analizados en los cuales cabe aclarar que se determinaron metales totales y en ningún caso se hicieron estudios de biodisponibilidad, al apoyarnos en las tablas, gráficas y sobre todo en los mapas digitalizados se puede entender mejor como se distribuyen los metales en la zona de estudio (*Para un mejor entendimiento del análisis de resultados ver el Anexo A, ya que trata sobre las propiedades y características toxicológicas de estos metales evaluados*).

Los mapas muestran que la zona que presentó contaminación por arriba de la concentración recomendada por EPA para el caso de As, Hg y Pb fue la que se encuentra al norte de la presa La Zacatecana y se extiende hasta el sur de Zoquite, mientras que la mayor parte del área de estudio se encuentra con niveles mas bajos. El programa permitió interpolar y extrapolar las concentraciones encontradas en los diferentes puntos donde se evaluaron los niveles de metales en suelo asignando rangos lo cual permite representar y observar con mayor entendimiento la dispersión de estos en la zona de estudio, ahora bien el programa tiene o puede tener errores al interpolar los datos, pero para fines prácticos de ver la dispersión, este tipo de herramientas es muy buena ya que se puede ver directamente en el mapa su comportamiento lo cual es muy complicado observar en tablas o graficas. El error que puede haber por parte del programa al extrapolar los datos a zonas mas alejadas y donde no se muestreo puede ser mayor y puede no reflejar lo que esta pasando.

Según los resultados obtenidos en el presente estudio se observó una baja correlación entre las concentraciones en suelo y las de la parte comestible como lo fue en el caso del maíz (*hay que recordar que en el caso de las muestras de frijol*

*no se presentan los datos ya que tan solo se tuvieron 5 muestras de este y no fue considerado apropiado el valerse de esos datos por lo cual se necesita hacer más muestreo de cultivos* ) debido tal vez a que los metales se encuentran fuertemente unidos a las partículas del suelo o posiblemente a que no se encontraran biodisponibles dichos metales y que cabe señalar que no se hicieron estudios de morfología, granulometría, etc. que nos pudieran dar elementos para establecer si existe una afectación en los cultivos por los niveles de contaminantes en suelo.

Para la evaluación de riesgo a la salud mediante la técnica utilizada no se pudo realizar un cálculo de HQ para el Pb ya que no se han establecido valores de referencia reportados para Pb debido a que no se ha establecido un umbral donde se observen efectos a la salud, principalmente en niños, por lo cual se recomienda desarrollar una metodología específica para el lugar de estudio, considerando las características del sitio, el nivel socioeconómico y hábitos alimentarios.

En cuanto a las concentraciones encontradas en las escuelas, en ninguno de los casos se rebasó el nivel recomendado por la EPA, por lo que aparentemente no representan peligro para la salud de los niños, pero se debe tener cuidado ya que todavía es controversial y se discute como no se puede tener absoluta confianza en establecer un nivel al cual se pueda decir con absoluta confianza que no existe ningún peligro de desarrollar alguna enfermedad, por lo cual se recomienda estar alerta para detectar daños a la salud y sobre todo que los médicos del lugar no descarten en ningún momento el involucramiento de este metal y de los demás tratados en este estudio.

Además en lo que respecta a los cálculos realizados para HQ la población más vulnerable fue la de los niños ya que en el caso de los adultos ninguna vez se rebaso la unidad en tanto que en los niños fue todo lo contrario. Para el As considerando una ingesta de 190mg/día de suelo se observó que el HQ rebaso la unidad en los puntos G-14, G-15, y G-27 siendo estos donde se detectaron las mas altas concentraciones de las cuatro especies contaminantes analizadas, siendo el punto G-14 el de mayor riesgo con un HQ igual a 1.6105, mientras que el de menor riesgo es el G-28 con un HQ de 0.9771. Con respecto al mercurio, el

sitio G-27 presenta el valor más alto del índice de peligro para los niños, siendo este de 5.2476, mientras que en los puntos G-14 y G-15 no rebasaron la unidad, lo que puede dar idea de desarrollar efectos adversos a la salud, por medio de estos datos se pudiera concluir que existe un gran riesgo tanto por Hg como por As, sin embargo se considera que no son suficientes para concluir que el riesgo es alto o bajo ya que esto depende de muchos factores sociales, biológicos, económicos y sobre todo de la forma química en que se encuentre el metal ya que no depende de la concentración solamente si no de su forma química y concentración, además del tipo de exposición, al respecto en la zona se realizó un estudio epidemiológico en el cual no se encontró asociación entre algún tipo de síntomas manifestados y metales pesados<sup>29</sup> una ventaja que hay en la zona es que la contaminación es solo en una porción y tal vez se podrían realizar estudios los cuales involucraran la toma de muestra biológicas y buscar marcadores de daño por exposición a estos metales o incluso estudios de biodisponibilidad de los metales evaluados sin considerar al Cd, ya que este se encontró en muy bajas concentraciones y en ocasiones no fue detectado.

La misma tendencia se observó con una ingesta de 90mg/día aunque ahora la mayoría de los puntos de muestreo presentaron índices de peligro por debajo de la unidad; para el caso del Hg en el punto G- 27 presentó un HQ de 2.4857, con este nivel de ingesta de suelo, los riesgos a la salud bajan considerablemente con respecto al valor de 190 mg/g, pero se recomienda elaborar un estudio de los niveles de ingesta y determinar los relacionados a cualquier otra vía de exposición pues lo ideal según la técnica utilizada es hacer los cálculos por diferentes vías de exposición contemplando por ejemplo alimentos, contacto dérmico o inhalación y con esto se esperaría tener un valor mayor de HQ, pero esto tal vez sería erróneo por lo cual nuevamente se propone hacer otros tipos de estudios como el monitorear a la población tomando siempre en cuenta que está expuesta a altas concentraciones de metales pesados y en especial de los habitantes de la zona problema (al norte de la Zacatecana y hacia el sur de Zoquite).

A pesar de ser dudosos los resultados del cálculo de índice de peligro se considera importante que se sigan haciendo este tipo de estudios ya que son escasos o muy pocos los trabajos que impliquen la evaluación de riesgos a la salud humana como el presente, lo cual contribuiría a desarrollar nuevas metodologías más eficientes en la valoración del riesgo y que pudieran ser aplicables con mayor confianza o tal vez utilizar esta metodología pero enriqueciéndola con otros datos como la biodisponibilidad de los metales a evaluar y de ser posible considerar factores económicos, sociales, demográficos, ambientales, culturales, etc.





## Conclusiones

Los metales de preocupación son el As, Hg y Pb por estar por arriba de los niveles establecidos por la EPA.

La mayor parte de la zona de estudio presenta bajos niveles de metales pesados en relación a los niveles establecidos por la EPA.

La alta concentración de estos metales en la zona que comprende del norte de la Presa la Zacatecana hasta el sur de Zoquite está relacionada con el tipo de suelo que es de fluvisol calcárico los cuales presentan una alta cantidad de cieno, que al parecer tiene que ver con la deposición histórica en el plano de inundación y no a una fuente antropogénica<sup>31</sup>.

No se encontraron diferencias en las concentraciones de metales pesados en los niveles evaluados (0-15 y 15-30 cm).

Los metales analizados mostraron una baja correlación con las muestras de maíz.

A pesar de haber calculado el HQ el peligro de desarrollar enfermedades tanto para adultos como para los niños es dudoso por lo cual se deben desarrollar metodologías que permitan estar monitoreando a la población y que permitan actuar de forma inmediata si se llegara a dar casos de intoxicación por estos metales.

## **Recomendaciones**

Para determinar la probabilidad de afectación, es necesaria la aplicación de una metodología propia para el lugar, empezando por estandarizar la ingesta de suelo por parte de la población ya que este parámetro es de mucha importancia para tener un valor por debajo o por arriba de la unidad, también cabe aclarar que solo se evaluó el HQ para la vía oral y es recomendado hacer los cálculos de exposición por ingestión de agua e inhalación y sumar los HQ respectivos pero este estudio no contempló las otras vías de exposición por lo cual estos resultados deben ser tomados con prudencia.

Se tienen que desarrollar otros estudios en el área, como los epidemiológicos que contemplen al Pb que no pudo ser evaluado al carecer una dosis de referencia y reforzado con análisis de muestras biológicas de los pobladores del lugar tanto de los adultos como de los niños que son la población más susceptible.

Se recomienda también que los médicos de la zona se mantengan pendientes y nunca descarten cualquier intoxicación por metales pesados en particular causados por As, Hg y Pb.

## Bibliografía:

1. Anuario Estadístico de Zacatecas. 2001. Información disponible en la dirección de Internet: <http://www.semarnat.gob.mx/zacatecas/infoedo/isgez.shtml>
2. ATSDR. 1997. ATSDR's toxicological Profiles. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, US Public Health Service, Publ: Lewis Publishers.
3. Balsberg, A. 1989. Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants. *Water Air Soil Poll* 47: 287-319.
4. Batres, L, Carrizales, L, Calderón, J y Díaz-Barriga, F. 1995. Participación del barro vidriado en la exposición infantil al plomo en una comunidad industrial expuesta ambientalmente a este metal. *En: Intoxicación por plomo en México: prevención y control (Hernández M y Palazuelos E eds). Instituto Nacional de Salud Pública y Departamento de Distrito Federal. :175-185.*
5. Berg, T., Røyset, O., Steinnes, E. y Vadset, M. 1995. Atmospheric trace element deposition: Principal component analysis of ICP-MS data from moss samples *Environmental Pollution*. 88(1): 67-77.
6. Bryan y Langston. 1992. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environmental Pollution*. 76(2) :89-131
7. CCA (Comisión para la cooperación Ambiental de América del Norte). 2003. Iniciativa Manejo Adecuado de las Sustancias Químicas de la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. Disponible en la dirección de Internet: [http://www.cec.org/files/pdf/pollutants/smoc-overview/update\\_oct03\\_es.pdf](http://www.cec.org/files/pdf/pollutants/smoc-overview/update_oct03_es.pdf)
8. Cebrian, M. 1998. "Evaluación de la exposición a mercurio en una comunidad de Zacatecas, México". Contrato 98.03.01 Sound Management of chemicals. Actividad 9.

9. Centers for Disease Control and Prevention. 2004. Atlanta, GA 30333, U.S.A / Public Inquiries: (404) 639-3534 / (800) 311-3435, <http://www.cdc.gov/nceh/lead/spotLights/changeBLL.htm>.
10. Cherian, M. 1989. Metallothionein in mineral metabolism and mammalian development. *En: Determination of cadmium and zinc and its relationship to metallothionein in swine kidney. Garcia-Rico, L, Frasquillo-Félix, Robles-Burgueño, y Jara-Marini, M. 2002. Rev. Int. Contam. Ambient. 18(4): 157-162.*
11. Fawer, R., DeRibaupierre, M., Guillemin, M., Berode y Lob. 1983. Measurement of hand tremor induced by industrial exposure to metallic mercury. *J. Ind. Med. 40: 204-208.*
12. Garcia-Rico, L. y Jara-Marini, M. 1996. Aplicación de microondas en la digestión de hígado de bovino para la cuantificación de metales pesados. *Rev. Int. Contam. Ambient. 12: 41-44.*
13. Garfias, F. y Barojas, L. 1995. Residuos peligrosos en México. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Instituto Nacional de Ecología.
14. Goyer, R. 1993. Lead toxicity: current concerns. *Environ Health Perspect. 100: 177-187.*
15. I.C.M.E. (International Council on Metals and the Environment). 1995. Persistence, bioaccumulation and toxicity of metals and metal compounds. ISBN 1-895720-07-9, Paramex Inc., Washington
16. INEGI. 2000. <http://zac.inegi.gob.mx/territorio/espanol/fisio.html>
17. INE. 2003 en la dirección de Internet <http://www.ine.gob.mx/cenica/planame.htm>
18. Ju–Yongkim, Allenp y Kyoung-Woongkim. 2003. Stabilization of available Arsenic in Highly Contaminated Mine Tailings Using Iron. *Environ. Sci. Technol. 37: 189-195.*
19. Kastori, R. 1998. Effect of excess lead on sunflower growth and photosynthesis. *Journal of Plant Nutrition, 21(1): 75-85.*

20. Liang, Y-X., Sun, Y., Chen, y Li, H. 1993. Psychological effects of low exposure to mercury vapor: Application of a computer-administered neurobehavioral evaluation system. *Environ. Res.* 60: 320-327.
21. Licheng, Z. y Kezhun, Z. 1992. Background values of trace elements in the source area of the Yangtze River. *The Science of the Total Environment* 125: 391-404.
22. Mejía, J., Carrizales, L., Rodríguez, V., Jiménez-Capdeville, M., Díaz-Barriga, F. 1999. Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras. *Salud publica Mex.* 41(2):132-140.
23. Metales pesados y arsénico. 1995. Tomado de la dirección de Internet: <http://www.euskadi.net/sanidad/publicaciones/datos/vigila9508.pdf>.
24. Monroy, M. y Diaz-Barriga, F. 2002. Evaluación de la contaminación por Arsénico y Metales pesados (Pb, Cu, Zn) y análisis de Riesgo en salud en Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P. Nota informativa del proyecto de Maestría en Ingeniería de Minerales (CIEP, Fac. Ingeniería, UASLP) del Q. Israel Razo Soto.
25. Needleman, H. 1990. The future challenge of lead toxicity. *Environ Health Perspect.* 89: 85-89.
26. Ngim, C., Foo, S., Boey, K. y Jeyaratnam, J. 1992. Chronic neurobehavioral effects of elemental mercury in dentists. *Br. J. Ind. Med.* 49: 782-790.
27. NOM- 127-SSA1-1994. "Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".
28. Nriagu, J. 1988. A silent epidemic of environmental metal poisoning? *Environ. Pollut.* 50: 139-161
29. Monreal, R. 2002. Plan de acción de la presa la Zacatecana para la contención de metales pesados. Municipio de Guadalupe, Zacatecas.
30. PAOT. 2003. Análisis de medios para la comisión auxiliar del procurador. Coordinación de participación ciudadana y difusión.

31. Pearson, R. 2003. Borrador del informe final. Fase II, etapa I del estudio del equipo de Tarea sobre Mercurio, Zacatecas, INE. México.
32. Piikivi, L. y Hanninen, H. 1989. Subjective symptoms and psychological performance of chlorine-alkali workers. *Scand. J. Work Environ. Health.* 15: 69-74.
33. Piikivi, L. 1989. Cardiovascular reflexes and low long-term exposure to mercury vapor. *Int. Arch. Occup. Environ. Health.* 61: 391-395.
34. Sadiq, M., AlThagafi, K., Mian, A. 1992. Preliminary evaluation of metal contamination of soils from the Gulf War activities. *Bull Environ Contam Toxicol.* 49(5):633-9.
35. Salomons, W., Forstner, U. 1984. *Metals in the Hydrocycle.* Springer-Verlag, Berlin.
36. Salud Ambiental y Ecología, 2003. Este documento se encuentra disponible en la dirección de Internet: <http://cueyatl.uam.mx/uam/publicaciones/boletines/tips/oct03/seis.html>.
37. SEDESOL. 1993. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1991-1992. Secretaría de Desarrollo Social. México. *En Mejía, J., Carrizales, L., Rodríguez, V., Jiménez-Capdeville, M., Díaz-Barriga, F. 1999. Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras. Salud publica Méx. 41(2): 132-140.*
38. Sheoran, I. y Singh, R. 1993. Effect of heavy metals on photosynthesis in higher plants. pp. 451-468. *In: Díaz M., Larqué G., Alcántar A., Vázquez F., González y Carrillo R. 2001. Acumulaciones toxicas de níquel en el crecimiento y la nutrición de trigo. Rev. Int. Contam. Ambient. 17 (2): 79-90.*
39. Sistemas de Protección Ambiental y Geotécnica. Plata Panamericana. Proyecto Laguna Pedernalillo, Guadalupe Zacatecas, México. México, D.F. 1995. *En Cebrián, M. 1998. "Evaluación de la exposición a mercurio en una comunidad de Zacatecas, México". Contrato 98.03.01 Sound Management of chemicals. Actividad 9.*

40. Torra, M., To-Figueras, J., Brunet, M., Rodamilans, M. y Corbella, J. 1994. Total and metallothionein-bound cadmium in the liver and the kidney of a population in Barcelona, (Spain). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 53: 509-515.
41. Tseng, W. 1977. Effects and dose-response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic. *Environ. Health Perspect.* 19: 109-119.
42. Tseng, W., Chu H, How S, Fong J., Lin C. and Yeh S. 1968. Prevalence of skin cancer in an endemic area of chronic arsenicism in Taiwan. *J. Natl. Cancer. Inst.* 40(3): 453-463.
43. U.S. EPA. 1985. Drinking Water Criteria Document on Cadmium. Office of Drinking Water, Washington, DC. (Final draft).
44. U.S. EPA. 2004. *IRIS Database for Risk Assessment*. [www.epa.gov/iris/](http://www.epa.gov/iris/)
45. U.S. EPA. 2002. Soil Screening Guidance; Technical Background Document. No. EPA/540/R-95/128. [www.epa.gov/superfund/resources/soil/toc.htm](http://www.epa.gov/superfund/resources/soil/toc.htm)
46. Valdés, P. y Cabrera, M. 1999. La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México. *Texas Center for Policy Studies* (Centro de Estudios Políticos de Texas); PO Box 2618, Austin, Texas.
47. Woolhouse, H. 1983. Toxicity and tolerance in the responses of plant to metals. *En: Fonsêca C., Siquiera J., Guedes J., Souza F. e Graziotti P. 2000. Crescimento e Nutrição mineral de Eucalyptus maculata e Eucalyptus urophylla em solução nutritiva com concentração crescente de cobre. R. Bras. Fisiol. Veg.* 12(3): 213-225.
48. World Health Organisation. 1989. Environmental health criteria 86. Mercury: Environmental Aspects. ISBN 92-4-154286-1.

## **Anexo A**

“Propiedades o características físicas, químicas y toxicológicas de metales pesados”

El Pb se considera uno de los metales menos móviles en el medio ambiente, ya que a menudo se encuentra unido fuertemente a partículas en suspensión y a los sedimentos<sup>5</sup>, también hay evidencias considerables de que el Pb de los sedimentos se encuentra disponible para las especies que se alimentan en ellos<sup>6</sup> y tanto en suelos como en sedimentos, el destino del plomo se ve afectado por procesos similares que a menudo llevan a la formación de complejos metálicos orgánicos relativamente estables.

La mayor parte del plomo queda retenido y muy poco se transporta a las aguas superficiales o subterráneas. Sin embargo, es posible que se produzca un reingreso a las aguas superficiales como resultado de la erosión de partículas de suelo con contenido de plomo o mediante la conversión en sulfato de plomo, forma relativamente soluble, en la superficie del suelo o sedimento<sup>2, 34</sup>. Asimismo, el plomo puede descender por lixiviación, del suelo a las aguas subterráneas<sup>2</sup>, en este caso se hizo una comparación del Pb en dos niveles para ver si el comportamiento de este metal es igual para ambos niveles como se vio anteriormente, y que mostró que el comportamiento es el mismo a ambos niveles de profundidad y por lo tanto que no se está lixiviando o que en la zona tiene una baja lixiviación tal vez debido al tipo de suelo.

El Pb puede ser absorbido por las raíces de las plantas pero aunque su translocación es generalmente limitada, puede acumularse en diferentes partes de estas<sup>3</sup> debido aparentemente a los enlaces que forma en las superficies y paredes de las raíces y debido a su afinidad para formar ligandos con compuestos clave relacionados con diversas funciones metabólicas, la acumulación de iones  $Pb^{2+}$  en las plantas puede causar múltiples efectos, tanto directos como indirectos<sup>47</sup>. De acuerdo a la sensibilidad de la planta al efecto tóxico y la concentración, puede



ocasionar cambios en su metabolismo que repercuten en el crecimiento, en el proceso fotosintético<sup>19, 38</sup> y en la absorción de nutrimentos<sup>47</sup>.

En lo que respecta a la salud humana, los efectos del Pb son los mismos así se lo inhale o se lo ingiera<sup>2</sup>. El plomo es uno de los metales tóxicos más ubicuos. No cumple ninguna función nutritiva, bioquímica ni fisiológica. En dosis extremadamente bajas, el Pb puede provocar lesiones irreversibles en el sistema nervioso central y reducir la inteligencia <sup>2, 25</sup>. Si los niveles de exposición son mayores, puede provocar anemia, así como también lesiones renales graves <sup>2</sup>. Los niños tienen una susceptibilidad especial con respecto a la intoxicación por plomo debido a que absorben y retienen más Pb en relación a su peso que los adultos<sup>2</sup>. Actualmente se plantea una recomendación según la cual no habría ningún nivel de plomo en sangre que no produzca efectos tóxicos, en especial en el sistema nervioso central en desarrollo<sup>2, 14</sup>.

En el caso del mercurio las concentraciones correspondientes a sedimentos no contaminados son sumamente bajas, y sus niveles van de 0,03 mg/kg a 0,2 mg/kg<sup>6, 21, 35</sup>. Tampoco es un metal traza y no tiene ninguna función bioquímica ni nutritiva. Los mecanismos biológicos para su eliminación son deficientes, y por eso, según lo que se sabe hasta el momento, el Hg es el único metal que se biomagnifica (es decir, se acumula progresivamente) a lo largo de la cadena alimentaria<sup>15, 48</sup>. En bajas concentraciones, es sumamente tóxico tanto para animales como para plantas; en consecuencia, cualquier aumento por sobre los niveles de referencia podría tener efectos perjudiciales sobre cualquier organismo expuesto <sup>2</sup>.

Aunque hay evidencias que vinculan los niveles de Hg total en el medio ambiente con los presentes en predadores superiores como los peces, el eje de preocupación es la acumulación de metilmercurio (MeHg). El mercurio inorgánico puede ser metilado por microorganismos naturales del suelo, los sedimentos, el agua dulce y salada; y en este proceso intervienen diversas poblaciones microbianas en condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas (ATSDR 1997), afortunadamente los niveles de metilmercurio son bajos en la zona de estudio (los

resultados no se presentan) por lo que no representa un peligro y tampoco hay evidencias que demuestren que hay problemas en dicha zona, en cuanto a los resultados de nuestro estudio se pudo observar que el mercurio no esta disponible ya que no hay correlación entre la concentración del suelo y la de la parte comestible de la planta en este caso en maíz y en frijol, por lo que no se vio se este dando biomagnificación de mercurio, y en la literatura no se reporta que haya biomagnificación de mercurio en maíz y frijol, pero se recomienda hacer más estudios ya que las muestras tomadas para ser analizadas fue pequeña debido al alto costo que representa el analizar las muestras.

En la literatura se ha reportado que cualquier tipo de exposición de largo plazo provoca alteraciones graves en el funcionamiento normal de cualquier órgano que lo acumule<sup>28</sup>, como el riñón, el hígado y el sistema nervioso central. La exposición a niveles suficientemente altos de Hg metálico, orgánico o inorgánico, puede provocar lesiones permanentes en estos órganos<sup>2</sup>. En cuanto a los riesgos a la salud serán tratados mas adelante junto con el As y el Cd.

La concentración máxima de arsénico permisible es de 50 µg/L establecido por la Norma Oficial Mexicana de calidad del agua de uso y consumo humano<sup>27</sup> y la concentración para aguas no contaminadas es de 10 µg/L As

La concentración de As disuelto en agua natural de Cerrito Blanco, en S.L.P es superior al valor máximo reportado hasta ahora en el mundo para aguas naturales contaminadas por As (5,000 µg/L As) y tan elevada como los valores máximos reportados para aguas ligeramente alcalinas contaminadas por actividad minera (5,000-7,500 µg/L As), el valor máximo permisible para sedimentos en cuerpos de agua natural no esta regulado por alguna NOM, pero es por ejemplo en las Guías Ambientales Interinas de Canadá es de 5.9 mg/kg para As; como se puede observar el As como contaminante y la mayor preocupación es el que se pudiera encontrar en agua, pero también se puede encontrar en tejidos vegetales y animales por lo cual se determino en este estudio tanto en suelo como en frijol y maíz ya que a nivel de exposición aguda, el arsénico es un neurotóxico que afecta sobre todo a la población infantil, y en eventos de exposición crónica es capaz de

causar cáncer en distintos órganos<sup>24</sup>, pero afortunadamente los niveles de As son menores al reconocido por la EPA<sup>44</sup> como nivel permisible en suelo, por otro lado los resultados estadísticos muestran que no hay correlación entre la concentración de As en suelo y la encontrada en maíz y frijol, lo que indica que este no se encuentra biodisponible, y que se refuerza con su comportamiento observado en los dos niveles a los cuales se determinó su concentración y para los cuales fue significativamente igual, por lo cual hay una baja o nula lixiviación.

En el caso del Cd, se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, lo que hace inevitable que se acumule a través de toda la cadena alimenticia. Esto es muy importante desde el punto de vista toxicológico, ya que el Cd presenta un gran espectro de efectos tóxicos, incluyendo nefrotoxicidad, hipertensión y osteomalacia<sup>10, 12</sup>.

Un alto porcentaje del Cd que penetra al organismo se absorbe y sólo una pequeña parte es excretada (se estima una vida media de 10 años), lo que ocasiona un depósito en órganos como el hígado y riñón, en donde se ha observado que alrededor del 80% se encuentra asociado a metalotioneínas<sup>40</sup>, los seres humanos reciben solo una pequeña proporción de su Cd de forma directa a partir de agua potable o del aire que respiran, se encuentran excepciones en personas que viven cerca de minas o fundidoras especialmente de zinc; los fumadores, también están expuestos al Cd, el cual es absorbido por las hojas del tabaco a partir del suelo y del agua de irrigación y es emitido incorporado en el humo cuando se quema el cigarrillo, por lo que se ha observado que los que fuman mucho tienen, aproximadamente, el doble de Cd del que ingiere un no fumador a partir de otras fuentes (metales tóxicos pesados). Debido a su semejanza con el zinc, las plantas absorben el Cd y se ve aumentado por la disminución del pH del suelo, por lo que el efecto de la lluvia ácida es el aumentar la concentración de este en los alimentos. La mayor parte del Cd en la dieta, habitualmente proviene de las papas, del trigo, del arroz y de otros granos, pero al igual que en los otros metales analizados se vio que no hay correlación entre la concentración del suelo y la de los vegetales (maíz y frijol), además de que el Cd

en todos los casos siempre estuvo por debajo del nivel permitido por la EPA, por lo cual el problema de contaminación por este metal no existe y por lo tanto no representa ningún peligro ambiental o de salud.