



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

**Metales pesados presentes en los cauces de la  
cuenca Presa Jalpan**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado  
de

Maestra en Ciencias (Hidrología Ambiental)

Presenta:

Ing. Patricia Trejo Reséndiz

Dirigido por:

M. C. Marcela Susana Duhne Ramírez

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Hidrología Ambiental)

Metales pesados presentes en los cauces de la cuenca Presa Jalpan

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestra en Ciencias (Hidrología Ambiental)

**Presenta:**

Ing. Patricia Trejo Reséndiz

Dirigido por:

M. C. Marcela Susana Duhne Ramírez

**SINODALES**

M. C. Marcela Susana Duhne  
Ramírez  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dra. Martha Leticia Otero López  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. José Alberto Rodríguez Morales  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Martín Alfonso Gutiérrez López  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Eusebio Ventura Ramos  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dra. Ma de la Luz Pérez Rea  
Directora de la facultad

\_\_\_\_\_  
Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa  
Jefe de Posgrado

## **Dedicatoria**

Para Mí.

Para mi esposo Daniel.

Para mis hijos David y Daniela.

Para mis padres Fortunato y Aurelia.

Para mis hermanas Maribel y Leticia

Para mis hermanos José, Fortunato y Jorge

## **Agradecimientos**

A mi esposo por todo el apoyo para realizar esta investigación.

A mis hijos David y Daniela que fueron y serán siempre la motivación para buscar la superación y ser un ejemplo para ellos.

Reconozco y me permito agradecer a mi familia por los ánimos y ayuda en los momentos que lo necesite, a mis hermanos, José, Fortunato y Jorge, hermanas, Maribel y Leticia, y a mis padres Fortunato y Aurelia por enseñarme los beneficios del trabajo. También a mis suegros Daniel e Inocencia.

A todos los profesores que compartieron conmigo su conocimiento, experiencia y sabiduría durante mi formación de posgrado, también por las sugerencias para que esta investigación se realizara de la mejor manera, Mtra. Patricia Espíndola, Dr. Israel, Dr. José Alberto, Dra. Carmen, Mtra. Marcela, Dr. Luna, Dr. Eusebio, Dr. Gonzalo Macías, Dra. Martha Otero y al Dr. Alfonso Gutiérrez.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindarme las herramientas y el espacio para mis estudios, a SECIHTI (antes CONACYT) por el financiamiento del estudio.

## Resumen

Los fenómenos de la dispersión de contaminantes, en las cuencas, son frecuentes por medio de los procesos lluvia-escurrimiento y la erosión hídrica. Todo el material contaminante de la parte alta de la cuenca tiende a ser transportado a las partes bajas de la misma. La cuenca denominada Presa Jalpan, se ubicada en parte del municipio de Pinal de Amoles y Jalpan de Serra, siendo Pinal de Amoles la parte alta, y Jalpan de Serra la parte baja. Entre 1970 y 1975, se construyó la presa Jalpan para abastecer los campos agrícolas y para uso de la población. Históricamente, Pinal de Amoles se ha reconocido en el estado de Querétaro por la actividad minera. En los últimos años ha sido objeto de diversos estudios en el área de la salud humana y ambiental debido a los efectos de la minería. En este estudio, se analizan las concentraciones del arsénico, cadmio y plomo presentes en los estratos de los sedimentos dentro de la presa Jalpan. El análisis fue realizado en tres sitios del embalse, sitio uno, a la entrada del flujo, sitio dos, en la parte media y el sitio tres, en la salida del flujo. La profundidad analizada en cada muestra fue de 150 cm en estratos de 30 cm. Se relacionaron las concentraciones de los metales en el sedimento; con los contenidos de materia orgánica y los tamaños de partículas por la granulometría de mallas y vía hidrómetro. Se encontró que el arsénico se sitúa por arriba de las concentraciones permisibles por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y el cadmio en concentraciones de nivel de efecto probable para la flora y la fauna, las concentraciones del plomo no excedieron los límites. Se observó una tendencia de disminución de las concentraciones en los estratos más profundos y en dirección a la salida del flujo del agua. Los objetivos fueron conocer las concentraciones del arsénico, cadmio y plomo en los sedimentos, conocer si representan un riesgo para la salud y el ambiente, también, entender el comportamiento de estos contaminantes en el sedimento analizado.

Palabras clave. Sedimentos contaminados, metales pesados, sedimentos, relaves mineros.

## **Abstract**

Pollutant dispersion phenomena in watersheds are frequent through rainfall-runoff processes and water erosion. All the polluting material from the upper part of the basin tends to be transported to the lower parts of the basin. The Jalpan Dam watershed is located in part of the municipalities of Pinal de Amoles and Jalpan de Serra, with Pinal de Amoles being the upper part and Jalpan de Serra the lower part. Between 1970 and 1975, the Jalpan dam was built to supply the agricultural fields and for use by the population. Historically, Pinal de Amoles has been recognized in the state of Querétaro for its mining activity. In recent years it has been the subject of several studies in the area of human and environmental health due to the effects of mining. In this study, the concentrations of arsenic, cadmium and lead present in the sediment strata within the Jalpan dam are analyzed. The analysis was performed at three sites in the reservoir, site one, at the inflow entrance, site two, in the middle part and site three, at the outflow exit. The depth analyzed in each sample was 150 cm in 30 cm strata. The concentrations of metals in the sediment were related to the organic matter contents and particle sizes by mesh particle size and via hydrometer. Arsenic was found to be above the concentrations allowed by NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 and cadmium at concentrations of probable effect level for flora and fauna; lead concentrations did not exceed the limits. A trend of decreasing concentrations was observed in the deeper strata and in the direction of the water outflow. The objectives were to know the concentrations of arsenic, cadmium and lead in the sediments, to know if they represent a risk to health and the environment, and to understand the behavior of these pollutants in the sediment analyzed.

Key words. Contaminated sediments, heavy metals, sediments, mining tailings.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivos generales.....	14
1.2 Objetivos particulares .....	14
1.3 Justificación .....	15
1.4 Hipótesis.....	16
1.5 Descripción del problema .....	16
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>17</b>
2.1 Minería a nivel América Latina .....	17
2.2 Minería en México .....	18
2.3 Minería en Pinal de Amoles, Querétaro.....	22
2.4 Metales pesados.....	28
2.5 Toxicidad del arsénico .....	29
2.6 Toxicidad de plomo.....	30
2.7 Toxicidad de cadmio.....	31
2.8 Uso de los sedimentos .....	32
2.9 Erosión hídrica.....	33
2.10 Origen y transporte de sedimentos.....	33
2.11 Tamaños de las partículas de los sedimentos.....	35
2.11.1 Diámetro nominal .....	35
2.11.2 Diámetro de cribado .....	36
2.11.3 Diámetro de sedimentación.....	38
2.11.4 Diámetro estándar de sedimentación .....	38
2.12 Sedimentación en embalses.....	39
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>41</b>
3.1 Recolección de información.....	41
3.2 Caracterización.....	42
3.2.1 Área de estudio .....	42
3.2.2 Ubicación geográfica .....	43
3.2.3 Población.....	44

3.2.4 Economía .....	45
3.2.5 Hidrografía.....	45
3.2.6 Elevación.....	49
3.2.7 Geología.....	50
3.2.8 Uso de suelo y vegetación .....	51
3.2.9 Edafología .....	52
3.3 Erosión de la cuenca .....	53
3.4 Cálculo de disponibilidad media anual de agua.....	55
3.5. Infiltración .....	59
3.6 Minería.....	60
3.7 Obtención de muestras.....	61
3.8 Manejo y conservación de las muestras.....	67
3.9 Análisis de sedimentos .....	68
3.9.1 Secado de muestras.....	68
3.9.2 Digestión de muestras.....	69
3.10 Granulometría método de mallas.....	75
3.11 Clasificación del sedimento .....	78
3.12 Granulometría vía hidrómetro.....	78
3.13 Obtención de materia orgánica.....	83
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>87</b>
4.1 Resultados de la Primera etapa.....	87
4.2 Resultados de la Segunda etapa.....	92
4.2.1 Concentraciones de arsénico, cadmio y plomo.....	92
4.2.2 Granulometría .....	96
4.2.3 Materia Orgánica.....	100
<b>5. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>112</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>123</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proyectos en operación de oro y plata en México, .....	21
Figura 2. Distribución de sedimentos en un embalse con escaso manejo del desagüe de fondo .....	40
Figura 3. Distribución territorial de la cuenca Presa Jalpan. ....	44
Figura 4. Ubicación de las comunidades dentro de la cuenca presa Jalpan. ....	45
Figura 5. Forma de la cuenca y orden de los cauces. ....	46
Figura 6. Delimitación de la cuenca en Red Siatl.....	47
Figura 7. Elevación de la cuenca .....	49
Figura 8. Geología .....	50
Figura 9. Uso de suelo y vegetación.....	51
Figura 10. Edafología de la cuenca .....	52
Figura 11. Erosión en la cuenca .....	54
Figura 12. Polígonos de Thiessen .....	55
Figura 13. Infiltración en la cuenca .....	59
Figura 14. Concesiones mineras dentro de la cuenca .....	60
Figura 15. Ubicación espacial de los puntos analizados.....	61
Figura 16. Perfil de elevaciones de los sitios analizados .....	62
Figura 17. Sitio número uno de muestreo.....	63
Figura 18. Sitio número dos de muestreo.....	64
Figura 19. Sitio número tres de muestreo.....	64
Figura 20. Barreno muestreador para suelo .....	65
Figura 21. Extracción de material .....	65
Figura 22. Extracción de material profundo .....	66
Figura 23. Extracción de muestras en pozo a cielo abierto .....	66
Figura 24. Etiquetado y resguardo de muestras para su traslado .....	67
Figura 25. Secado de muestras en horno.....	68
Figura 26. Pesado de la muestra .....	71
Figura 27. Adición de ácido nítrico.....	71

Figura 28. Adición de ácido nítrico concentrado .....	72
Figura 29. Adición de peróxido de hidrógeno .....	73
Figura 30. Filtrado de muestras .....	74
Figura 31. Espectrofotómetro de Absorción Atómica.....	75
Figura 32. Secado de muestra al aire libre .....	76
Figura 33. Mallas en el agitador de tamices .....	77
Figura 34. Resguardo y etiquetado de muestras tamizadas.....	77
Figura 35. Muestra en saturación .....	79
Figura 36. Mezcla sedimento-defloculante en probeta aforada a 1000 ml.....	81
Figura 37. Lecturas del hidrómetro y termómetro .....	82
Figura 38. Resguardo del hidrómetro durante las lecturas .....	83
Figura 39. Peso de muestra para ignición .....	84
Figura 40. Ignición de muestras.....	85
Figura 41. Muestras sin materia orgánica.....	85
Figura 42. Distribución espacial del arsénico.....	88
Figura 43. Distribución espacial del plomo .....	88
Figura 44. Distribución espacial del Cadmio.....	89
Figura 45. Concentrado de las distribuciones de As, Pb y Cd .....	90
Figura 46. Análisis de correlación de Pearson para la muestra del sitio uno.....	94
Figura 47. Análisis de correlación de Pearson para la muestra del sitio uno.....	94
Figura 48. Análisis de correlación de Pearson para la muestra del sitio tres.....	95
Figura 49. Curva granulométrica de las muestras del sitio uno. ....	96
Figura 50. Granulometría de finos Muestra uno.....	97
Figura 51. Curva granulométrica de las muestras del sitio dos .....	97
Figura 52. Granulometría de finos Muestra dos.....	98
Figura 53. Curva granulométrica de las muestras del sitio tres .....	99
Figura 54. Granulometría de finos Muestra tres.....	99
Figura 55. Análisis multivariado .....	101
Figura 56. Agrupación de las concentraciones de metales por medio de características similares.....	102

Figura 57. Agrupación de muestras por características similares del cuadrante I	103
Figura 58. Agrupación de muestras por características similares del cuadrante II	103
Figura 59. Agrupación de muestras por características similares del cuadrante III	104
Figura 60. Agrupación de muestras por características similares del cuadrante IV	104

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Minas en el municipio de Pinal de Amoles.....	24
Tabla 2. Minas Activas en Pinal de Amoles .....	26
Tabla 3. Distribución de mallas.....	36
Tabla 4. Coeficientes de Cu y Cc.....	37
Tabla 5. Valores de K para varias combinaciones de peso unitario y temperaturas .....	39
Tabla 6. Características del embalse.....	43
Tabla 7. Área territorial de la cuenca por municipio .....	43
Tabla 8. Relación de bifurcación.....	46
Tabla 9. Características de la cuenca.....	47
Tabla 10. Área por tipo de suelo.....	52
Tabla 11. Características de las estaciones climatológicas en el área de estudio.	55
Tabla 12. Precipitación media anual de las estaciones 22064 y 22007.....	56
Tabla 13. Precipitación anual respecto al área de influencia de estaciones climatológicas .....	57
Tabla 14. Volumen medio anual de escurrimiento natural de la cuenca.....	58
Tabla 15. Concentraciones de As, Cd y Pb. ....	87
Tabla 16. Concentraciones de referencia totales por tipo de suelo .....	90
Tabla 17. Límites permisibles para metales en sedimentos establecidos por la norma mexicana (NOM) y canadiense (CEQG).....	91
Tabla 18. Resultados de concentraciones de arsénico, cadmio y plomo, según la profundidad.....	92
Tabla 19. Concentraciones de referencia totales por tipo de uso de suelo.....	93
Tabla 20. Porcentaje de materia orgánica por estratos en la muestra uno.....	100
Tabla 21. Porcentaje de materia orgánica por estratos en la muestra dos .....	100
Tabla 22. Contenido de materia orgánica por estratos en la muestra tres.....	101
Tabla 23. Máximos, mínimos y promedio de concentraciones de metales en el cuadrante I.....	105

Tabla 24. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de tamaño de partículas por mallas para el cuadrante I.....	106
Tabla 25. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de contenido de materia orgánica para el cuadrante 1 .....	106
Tabla 26. Máximos, mínimos y promedio porcentaje de tamaño de partícula Método del hidrómetro cuadrante I .....	106
Tabla 27. Máximos, mínimos y promedio de concentraciones de metales en el cuadrante II.....	107
Tabla 28. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de tamaño de partículas por mallas para el cuadrante II.....	107
Tabla 29. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de contenido de materia orgánica para el cuadrante II .....	107
Tabla 30. Máximos, mínimos y promedio porcentaje de tamaño de partícula Método del hidrómetro cuadrante II .....	107
Tabla 31. Máximos, mínimos y promedio de concentraciones de metales en el cuadrante III.....	108
Tabla 32. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de tamaño de partículas por mallas para el cuadrante III.....	108
Tabla 33. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de contenido de materia orgánica para el cuadrante III .....	109
Tabla 34. Máximos, mínimos y promedio porcentaje de tamaño de partícula Método del hidrómetro cuadrante III .....	109
Tabla 35. Máximos, mínimos y promedio de concentraciones de metales en el cuadrante IV.....	110
Tabla 36. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de tamaño de partículas por mallas para el cuadrante IV .....	110
Tabla 37. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de contenido de materia orgánica para el cuadrante IV .....	110
Tabla 38. Máximos, mínimos y promedio porcentaje de tamaño de partícula Método del hidrómetro cuadrante IV.....	111

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente todas las actividades económicas generadas por el hombre, tienen un costo no solo monetario, sino que también implican daños al medio ambiente. Poco se ha realizado para recuperar los espacios perturbados por la contaminación antrópica.

La minería en México se ha desarrollado a través de los años, como una necesidad económica para progresar y dar sustento a las familias que se dedican a ello. Es tan relevante que se han originado pueblos y ciudades en los lugares privilegiados geológicamente con la extracción de minerales. Son muchos los casos en los que no se tienen medidas de sanidad adecuadas en la realización de esta actividad, algunas minas suelen ser ilegales lo que aumenta los riesgos para los trabajadores. Las consecuencias por la falta de aplicación adecuada de normativas también se ven reflejadas en el medio ambiente, por todos los desechos que se producen y no se resguardan o se manipulan de forma correcta.

Por otra parte, realizar actividades mineras en lugares donde la pendiente topográfica es abrupta, representa un riesgo potencial por los desechos que genera, conocidos como jales y relaves mineros, a estos dos factores se le suma la erosión hídrica donde los contaminantes pueden ser transportados a grandes distancias o sedimentados y almacenados en reservorios de agua.

Es importante recordar que para poder brindar una solución se requiere tener datos, los cuales contribuyen a formular una serie de soluciones, evaluar la gravedad del problema y elegir la solución más óptima. La falta de una base de datos para monitorear la contaminación genera que se pase fácilmente de la contaminación puntual a la contaminación difusa, agrandando el problema y también los costos en recurso humano y financiero. Cuando la contaminación es puntual, las soluciones suelen ser más rápidas y permiten erradicar o controlar el problema. Sin embargo, cuando se tiene contaminación difusa, es complicado erradicar el problema y sólo queda mejorar y/o controlar la situación.

Por las razones mencionadas, la metodología empleada en este estudio permite crear un antecedente de datos de contaminantes de arsénico, plomo y cadmio en estratos de los sedimentos de un embalse de cuenca de montaña con historial de actividades mineras en la parte alta. Se subraya la importancia de realizar análisis de calidad en los sedimentos y evitar dispersar contaminantes presentes en los sedimentos al destinarlos como una fuente de enriquecimiento de suelos agrícolas. También, esta información proporciona parámetros más precisos para la potabilización del agua destinada al uso doméstico y otras actividades.

En este sentido, las condiciones actuales de las presas con problemas de reducción de la capacidad de almacenamiento de agua debido a la sedimentación han sido motivación para conocer la composición de dichos sedimentos. Una de las maneras de recuperar el volumen perdido es por medio del desazolve, lo cual provoca que se destine para diversos usos como el relleno de terrenos y para enriquecer las áreas de cultivo agrícola. Se han visto ejemplos en los cuales en la temporada de estiaje los agricultores siembran directamente en los sedimentos dentro de los vasos de las presas, aumentando el potencial de absorción de contaminantes en los cultivos.

### ***1.1 Objetivos generales***

- Identificar y determinar la concentración de arsénico, plomo y cadmio presentes en los sedimentos en la presa de Jalpan de Serra en temporada de estiaje.

### ***1.2 Objetivos particulares***

- Conocer la distribución de la concentración de arsénico, plomo y cadmio en el embalse.
- Identificar las zonas con mayor concentración de arsénico, plomo y cadmio.
- Relacionar la granulometría de los sedimentos con la concentración de los metales pesados encontrados.
- Identificar los estratos de sedimentos que representan mayor riesgo.

### **1.3 Justificación**

Cada vez es más difícil ignorar la falta de monitoreo para conocer la situación actual de las presas y la disminución de su capacidad debido a los sedimentos. En el Programa de Seguridad de Presas de CONAGUA se puede encontrar información referente a las presas registradas con datos como volumen de diseño, características de diseño, uso del agua; entre otros. Pero no hay registros sobre el porcentaje de azolve. Se estima que las presas a nivel mundial pierden su capacidad de almacenamiento entre un 0.5 a 1.0% anualmente por causa de azolve (White, 2001). La sedimentación de las presas ha sido un tema polémico en el área de la salud debido a la resuspensión de contaminantes generando el efecto de recirculación y movimiento de partículas tóxicas en el agua.

La justificación de esta investigación radica en la necesidad de analizar los sedimentos para conocer las concentraciones de metales pesados como el arsénico, plomo y cadmio que son dañinos para la salud de todo ser vivo, humanos, plantas y animales. Los excedentes en las concentraciones de estos metales representan una serie de inconvenientes importantes, considerando que el suelo/sedimentos es un factor relevante en el cual da inicio la cadena trófica.

También, la zona de estudio de la presa Jalpan es considerada como un importante vaso de almacenamiento de agua para uso doméstico y agrícola que abastece a más de 27,000 personas de manera directa e indirecta.

En los últimos años ha habido un interés creciente en la erosión de la cuenca Pinal de Amoles-Jalpan de Serra, ya que forma parte de la reserva de la biosfera Sierra Gorda y alberga múltiples especies migratorias y en peligro de extinción. En el caso particular de la Presa, también ha sido reconocida como sitio Ramsar, entendiéndose que es un humedal de suma importancia.

Un aspecto clave para abordar el tema del análisis de sedimentos dentro del embalse ha sido la preocupación por la iniciativa de los locales y gobierno municipal

para extraer el azolve con maquinaria y emplearlo en la agricultura o rellenos, sin antes analizar las características y composición de éste.

### **1.4 Hipótesis**

En la temporada de estiaje, existen sitios donde las concentraciones de metales pesados como el arsénico, plomo y cadmio en los sedimentos del embalse Presa Jalpan exceden los límites permisibles por las normativas aplicables.

### **1.5 Descripción del problema**

La preocupación por la pérdida de la capacidad de almacenamiento de agua del embalse Presa Jalpan, la crisis hídrica que ha azotado a nuestro país y la idea de desabasto de agua ha generado en la población una búsqueda de ideas para recuperar el volumen de almacenamiento. Han optado por desazolvar la presa con ayuda de maquinaria y con una campaña de retiro de material donde los particulares pueden acudir con su vehículo o medio para llevar los sedimentos y disponer como mejor les sea posible, ya sea para relleno, como abono para plantas ornamentales, sustrato para huertos de traspatio o enriquecimientos de suelos agrícolas.

Esta técnica es poco recomendada por su ineficiencia y por ser costosa, sin embargo, para destinarle un uso adecuado a los sedimentos es recomendable conocer las propiedades químicas que contienen para prevenir la dispersión de contaminantes.

Los indicadores que sugieren un análisis amplio de situación se deben a que la Presa Jalpan está situada en la parte baja de la cuenca que lleva el nombre Cuenca Presa Jalpan, la cual tiene un área de 187 km<sup>2</sup>, las elevaciones van desde los 758 msnm hasta 3002 msnm y pendiente media de 6.09%. Con las características topográficas mencionadas se sitúa esta cuenca como una cuenca de montaña, las cuales se conocen por su fuerte potencial de erosión en la parte alta de la cuenca, agravando el problema con arrastre de sedimentos con productos de relaves mineros tóxicos. De esta manera los sedimentos que se almacenan en

la presa pueden representar un riesgo para la salud si las concentraciones de metales son mayores a los límites permisibles según las normativas aplicables para su uso.

## **2. ANTECEDENTES**

### ***2.1 Minería a nivel América Latina***

El uso de los metales es indispensable en la vida cotidiana y para el desarrollo de los países, tanto de los lugares donde se usa como de aquellos donde se extrae. El campo de la investigación referente a la contaminación producto de la minería está recobrando importancia, desde el aspecto de planes de desarrollos nacionales hasta los efectos socioambientales medidos en las repercusiones monetarias que atrae consigo. (Viana Ríos, 2018).

La riqueza natural de minerales en América Latina (AL) y el Caribe (ALC) la han posicionado como una fuente importante de abastecimiento y reserva estratégica para su extracción con el fin de abastecer a los países donde carecen de ellos. Es bien conocido que, por la manera de operación en la extracción de minerales y recurso naturales, los lugares afectados son las zonas rurales. Esto debido a que es donde se encuentran los recursos (principalmente) y el bajo costo económico de operación. Estos recursos, posteriormente son llevados a las zonas urbanas, donde la demanda generalmente no se limita, es decir, se extrae tanto como sea posible para garantizar solventar la necesidad de los lugares en desarrollo. Así es como ha funcionado desde la época colonial. Históricamente, en más de 150 años, en el periodo de 1503 a 1660 se estima que en AL se extrajeron 16 millones de toneladas de plata y 185 toneladas de oro (Kluckhohn, 1937).

Es tanta la importancia de las reservas que ya se han identificado que países de ALC se caracterizan en concentraciones altas de minerales. Por ejemplo, en Cuba se concentra el cobalto, el litio en Bolivia, Chile y México, el oro en México, la plata en México y Estados Unidos, y en Chile y Perú el cobre (U.S. Geological

Survey, 2009). Para el 2018 la Comisión Económica para América Latina y el Caribe dio a conocer las reservas mundiales de minerales metálicos, donde los metales que sobresalen son el hierro, plomo, estaño, zinc, bauxita, alúmina, níquel, cobre, plata, oro, y litio, todos por encima del 10 % hasta el 61% (caso de litio). La demanda de metales se ha visto en aumento, a tal grado que la extracción de minerales en ALC aumentó seis veces desde 1970 hasta el 2017, pasando de 659 millones de toneladas a 3, 972 millones de toneladas (Bárceñas , 2018).

En los países donde más se lleva a cabo la actividad de la minería, persisten serios desafíos ambientales, en el proceso de extracción, transporte y fundición dónde se contamina el agua, aire y el suelo, problemas de competencia por el uso del agua, destrucción de hábitat, reservas y zonas protegidas, dan prioridad a las áreas mineras sobre áreas de relevancia ecológica y de biodiversidad, también, actividades de alto riesgo informales e ilegales finalizando con problemas de salud, ambientales, sociales y pérdida de patrimonio natural arriesgando la sostenibilidad ambiental (Delgado Ramos, 2010) (Ramos & Carlo, 2010).

### **2.2 Minería en México**

Una cantidad considerable de literatura científica como social posiciona a México como un país importante en reservas minerales y ambientales a nivel mundial. Estadísticamente, en México durante los años de 1521 a 1921 se extrajeron dos terceras partes de la producción mundial de plata, aproximadamente 155 mil toneladas (Kluckhohn, 1937).

Las políticas en el sector minero del país se han visto modificadas con el objetivo de proporcionar la facilidad y factibilidad para concesiones mineras tanto nacionales como para empresas extranjeras. En 1996, oficialmente, se modificó el artículo 27 de la constitución política para permitir el acceso a empresas de capital mixto y extranjero a realizar actividades de minería.

En el periodo de 2006-2012, el 18 % del territorio nacional estaba destinado para la actividad minera. En contraparte, a partir del 2009 se incrementó la cantidad de hectáreas por concesión otorgada, de esta manera en 2012 el porcentaje de área fue de 30.3 % del territorio nacional, es decir, un incremento del 45 %, donde las empresas dueñas de los proyectos fueron extranjeras; canadienses, australianos y en menor cantidad estadounidenses (Azamar & Ponce, 2014).

El otorgar concesiones mineras a extranjeros, ha sido un área de polémica dentro del campo social y ambiental, debido a que se obtienen grandes márgenes de utilidades para las empresas, esperando que ayuden al crecimiento económico del país, sin embargo, las empresas brindan empleo a corto plazo, contaminan el medio ambiente, dañan al paisaje, despojan a comunidades y una vez terminada la actividad minera, los pueblos quedan abandonados. A los países de donde se extraen los minerales se les denomina como países periféricos, en cambio, los países donde se consumen se les conoce como países metropolitanos. Autores como Delgado Ramos, comparan este efecto con el saqueo colonial, donde los países periféricos no limitan la extracción de los minerales ante la demanda de los países metropolitanos.

Económicamente hablando, la actividad minera forma parte del Producto Interno Bruto (PIB). En 1983 el PIB fue de 1.63%, con una tendencia a la baja, en 2007 alcanzó su nivel mínimo de 1.25 %. En el 2006, el 56% del PIB minero nacional se centró en cuatro estados, Coahuila, Durango, México y Sonora, le siguen Coahuila y Zacatecas (Salazar, 2010).

El Fraser Institute de Canadá, en 2007, reconoció a México como el número siete a nivel internacional en el Índice de potencial minero. Posteriormente en el 2009, la posición decayó al número nueve. En el 2014, la Secretaría de Economía dio a conocer que México se encuentra dentro de los primeros 12 productores a nivel mundial en relación a 17 minerales.

En el 2024, México se posicionó como el principal productor de plata en el mundo (por 13 años consecutivos) y ascendió a los primeros 10 países en producción de 17 minerales. Es el segundo país en extracción de fluorita, el tercero en wollastonita y sulfato de sodio, cuarto en celestita, quinta posición en plomo, molibdeno, sexto en zinc, octavo en sal, yeso, cadmio, oro y feldespato y décimo lugar en cobre. El buen posicionamiento generó que ascendiera como el primer lugar para inversión minera de América Latina, dejando en segundo lugar a Chile, Perú y Brasil. Actualmente, el sector minero-metalúrgico contribuye con el 2.05 % del PIB (Secretaría de Economía, 2024)

A pesar del decaimiento de la actividad minera, México sigue siendo parte de los países de mayor relevancia minera actualmente.

La Secretaría de Economía por medio de la Coordinación General de Minería publicó el valor de producción de la industria minera y la cadena de producción en más de 60 mil millones de dólares en los años de 2011 al 2013, para el 2014 el valor bajó a 18 mil millones de dólares, especificando también, los principales proyectos en operación, siendo 11 proyectos de oro y 14 de plata en los cuales Sonora es el principal productor de oro con 28.271 toneladas en los meses de enero a noviembre de ese año, y Zacatecas con 22 ton de plata en el mismo periodo ubicando los yacimientos de oro más importantes en la Sierra Madre Occidental ( Figura 1). Del mismo modo, fueron 13 proyectos de cobre y 9 de molibdeno ubicadas en el cinturón orientado NE-SW, de 60 depósitos el 70% se encuentran en el noreste, en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Zacatecas, Michoacán, Guanajuato, Guerrero, con una producción anual proyectada de cobre desde 5,000 a 164,000 ton.



Figura 1. Proyectos en operación de oro y plata en México, Coordinación General de Minería, Secretaría de Economía, 2014.

Los principales yacimientos de plomo y zinc se localizan en la Sierra Madre Oriental, y se tienen registro de diez principales proyectos. El estado que más produce es Zacatecas con 120.821 ton de plomo y 264.228 ton de zinc. En segundo lugar, Chihuahua, y los otros estados son Durango, Estado de México, Guerrero y San Luis Potosí. Finalmente, se cuenta con dos franjas mineralizadas una de hierro y otra de titanio. Los depósitos de hierro se distribuyen en las bandas de noreste (NE) y suroeste (SW) en los estados de Durango, Coahuila, Colima, Jalisco y Michoacán. En el caso del titanio, se clasifican en tres tipos según su yacimiento: metamórficos de contacto en Oaxaca, Guerrero, Michoacán y colima, yacimiento tipo reemplazamiento en Colima y Jalisco y, por último, por segregación magnética en el estado de Colima (Coordinación general de Minería, 2014).

Para el 2024, las estadísticas en volumen de producción de acuerdo al tipo de mineral y entidad federativa productora fueron las siguientes: oro 12.703 ton

siendo los estados de Zacatecas, Sonora, Guerrero, Durango y Coahuila los principales productores, plata 545.622 ton producidas en Zacatecas, Chihuahua, Durango, Sonora y Oaxaca, el cobre 60.019 ton en Sonora, Zacatecas, San Luis Potosí, Chihuahua y Durango, plomo 23.011 ton en Zacatecas, Chihuahua, Durango, Oaxaca y Estado de México, finalmente el zinc con 62.165 ton de Zacatecas, Durango, Chihuahua, Edo. De México y Oaxaca, estos datos corresponden al mes de enero del 2024 y sitúa a Zacatecas como el principal productor de plomo, zinc, plata y oro y segundo lugar en producción de cobre (Unidad de Coordinación de Actividades Extractivas, 2024).

### **2.3 Minería en Pinal de Amoles, Querétaro**

Las ruinas prehispánicas de las comunidades de El Cuervo, Puerto de Vigas, Tonatico, El Rodezno, San Pedro Escanela, Quirambal, El Cantón y las minas de azogue son indicadores de que la actividad minera, principalmente de mercurio, ya se realizaba en el municipio de Pinal de Amoles desde antes de la llegada de los españoles. Según el Servicio Geológico Minero (SGM), en el 2007, las actividades de electricidad, agua, construcción y la minería ocupaba al 16.99 % de la población municipal, en segundo lugar, después de las actividades de agricultura y aprovechamiento forestal. (Núñez Miranda *et al.*, 2007)

Querétaro agrupa siete regiones mineras, de las cuales Pinal de Amoles encabeza la lista, debido a su importancia y tipo de mineralización; las sustancias metálicas de extracción son oro, plata, plomo, zinc, antimonio y mercurio en yacimientos tipo mantos y chimeneas, zonas de skarn y vetas (Martínez Arroyo *et al.*, 2021). Las minas se encuentran en los estratos carbonosos y con presencia de fallas y fracturas geológicas (Núñez Miranda *et al.*, 2007).

En el 2019, Querétaro ocupó el lugar 23 en el valor total de la Producción Minera Nacional con los metales de oro, plata, plomo, cobre, zinc y caolín. A nivel estatal, el 4.2 % de los ingresos económicos provienen de la minería metálica y no metálica. La Sierra Gorda alberga nueve minas artesanales verificadas y once

minas no verificadas en la producción de mercurio de un total estatal de 19 minas artesanales verificadas y 59 no verificadas, estas cifras, como se pueden apreciar, indican que la mayoría de las minas se ubican fuera del área de la reserva. Sin embargo, se estima que las minas de la Sierra Gorda son las que tienen más emisiones y liberaciones de mercurio al ambiente, Pinal de Amoles con cuatro minas artesanales contribuye con el 47 % de emisiones y liberaciones ambientales a nivel estatal.

Con el objetivo de buscar alternativas de explotación de sustancias diferentes al mercurio, el Instituto de Ecología y Cambio Climático realizó un estudio, en el cual obtuvo seis muestras (sitio A, B, C, D, E y F) de suelo para identificar y cuantificar la presencia de otros elementos. Los puntos muestreados se ubicaron en la zona de la reserva Sierra Gorda, por el método EPA 6200 el cual consiste en la obtención de concentración de elementos como antimonio, arsénico, cadmio, calcio, cobre, cromo, manganeso, plomo, selenio, vanadio, zinc, azufre, cobalto, estaño, estroncio, fosforo, hierro, molibdeno, níquel, plata, potasio y titanio. La norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se empleó como media comparativa de límites permisibles. Los límites que considera la norma alerta sobre los posibles daños a la salud humana y al medio ambiente.

Los resultados fueron los siguientes:

Sitio A: Zona de explotación y alrededor de una mina artesanal de mercurio en activad, cinco muestras de ocho excedieron los límites para mercurio, el total de las muestras presentaron niveles elevados de arsénico, en concentraciones considerables el hierro y titanio.

Sitio B: Zona forestal de acceso restringido, se realizó una única muestra, obteniendo que el arsénico superó el límite de suelo de uso agrícola y concentraciones considerables de hierro y titanio.

Los sitios C, D, E y F: se realizaron en bocaminas sin registro, una muestra en cada sitio. Los resultados fueron; sitio C: concentración elevada de plomo, fue el sitio que presento mayor cantidad de Zinc y presencia de hierro. Sitio D: excede los parámetros de arsénico y plomo, presencia de zinc y titanio, es la muestra con mayor presencia de hierro. Sitio E: metales explotables como cobre, zinc y hierro, también elevadas concentraciones de arsénico. Por último, el sitio F: concentraciones elevadas de cromo, la muestra se distingue por la mayor cantidad de titanio, y concentración considerable de hierro. (Martínez Arroyo *et al.*, 2021)

El Servicio Geológico Mexicano, en 2007, por medio del Inventario Físico de los recursos minerales del municipio Pinal de Amoles dio a conocer las minas prospecto, activas y abandonadas. En la Tabla 1 se pueden observar los datos de las minas, un total de 41 minas en la lista, de las cuales tres se encontraron activas, 11 abandonadas y 27 minas prospecto. Las sustancias de extracción se centraron en plomo (Pb), zinc (Zn), plata (Ag), oro (Au), manganeso (Mn), antimonio (Sb) y cobre (Cu). La presencia del plomo fue en 30 minas, la plata en 31 minas, el zinc en 28 minas, oro en 16 minas, antimonio en 9 minas, el cobre en 7 minas y el manganeso en 4 minas. El potencial de explotación fue de 3,044,229 toneladas.

Tabla 1. Minas en el municipio de Pinal de Amoles

NOMBRE	SUSTANCIA				OPERACIÓN	LATITUD	LONGITUD	POTENCIAL
								EXTRACCIÓN
								ton
Nuestra Señora de la Luz	Mn				Prospecto	2,320,215	443,125	1,200
La Morita	Pb	Zn	Ag		Prospecto	2,320,250	440,870	10,000
Las Joyas	Pb	Zn			Prospecto	2,320,720	440,300	900
El Buey	Pb	Zn	Ag		Prospecto	2,321,925	438,555	3,000
La Navidad	Zn				Prospecto	2,333,787	446,907	1,500
El Encino	Pb	Zn	Ag	Au	Prospecto	2,336,388	436,026	250,000
Lote Pinal	Pb	Ag	Sb	Zn	En Explotación	2,338,231	435,605	17,550
La Gallina (El Carmen)	Ag	Pb			Abandonada	2,338,099	436,671	5,000

## METALES PESADOS PRESENTES EN LOS CAUCES DE LA CUENCA PRESA JALPAN

Montecristo	Au	Cu	Zn		Abandonada	2,336,848	436,206	30,000	
Magueycitos I	Pb	Zn			Prospecto	2,335,984	436,370	7,500	
Magueycitos II	Au				Prospecto	2,336,968	436,376	80,000	
La Esmeralda	Cu	Au			Prospecto	2,336,439	437,168	Sin cuantificar	
El Plomo	Ag	Pb			Abandonada	2,335,875	435,700	2,500	
Boca Vieja – La Gloria	Ag	Pb	Zn		Prospecto	2,338,525	436,955	368,550	
Mina Grande	Ag	Pb	Zn	Sb	En explotación	2,343,792	437,123	67,869	
La Paloma (Otomites)	Pb	Zn			Prospecto	2,335,481	439,814	1,000	
San Vicente	Ag	Pb	Zn		Abandonada	2,336,283	439,034	5,000	
Las Animas	Ag	Pb	Zn		Abandonada	2,338,589	435,486	175,000	
Minas San Juan	Ag	Pb	Zn		Abandonada	2,339,274	435,911	878,850	
Minas Santo Domingo	Au	Ag	Pb	Zn	Abandonada	2,339,760	435,975	902,650	
Minas La Gachupina	Ag	Pb	Zn		Abandonada	2,339,854	435,553	1,012,600	
El Cobre	Au	Ag			Prospecto	2,343,245	436,485	11,000	
La Trinidad (San Carlos)	Ag	Pb	Zn	Sb	Au	En Explotación	2,341,983	433,423	33,750
San Antonio	Ag	Pb	Zn	Sb		Prospecto	2,341,889	433,369	10,500
El Abra	Ag	Pb	Zn	Sb		Prospecto	2,341,924	433,317	2,340
El Huasteco	Ag	Pb	Zn	Sb		Prospecto	2,341,980	432,772	2,000
Poder de Dios	Ag	Pb	Zn	Sb	Au	Prospecto	2,342,208	432,685	4,500
Carrizal	Ag	Pb	Zn	Sb	Au	Prospecto	2,341,236	434,031	Sin cuantificar
Santa Rita	Ag	Pb	Zn	Sb	Au	Prospecto	2,341,340	432,725	Sin cuantificar
El Zopilote	Ag	Au				Prospecto	2,340,990	432,660	Incipiente
San Nicolás	Ag	Pb	Zn			Abandonada	2,345,153	434,480	7,500
La Encantada	Au	Mn				Prospecto	2,344,526	434,658	Sin cuantificar
Santa Cruz	Au	Mn				Prospecto	2,344,275	434,980	Sin cuantificar
Santa Águeda	Pb	Zn	Ag			Abandonada	2,347,477	434,958	4700
La Purísima	Au	Ag	Pb			Abandonada	2,347,310	434,650	3,600
El Roble	Au	Ag	Zn			Prospecto	2,347,200	436,370	1,300

## METALES PESADOS PRESENTES EN LOS CAUCES DE LA CUENCA PRESA JALPAN

El Perdido	Au	Mn	Prospecto	2,347,350	435,720	1,620	
El Encinal	Ag	Pb	Prospecto	2,338,040	434,270	3,500	
La Borrasca	Pb	Zn	Prospecto	2,337,760	432,480	3,900	
El Refugio	Ag	Pb	Zn	Prospecto	2,337,450	437,380	30,000
San Francisco	Ag	Pb	Prospecto	2,336,980	438,370	6,000	

Fuente: (Núñez Miranda *et al.*, 2007)

Por otra parte, la cartografía minera disponible en el portal de economía, muestra únicamente las concesiones vigentes de minas registradas en los años de 1978 al 2015, no contiene datos específicos de elementos de extracción ni situación de actividad (prospecto, abandonada o activa), sin embargo, presenta el área concesionada. Las concesiones de las 54 minas abarcan 5,196.80 ha (51.968 km<sup>2</sup>), es decir, el 7.37 % del área municipal. La tabla 2 fue elaborada con esta información.

Es importante mencionar que del área concesionada aproximadamente el 95 % se ubica dentro de la reserva ecológica Sierra Gorda.

Tabla 2. Minas Activas en Pinal de Amoles

N°	Nombre del Lote:	Latitud	Longitud	Superficie (ha):
1	La Cruz	212794	-996346	100.00
2	Los Banquitos	211511	-996705	35.59
3	La Trinidad	211803	-996398	52.67
4	Aurora	210591	-996239	48.00
5	Tesoro Oculto	211532	-996286	96.96
6	Niño Arrtillo	211499	-996378	106.34
7	San Bernardo	212162	-995229	400.00
8	San José	210361	-995961	100.50
9	El Capitán	210646	-996492	40.00
10	Aida Fracc. 4	212012	-996186	15.00
11	Poder De Dios	211803	-996499	149.91
12	Ciénega	211631	-996869	28.00
13	Neri	212239	-996437	50.06
14	El Gasto	21151	-99619	12.00
15	La Soledad	211594	-996781	42.00
16	Poniente	212194	-996369	348.62

METALES PESADOS PRESENTES EN LOS CAUCES DE LA CUENCA PRESA JALPAN

17	Aida Fracc. 3	211971	-996151	6.92
18	Doña Amparo	212034	-996104	12.43
19	La Morada Del Carrizal	211777	-996404	105.51
20	La Crucita	211973	-99627	70.00
21	Los Santos 2	210451	-995798	300.00
22	El Porvenir	210309	-996327	49.00
23	San Miguel Arcángel	210619	-996705	38.10
24	Plomosa	209831	-995777	64.00
25	Ampliación La Crucita	211986	-996241	49.04
26	Azteca li	210681	-996162	80.00
27	Pinal De Amoles	211461	-99618	78.00
28	La Divina Providencia	210661	-996043	48.00
29	Los Santos	210381	-995956	43.69
30	Monte Carlos	21135	-996094	320.09
31	Monte Cristo	21136	-996137	25.00
32	San Vicente	211253	-995876	50.00
33	La Colmena	210871	-996718	16.00
34	Guadalupe	210665	-99682	20.00
35	Los Santos	210397	-996125	80.00
36	La Luna	211737	-996168	57.30
37	San Judas	211548	-996868	64.00
38	Las Vírgenes	21046	-994847	30.00
39	El Tepozán	211404	-994991	150.00
40	Hidalgo	212004	-996078	11.60
41	Los Tules	210666	-996722	46.00
42	Mina Grande	211987	-996091	24.00
43	La Juárez	211965	-996092	36.53
44	Las Cumbres	210329	-995961	65.81
45	Verónica	211879	-996229	64.00
46	San Miguel	210111	-995395	111.37
47	Monte Sinaí	211404	-996098	248.41
48	El Bunker	210978	-996078	100.00
49	El Potro	211314	-996031	434.12
50	Santo Niño	21159	-996563	100.00
51	Santo Domingo	211586	-996185	225.00
52	Platea	212253	-996244	237.30
53	Esmeralda	211863	-996475	40.00
54	San José 2	212101	-996695	69.93

Estos datos arrojan que el municipio de Pinal de Amoles es basto geologicamente en minerales como el plomo, zinc, plata, oro, manganeso, antimonio, cobre arsénico y titanio.

## **2.4 Metales pesados**

Algunos autores consideran como metal pesado a aquel elemento cuya densidad es de 5 g/cm<sup>3</sup>, por otra parte, de acuerdo a sus propiedades químicas; se consideran los elementos que se ubican en el bloque de los metales en la tabla periódica, en el grupo 3 al 16 en los periodos 4 y superiores, relacionando así el termino de metal pesado en función de su composición química (Hawkes, 1997).

En la actualidad, los contaminantes que mayor riesgo representan son los metales pesados, en el caso específico cuando son analizados en agua o sedimentos tienen la capacidad de originar serios problemas para la vida acuática (y terrestre), mediante la bioacumulación, bio concentración y bio magnificación se pueden incorporar a la cadena trófica. La anatomía de todo ser vivo no tiene la capacidad para desechar por completo las concentraciones ingeridas a diferencia de los contaminantes de procedencia orgánica (Ávila Pérez *et al.*, 1999).

Los metales pesados llegan a los reservorios producto del desecho de diversas fuentes que pueden ser o no de origen antropogénico, en el proceso de tratamiento de aguas residuales vertidas a afluentes, descargas directas al suelo, emisión a la atmosfera y finalmente en el proceso de lluvia escurrimiento son depositados en los sedimentos, teniendo así, químicas biodisponibles con la capacidad de resuspensión en la columna de agua, produciendo intoxicaciones que van desde graves a agudas.

La concentración de los metales pesados en sedimentos se relaciona en función de la granulometría, en material burdo y limo arcilloso se concentra de manera homogénea, en material fino, arenas finas y gravas las concentraciones son relativamente elevadas (Tejeda *et al.*, 2005)

Los tipos de sedimentos, incluyendo contaminantes, que son transportados en los cauces de los afluentes depende en gran medida del caudal y la pendiente de la cuenca, es conocido que el tamaño de partículas de los sedimentos disminuye en proporción directa a la disminución del caudal y de la pendiente, de esta manera, las gravas y rocas se mueven en caudales y pendientes mayores que las partículas finas, que pueden ser transportadas en caudales y pendientes bajos (Iroume, 2003).

### ***2.5 Toxicidad del arsénico***

En la antigüedad el arsénico fue empleado para envenenar al objetivo, debido a su falta de sabor y facilidad para disolver en las bebidas o comidas era difícil su identificación. El daño a la salud humana como consecuencia del contacto o indigestión directa o indirecta depende, como en la mayoría de los casos, de las concentraciones de exposición. El arsénico se encuentra disponible de manera natural en la corteza terrestre, a consecuencia de las actividades humanas se ha encontrado en el aire, el agua y en el suelo. También, se ha empleado en diversos productos como los pesticidas, semiconductores (U.S. Geological Survey , 2025), colorantes para vidrio y cerámica, insecticidas, herbicidas, fungicidas, metalurgia, la minería entre otros.

El uso del arsénico en los productos que se manipulan día a día es bastante considerable, añadiendo también, la exposición de contaminantes atmosféricos y ambientales. En el área de la salud se han definido cuatro niveles clínicos de intoxicación por arsénico en función del tiempo de respuesta del organismo: primero; intoxicación sobreaguda; el paciente evoluciona la intoxicación en un tiempo muy corto de dos horas. Segundo; intoxicación aguda; el tiempo de evolución puede ser en semanas presentando síntomas como diarrea, vomito, dolor abdominal, mal aliento, ardor de estómago, olor en la saliva, cefalea, debilidad y vértigo, si estos síntomas no son tratados medicamente se puede llegar a daño renal, hepático y cardiaco. Tercero; intoxicación subaguda presenta síntomas ligeros de la intoxicación aguda. Cuarto; intoxicación crónica, se da cuando la

ingesta del elemento es en concentraciones bajas, pero por un tiempo constante, que conllevan trastornos digestivos y nutricionales, reflejados en pérdida de peso, fatiga, falta de apetito, vómito, diarrea, náuseas, por otra parte, el paciente presenta trastornos de gripe, como escurrimiento nasal, flemas y cefalea, cambios en la tonalidad de la piel (piel bronceada con manchas blancas) hiperqueratosis palmar y plantar con factibilidad a desencadenar hiperqueratosis epidermoide, cambio en la coloración de uñas ( líneas blancas) hasta trastornos neurológicos principalmente visibles como “ pie caído” y “ mano en garra”.

Existen tres niveles tóxicos de dosis por vía indigestión: 1; dosis media; concentración de arsénico que produce efectos determinados en el 50% de la población y es de 40-60 kg/kg, 2; dosis toxica; efectos tóxicos en el 50 % de la población, en cantidades de arsénico de 61- 119 mg/kg y 3; dosis letal se reduce a muerte del paciente las concentraciones son de 120-200mg/kg, en cambio, la arsina (gas de arsénico) basta con 15ppm para causar la muerte súbita (inmediata) ( Nordberg et al., 2017) (De la Rosa Hernández, 2018).

## ***2.6 Toxicidad de plomo***

El plomo se caracteriza por su textura blanda, y color gris, además de ser pesado, que le han permitido ser usado en gasolina, fabricación de pinturas, plaguicidas, en empaques o embaces con soldadura de plomo y en recubrimientos de vajillas y cerámicas.

Al igual que el arsénico, la intoxicación crónica se desarrolla con dosis bajas a largo plazo, mediante la exposición en aire, agua o alimentos. El homo sapiens en etapa adulta puede retener concentraciones de hasta 10 µg/dl en la sangre sin efectos tóxicos, en cambio en la etapa inicial o infancia no se deben permitir concentraciones mayores de 10-14 µg/dl.

Cuando el plomo ya se encuentra en el torrente sanguíneo se distribuye a huesos, dientes, tejidos blandos (pulmones, hígado, riñones), al cerebro y bazo,

además de su capacidad para atravesar la placenta afectando el proceso reproductivo como abortos espontáneos, nacimientos antes de tiempo (prematuros) y anomalías congénitas, también puede originar edemas cerebrales, alteraciones en los riñones, e intestinales (pérdida de apetito, estreñimiento, vómito y cólicos) (Ferrer Dufol, 2003).

## **2.7 Toxicidad de cadmio**

El cadmio posee una cualidad muy importante para los productos de la demanda actual, debido a la resistencia a la corrosión es que se emplea para recubrimiento de otros metales (tornillos, tuercas, partes de avión, motores de autos, recubrimiento en sartenes o recipientes de cocina, entre otros), y los compuestos del cadmio versátilmente son usados en estabilizadores plásticos y pigmentos, tintes, baterías recargables de dispositivos pequeños, colorantes en pirotecnia, películas fotográficas, impresiones en fibras textiles, aditivo en cristales para aumentar su firmeza y muchos más.

Al igual que otros metales como el arsénico y el plomo, el cadmio se puede acumular en el cuerpo, mediante la ingestión intestinal, una particularidad se presenta en individuos con bajos niveles de hierro que permiten fijar hasta el 20 % de cadmio de la cantidad ingerida. Sin embargo, una vez retenido el Cd toma de 7 a 30 años desecharlo mediante las heces o la orina, implicando riesgos a la salud ( Nordberg *et al.*, 2017).

El nivel de toxicidad se divide en aguda o crónica, la fase aguda se da para el caso de ingestión vía aérea en concentraciones mayores a 1 mg/m<sup>3</sup> después del contacto hasta ocho horas se pueden presentar síntomas de gripe o fiebre, posteriormente neumonitis química, cáncer pulmonar, y mediante la ingesta digestiva en concentraciones mayores a 15 mg/L los síntomas varían de náuseas, vómitos, diarrea, dolor abdominal, entre otros.

En el nivel crónico, mediante la exposición de humos o polvo de cadmio producto de alguna actividad que emplee el cadmio en el proceso de la fabricación de consumibles o extracción del mismo, se ven afectadas las vías respiratorias, daños en los riñones y anemia. Cuando las concentraciones son muy elevadas o el periodo de exposición es a largo plazo el paciente presenta manchas amarillas den los dientes y la perdida de la percepción del olor. La Agencia Internacional para la Investigación determino que el cadmio es un elemento cancerígeno para el ser humano ( Nordberg *et al.*, 2017)

## **2.8 Uso de los sedimentos**

En los sedimentos, dependiendo su composición granulométrica y propiedades físicas y químicas se puede destinar un uso, por ejemplo; en el caso de gravas y arenas destinarlas para uso en obras de ingeniería y construcción, en caso de alto contenido de materia orgánica; uso en recreación y mejoramiento de terrenos, sedimentos con alto porcentaje de arenas para la restauración y engorde artificial de playas erosionadas y otros usos en la industria, agricultura y acuicultura, sin embargo, las normas y reglamentos ambientales restringen los usos alternativos (Simões *et al.*, 2017).

En la búsqueda de la factibilidad de usos para los sedimentos se han logrado obtener materiales para la construcción como los ladrillos, recordando que los sedimentos pueden contener en su mayoría arcillas, también, conociendo su composición mineralógica pueden emplearse para recuperar metales de alto contenido comercial (Coreño Alonso *et al.*, 2024).

Los sedimentos son fuentes potenciales de contaminantes en los sistemas acuáticos, afectando la calidad del agua y la producción agrícola de los terrenos aledaños o suelos donde se emplea el sedimento extraído del azolve. En los embalses la materia en suspensión tiende a depositarse, pudiendo inmovilizarse y resuspender si las condiciones hidrológicas y fisicoquímicas lo permiten. Con la presencia de sedimentos contaminados, el agua subterránea también puede

afectarse, debido a que el reservorio hace la función de un humedal, por tanto, realiza una recarga acuífera (Ávila Pérez *et al.*, 2005).

Los sedimentos dragados requieren consideraciones especiales en su uso como suelo agrícola (García Aragón *et al.*, 2003). Resaltando la controversia del tema, los reservorios pueden presentar mayor concentración de contaminantes como el arsénico en comparación con las parcelas de cultivo (Jiménez *et al.*, 2024).

### **2.9 Erosión hídrica**

La erosión hídrica es el proceso en el cual las partículas de suelo son desprendidas por la acción del agua, deshielo o nieve. La erosión consta de tres etapas fundamentales; desprendimiento de partículas debido a la energía cinética de la gota de agua al impactar el suelo, el transporte de las partículas producto de la escorrentía del flujo, y por último la sedimentación o depósito del material (sedimentos). Los factores que contribuyen a la erosión son la precipitación, la vegetación, el uso de suelo, la cobertura vegetal, tipo de suelo, velocidad del flujo y la topografía. (García Chevesich , 2010).

Las combinaciones de los factores de la erosión generan diversos grados de erosión, entendiéndose que, la erosión es mayor cuando la precipitación presenta una mayor intensidad y se tiene una degradada capa de cobertura vegetal además de la pendiente del terreno.

### **2.10 Origen y transporte de sedimentos**

El agua y el aire son factores que activan el proceso tanto físico como químico en la destrucción y transformación de las rocas, la combinación de estos dos procesos con cambios atmosféricos crea un proceso conocido como intemperización. La intemperización es el evento por el cual la roca modifica sus propiedades tanto físicas/ mecánicas y químicas (Basile, 2018).

La desintegración mecánica genera tamaños de partículas como gravas y arenas, en algunos casos también limos. Se debe a factores físicos como los

cambios bruscos y periódicos de temperatura; consecuencia de los esfuerzos de tensión y compresión alternados provocando que la roca se desmenuza por fatiga, por congelación; ocurre en rocas con porosidades donde el agua queda depositada y al congelarse fractura la roca, y finalmente por efectos de la flora y la fauna; puede ocurrir debido a las raíces de árboles que penetran las rocas, y una actividad poco común es cuando los animales perforan o excavan. En este proceso el suelo resultante puede quedarse en el mismo sitio (residual), o bien puede ser transportado lejos del lecho madre, generando estratos sin relación directa en donde son depositados.

Por otra parte, cuando el tamaño de las partículas son arcillas se deben a la descomposición química; se modifican las propiedades mineralógicas de la roca, donde el agua es el principal agente, algunos ejemplos son la adición de iones de oxígeno (oxidación), extracción de iones de oxígeno (reducción), disolución del material rocoso debido a la adición de dióxido de carbono (carbonatación), adición de agua en la composición mineralógica (hidratación) y por efectos químicos de la vegetación como la descomposición de materia orgánica.

La desintegración ya sea mecánica o química de las rocas produce partículas de menor tamaño, y estas pueden o no combinarse con suelo y ser transportadas por el agua, y son conocidos con el nombre de sedimentos.

Existen dos fuentes de producción de sedimentos, el primero es de carácter natural; es el desgaste de la capa delgada y frágil del suelo, el cual puede desprenderse debido a la acción del agua (erosión hídrica) o a la acción del viento (erosión eólica). Una vez que el agua ha saturado el suelo, se inicia con el proceso de escurrimiento, el cual transporta las partículas de sedimentos y son depositadas en llanuras o lugares donde la pendiente no permite más el desplazamiento de dichas partículas. La segunda fuente conocida, es de origen artificial, es decir, donde el hombre ha intervenido con la modificación del paisaje como la destrucción de la vegetación, al realizar obras de ingeniería, en la explotación de minas y

canteras, aporte de desechos urbanos e industriales y los cambios de usos de suelo (García Frores & Maza Álvarez , 1998).

La producción desmedida de sedimentos tiene consecuencias negativas en la preservación y calidad del agua y del suelo, en el caso de reservorios se ven afectados en la disminución de la capacidad de almacenamiento.

### **2.11 Tamaños de las partículas de los sedimentos**

La propiedad más importante de los sedimentos es el tamaño de partícula, permitiendo conocer que distancias pueden ser transportadas en relación al caudal, si estos retienen o no contaminantes o si representan algún riesgo para la fauna del lugar ( Zafra Mejía *et al.*, 2009).

Los criterios principales para determinar el tamaño de una partícula suelen ser los siguientes:

#### **2.11.1 Diámetro nominal**

Es el diámetro que tiene una esfera de igual volumen que la partícula que se está analizando, no se considera la forma o densidad, matemáticamente:

$$D_{nominal} = \left[ \frac{6}{\pi} V_p \right]^{1/3} \quad (1)$$

Donde:

$V_p$  = volumen de la partícula

Este diámetro se emplea poco en el estudio de sedimentos, pues su aplicación se limita a partículas gruesas, es difícil y poco práctica para partículas pequeñas.

### 2.11.2 Diámetro de cribado

El método consiste en colocar la muestra de sedimento o suelo en una serie de mallas, iniciando con la malla de mayor a menor diámetro de abertura, el tamaño de la partícula corresponde al tamiz en el que fue retenido. No considera la forma ni la densidad. A través de la experimentación, se ha obtenido una relación matemática entre el diámetro nominal y el diámetro de cribado;

$$D_{cribado} = 0.90 D_{nominal} \quad (2)$$

Tabla 3. Distribución de mallas.

Fracción	Malla		Variación permisible de la abertura promedio con respecto a la denominación de la malla	Abertura máxima permisible para no más del 5% de las aberturas de la malla	Abertura máxima individual permisible	Diámetro nominal del alambre.
	Designación	Abertura nominal				
Grava	3"	75	±2.2	78.1	78.7	5.8
	2"	50	±1.5	52.1	52.6	5.05
	1 ½"	37.5	±1.1	39.1	39.5	4.59
	1"	25	±0.8	26.1	26.4	3.8
	¾"	19	±0.6	19.9	20.1	3.3
	½ "	12.5	±0.39	13.1	13.31	2.67
	3/8"	9.5	±0.30	9.97	10.16	2.27
	¼"	6.3	±20	6.64	6.78	1.82
Arena con finos	Nº4	4.75	±0.15	5.02	5.14	1.54
	Nº10	2	±0.070	2.135	2.215	0.9
	Nº20	0.85	±0.035	0.925	0.97	0.51
	Nº40	0.425	±0.019	0.471	0.502	0.29
	Nº60	0.25	±0.012	0.283	0.306	0.18
	Nº100	0.15	±0.008	0.174	0.192	0.11
Nº200	0.075	±0.005	0.091	0.103	0.053	

Unidades en mm. Extraída de SCT, M-MMP-1-06-2003, 2003.

Los resultados se suelen presentar mediante la gráfica de la curva granulométrica en el eje Y (de las ordenadas) representa el porcentaje y en el eje X

(de las abscisas) el tamaño de partícula en escala logarítmica; definiendo el porcentaje de grava, arena y finos que la muestra contiene, también permite conocer si es un suelo bien o mal graduado conforme los coeficientes de uniformidad ( $C_u$ ) coeficientes de curvatura ( $C_c$ ), matemáticamente se definen:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

$$C_c = \frac{D_{30}}{D_{60}D_{10}} \quad (4)$$

Donde:

$D_{60}$ = tamaño de partículas representan el 60 % en peso

$D_{10}$ = Diámetro efectivo, tamaño de las partículas que representa el 10 % o más en peso.

$D_{30}$ = Tamaño de partículas que representa el 30 % del peso del suelo.

En la tabla 4 se muestran los valores de comparación de los coeficientes  $C_u$  y  $C_c$ , se deben cumplir ambos criterios para decir que un suelo está bien graduado, de lo contrario se entiende que es un suelo mal graduado. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

*Tabla 4. Coeficientes de  $C_u$  y  $C_c$*

<b>Clasificación</b>	<b>Coeficiente de uniformidad</b>	<b>Coeficiente de curvatura</b>
Arena bien graduada	$C_u \geq 6$	$1 \leq C_c \leq 3$
Grava bien graduada	$C_u \geq 4$	$1 \leq C_c \leq 3$

### **2.11.3 Diámetro de sedimentación**

La partícula que se analiza tiene el mismo diámetro que una esfera de igual densidad y velocidad de caída, estudiados en el mismo líquido y a la misma temperatura. El peso de una partícula en sumersión tiende a equilibrarse en el líquido en reposo, oponiéndose a su caída, en el momento que ambas fuerzas se equilibran la partícula inicia a descender a una velocidad uniforme, a este fenómeno se le conoce como velocidad de caída terminal o final.

### **2.11.4 Diámetro estándar de sedimentación**

Se denomina diámetro estándar de sedimentación al fenómeno que ocurre cuando la partícula analizada baja a la misma velocidad que una esfera de densidad de 2.65 en agua destilada a 24°C. Este método es empleado para conocer el tamaño de partículas muy finas como los limos y arcillas, también se le conoce como Ley de Stokes o granulometría vía hidrómetro.

Ecuación de Ley de Stokes:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_0}{18\eta} D^2 \quad (5)$$

Donde:

$v$ = velocidad de la sedimentación de la esfera (cm/s).

$\gamma_s$ = peso específico de la esfera (g/cm<sup>3</sup>).

$\gamma_0$ = peso específico del fluido (g/cm<sup>3</sup>), en función de la temperatura.

$\eta$ = viscosidad del fluido (gs/cm<sup>2</sup>) en función de la temperatura.

$D$ = diámetro de la esfera (cm).

Para determinar el diámetro de las partículas se emplea la ecuación

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (6)$$

Donde:

D= diámetro de la partícula en mm.

t= Tiempo transcurrido (min).

K= Constante para varias combinaciones de peso unitario y temperaturas (de tabla 6)

L= Profundidad efectiva de caída (cm).

Tabla 5. Valores de K para varias combinaciones de peso unitario y temperaturas

Temp. (°C)	Peso unitario de los sólidos del suelo (g/cm <sup>3</sup> )							
	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.0151	0.0148	0.0146	0.0144	0.0141	0.0139	0.0137	0.0136
17	0.0149	0.0146	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134
18	0.0148	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132
19	0.0145	0.0143	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.1320	0.0131
20	0.0143	0.0141	0.0139	0.0137	0.0134	0.0133	0.0131	0.0129
21	0.0141	0.0139	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127
22	0.0140	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0128	0.0126
23	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124
24	0.0137	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0125	0.0123
25	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0122
26	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0124	0.0122	0.0120
27	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0119
28	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0123	0.0121	0.0119	0.0117
29	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0121	0.0120	0.0118	0.0116
30	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0118	0.0117	0.0115

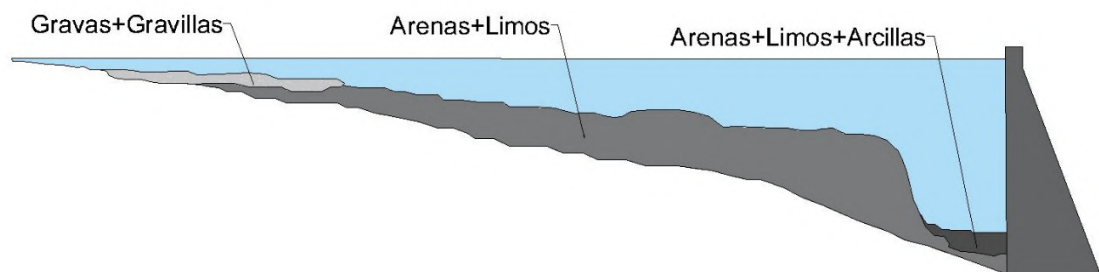
Fuente: ASTM D422-63, 2007

## 2.12 Sedimentación en embalses

Un embalse es una obra de ingeniería para retener el agua en temporada de lluvias, y almacenarla para usarla a lo largo del año, incluyendo la temporada de estiaje. Por otra parte, también es un obstáculo en el río que origina un estancamiento,

atrapando el sedimento producido en la cuenca. La distribución del material depende del tamaño de partículas, el sedimento grueso se deposita de acuerdo a la disminución de la velocidad, la ampliación del cauce y mayor profundidad del tirante, formando un delta, principalmente este efecto se observa en la entrada del flujo al embalse. El tamaño de las partículas depositadas va disminuyendo conforme hace el trayecto longitudinal a través del vaso, en consecuencia, las partículas de menor tamaño como los limos y arcillas son depositadas a la salida del flujo, cerca de la cortina (Palau Ybars, 2004).

Sin embargo, existen otros factores que intervienen en la distribución de los sedimentos como la estratificación de la temperatura, dimensiones, forma y características únicas del embalse, tipo de operación, destino del agua, características químicas del sedimento, capacidad de almacenamiento, características de la avenida de ingreso del flujo, diseño de la cortina, entre otros.



*Figura 2. Distribución de sedimentos en un embalse con escaso manejo del desagüe de fondo*

Fuente: Palau Ybars, 2004

El material que es depositado en el fondo del embalse, este sujeto a la compactación con el transcurso del tiempo, de esta manera hace más difícil su remoción. En embalses pequeños la pérdida de volumen de almacenamiento suele deberse a material grueso. El sedimento no solo afecta la cantidad, también, se refleja en la calidad del agua, alterando la flora y fauna, y limitando su uso o encareciendo el proceso de potabilización (Sánchez, 1997).

El diseño de embalses contempla una cantidad de azolve, sin embargo, en algunos casos el mal manejo de la erosión de la cuenca y el costo que con ello conlleva, generan que los embalses pierdan su capacidad de almacenamiento pudiendo llegar al punto de quedar inservibles, los costos de extracción del material depositado son elevados, incluso, se puede optar por construir un nuevo embalse que rehabilitar el azolvado.

El sedimento en suspensión es una fuente importante que aporta contaminantes a los afluentes, siendo el medio de transporte de partículas de metales como zinc, plomo, níquel, cobre, cadmio y cromo, que al ser depositadas actúan como una fase de acumulación de estos elementos (Hansen *et al.*, 1995).

### **3 METODOLOGÍA**

#### ***3.1 Recolección de información***

La información empleada para este estudio fue por medio de sitios oficiales de información de acceso libre para consulta y descarga. Se consultó en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) las cartas de edafología, Municipios de Querétaro, Localidades de Querétaro, uso de suelo y vegetación, y la los datos de población y economía, se descargó el Modelo Digital de Elevaciones por selección de área con resolución de 15 m del portal CEM3.0, del Servicio Geológico Minero los datos de los yacimientos mineros y la carta de litología, de la página de geolInfoMex datos de concesiones mineras (Cartografía minera), y de CONAGUA los datos de precipitación de las estaciones climatológicas e información sobre áreas concesionadas de las minas por medio del Portal de Economía. Se emplearon softwares de acceso libre como QGis, AutoCad, Google Earth y Red Sialt de INEGI.

### **3.2 Caracterización**

Con la información de las cartas de INEGI, se procesó la información en Qgis para delimitar la cuenca, y conocer sus características fisiográficas e hidrológicas.

#### **3.2.1 Área de estudio**

Al norte de Querétaro a 186 km se encuentra Jalpan de Serra, lugar de gran afluencia turística por sus atractivos lugares naturales con un importante crecimiento económico y poblacional, tanto naturales como los hechos por el hombre, tal es el caso de la presa Jalpan un importante cuerpo de abastecimiento de agua para la comunidad Jalpense, dicha presa se construyó en los años 70's. la cuenca Presa Jalpan, inicia en el Río Escanela Pinal de Amoles, lugar con actividad minera, estudios anteriores indican la presencia de metales pesados tales como el plomo, mercurio, cadmio y arsénico en aguas superficiales del cauce, resultado de la explotación minera.

Aguas abajo este cauce se une con agua proveniente de la cascada El Chuveje, pasando por la localidad de Ahuacatlán de Guadalupe, una población pequeña que cuentan con una planta tratadora de aguas negras, misma que incorpora el agua tratada al cauce principal del río, contribuyendo así a más contaminación con restos fecales, detergentes, grasas y aceites entre otros que son transportados hasta la presa Jalpan.

En el 2009 la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro realizó un estudio fisicoquímico de agua y sedimento del Río Escanela, con el objetivo de determinar los componentes minerales presentes, encontrando así, que los metales como el arsénico, plomo y cadmio se encuentran en cantidades superiores a las establecidas en la norma NOM-127-SSA1-1994 de la Secretaría de Salud, causando un daño al medio ambiente y a los organismos que viven en el área. (Trenado Uribe *et al.*, 2009).

### 3.2.2 Ubicación geográfica

La cuenca de la presa Jalpan inicia en el municipio de Pinal de Amoles en el Río Escanela, posteriormente este río se une al Río Ahuacatlán llegando así a la Presa Jalpan, ubicada en el municipio de Jalpan de Serra, coordenadas 21°12'N 099°28'W. La presa Jalpan fue construida en 1970-1975 sobre el cauce del río Jalpan, cuenta con una superficie de 68 ha y fue diseñada para una capacidad máxima de 8 millones de metros cúbicos (Tabla 6), esta cuenca pertenece a la reserva de la biosfera "Sierra Gorda". También, en la tabla 7 y figura 3 se puede observar el área de la cuenca correspondiente a los municipios donde se encuentra.

Tabla 6. Características del embalse

Longitud (km)	Área (ha)	Capacidad Almacenamiento*	Ancho (variable)	Cortina en forma de "L"	
				Dimensión 1	Dimensión 2
2.658	68	8,000,000 m <sup>3</sup>	384.493 m	53.762 m	34.416 m

\*Capacidad de almacenamiento de diseñado.

Tabla 7. Área territorial de la cuenca por municipio

Municipio	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje
Pinal de Amoles	163.263	87.089
Jalpan de Serra	24.202	12.911

\*Área total de la cuenca 187.465 km<sup>2</sup>

El municipio de Pinal de Amoles tiene el 87.1 % del área de la cuenca, mientras que Jalpan de Serra solo cuenta con el 12.9 %. Significa que Pinal de Amoles es el municipio con la principal área de aportación de recursos naturales como de aporte hídrico.

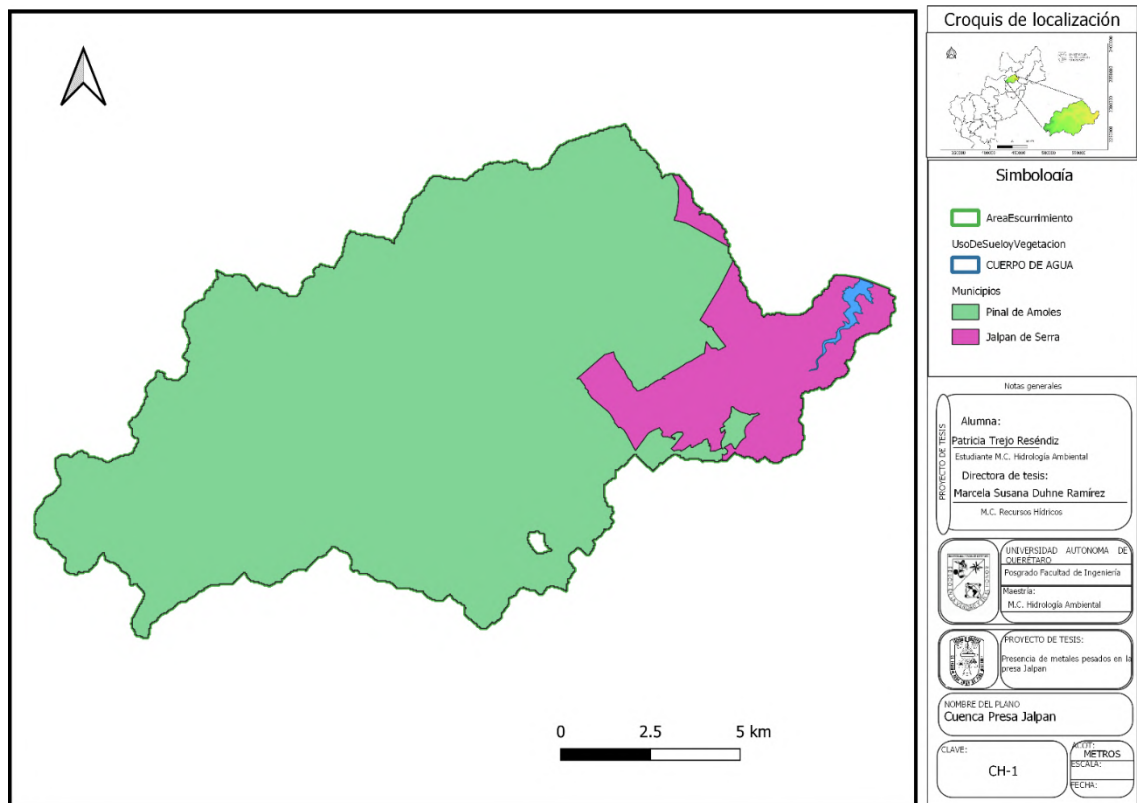


Figura 3. Distribución territorial de la cuenca Presa Jalpan.

### 3.2.3 Población

De acuerdo con INEGI 2020, y procesada la información, en la cuenca presa Jalpan se ubican 86 comunidades, de las cuales suman un total de 14,670 habitantes, siendo las comunidades más representativas; Pinal de Amoles (cabecera) con 2,357 habitantes y Ahuacatlán de Guadalupe con 1,897 habitantes. En la figura 4 se observan las comunidades representativas de la cuenca con más de 100 habitantes.

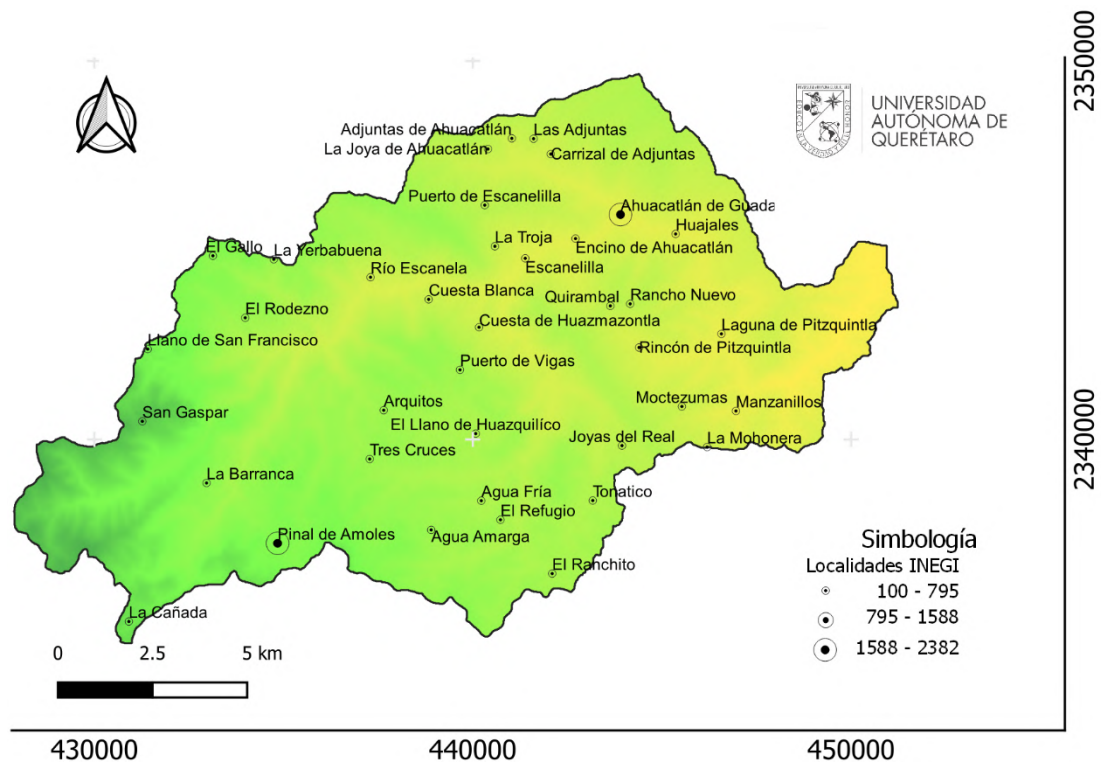


Figura 4. Ubicación de las comunidades dentro de la cuenca presa Jalpan.

### 3.2.4 Economía

Las actividades de desarrollo económico, según el censo económico 2019, fueron; comercios al por menor con un 51.8%, y servicio de alojamiento y preparación de alimentos y bebidas con un 15.8%.

### 3.2.5 Hidrografía

La cuenca presa Jalpan se encuentra en la región hídrica 26, denominada Pánuco. La cuenca abarca un área de 187.908 km<sup>2</sup>, perímetro de 105 km, el factor de forma  $K_f$  de 0.32; lo que indica que es una cuenca elongada corroborando con la razón de elongación  $R_e$  de un valor de 0.639 con forma elongada, un coeficiente de compacidad de 2.03 que determina la forma rectangular oblonga de la cuenca. En la figura 5 se puede observar la forma de la cuenca y el orden de los cauces.

La longitud del cauce principal es la distancia del punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida de la misma siguiendo la trayectoria tal cual del cauce, para este caso de longitud del cauce principal es de 176.14 Km.

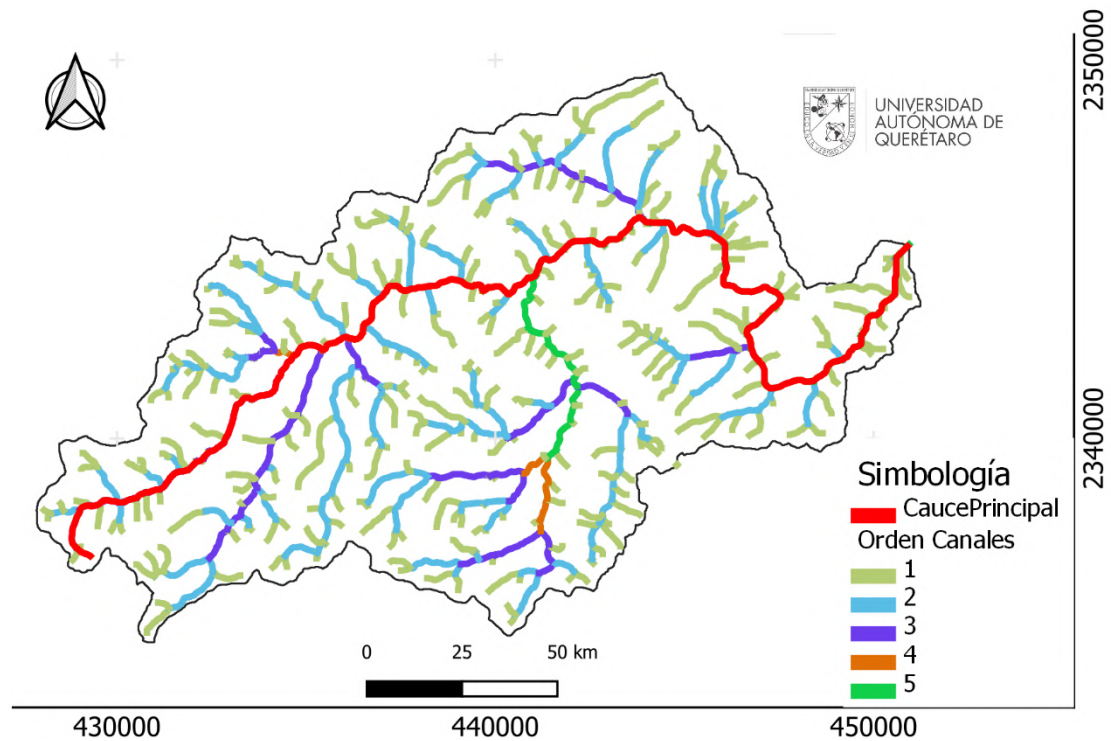


Figura 5. Forma de la cuenca y orden de los cauces.

En la tabla 8 se muestra la relación de bifurcación de los cauces en la cuenca, los cuales son de utilidad para conocer la relación o proporción que existe entre el número de canales de un orden y los del orden inmediato superior.

Tabla 8. Relación de bifurcación

Orden	#	RB
1	135	0.89
2	152	2.27
3	67	2.48
4	27	0.44
5	62	

Con la herramienta de Red Siatl se realizó la delimitación de la cuenca (Figura 6) para obtener una tabla de datos en relación a las características principales de la cuenca, como se muestra en la tabla 9.

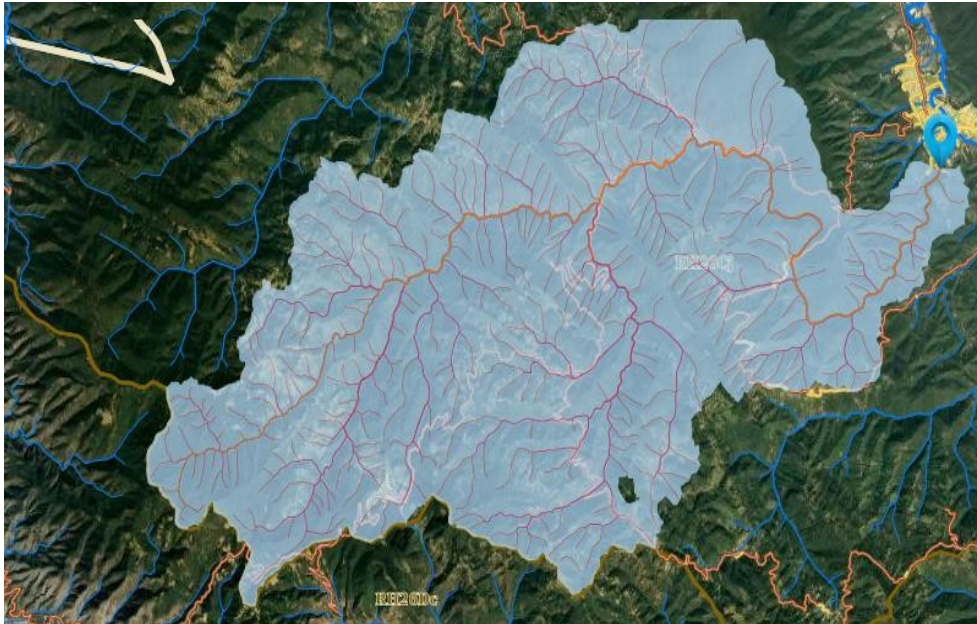


Figura 6. Delimitación de la cuenca en Red Siatl

Tabla 9. Características de la cuenca

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Clave Subcuenca	RH26Cj	Elevación máxima	3,062 m
Tipo	Exorreica	Elevación media	1,881 m
Densidad de Drenaje	2.08	Elevación mínima	760 m
Coefficiente de Compacidad	2.11	Longitud	36,828 m
Longitud promedio de flujo superficial	0.12	Pendiente media	6.09%
Elevación Máxima Subcuenca(m)	3062	Tiempo de concentración	184.53 (min)
Elevación Mínima Subcuenca (m)	760	Área drenada	187.51 km <sup>2</sup>
Elevación Máxima Corriente Principal(m)	2515	Perímetro	105 km
Longitud de Corriente Principal (m)	176139	Sinuosidad de Corriente Principal	1.73
Pendiente de Corriente Principal (%)	1.314		

Se observa que es una cuenca exorreica, de flujos perennes, la forma de sus corrientes es dendrítica

En el área del municipio de Pinal de Amoles en la parte sur cruza el Río Extoraz y cuenta con 143 manantiales, 6 bordos y 20 corrientes, por otra parte, dentro de la cuenca se identifica como parte del cauce principal el Río Escanela conformado por los Arroyos del Rodezno, La Trinidad y Agua Fría cuya trayectoria pasa por la localidad de Escanela, Escanelilla y Ahuacatlán hasta llegar a la presa de Jalpan (Núñez Miranda *et al.*, 2007).

### 3.2.6 Elevación

La cuenca presa Jalpan, tiene una elevación mínima de 760 msnm que corresponde al área baja de la presa de Jalpan, en el municipio de Jalpan de Sera; la parte más alta de la cuenca se ubica en la localidad de San Gaspar, Pinal de Amoles, con una elevación de 3062 msnm, y elevación media de 1911 msnm, como se puede observar en la Figura 7, esta cuenca corresponde a una cuenca de montaña.

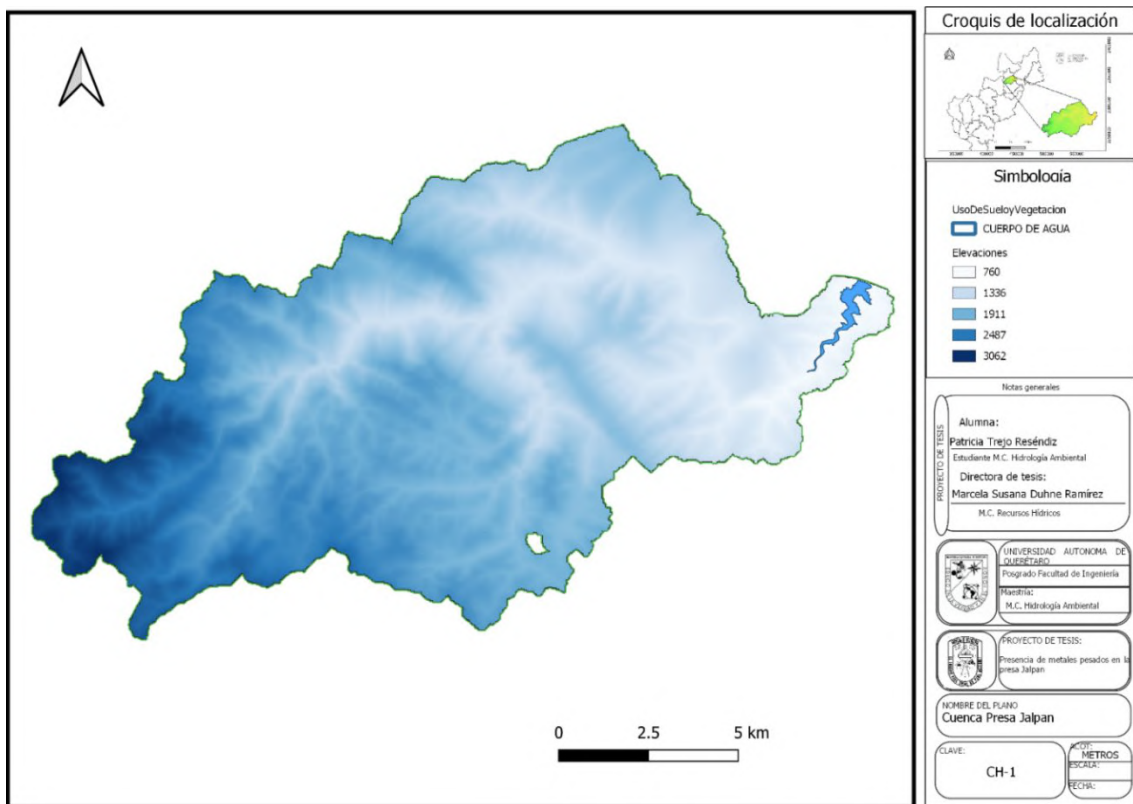


Figura 7. Elevación de la cuenca

### 3.2.7 Geología

La geología de la cuenca está conformada de formaciones rocosas sedimentarias, predominando 50.05 % rocas Lutita-Caliza y un 49.95% de roca caliza en sus variables Caliza-dolomita (6.30%), caliza-Lutita (7.14%) y Caliza-brecha sedimentaria monogénica (36.51%) y menos del 1% de roca intrusiva tipo Granodiorita-Diorita.

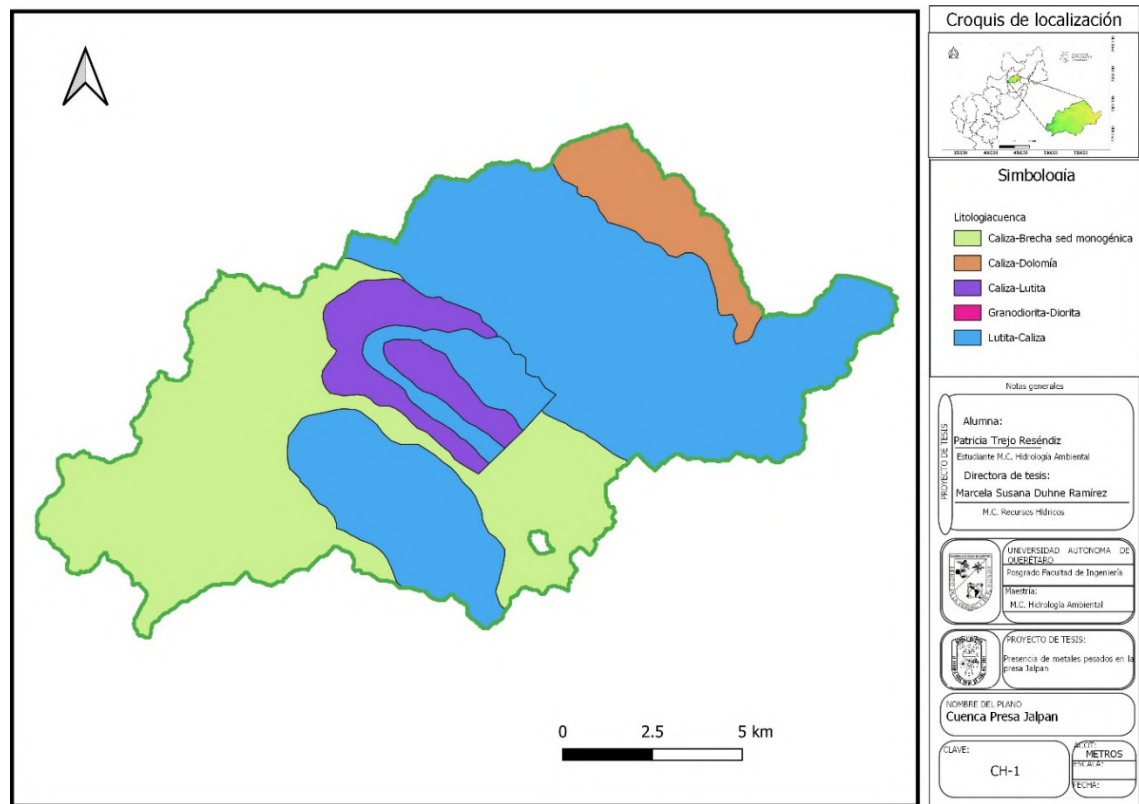


Figura 8. Geología

### 3.2.8 Uso de suelo y vegetación

El constante aumento de la población genera cambios de uso de suelo, por ende, la vegetación se ve afectada o modificada. En la figura 9 se puede observar el uso y vegetación que predomina en el área de la cuenca. Se tiene que el 25.17% del área se emplea para agricultura de temporal, el 13.19% son bosques de encino, el 11.80% corresponde a los bosques de encino pino, el 27.32% es de bosques de pino encino, el 0.12% representa los bosques de pino, el 9.89% es de pastizal inducido, el 11.40 es de selva baja caducifolia, el 0.92% corresponde al área urbana y el 0.19% representa los cuerpos de agua, como se observa, es el área de la presa de Jalpan de Serra.

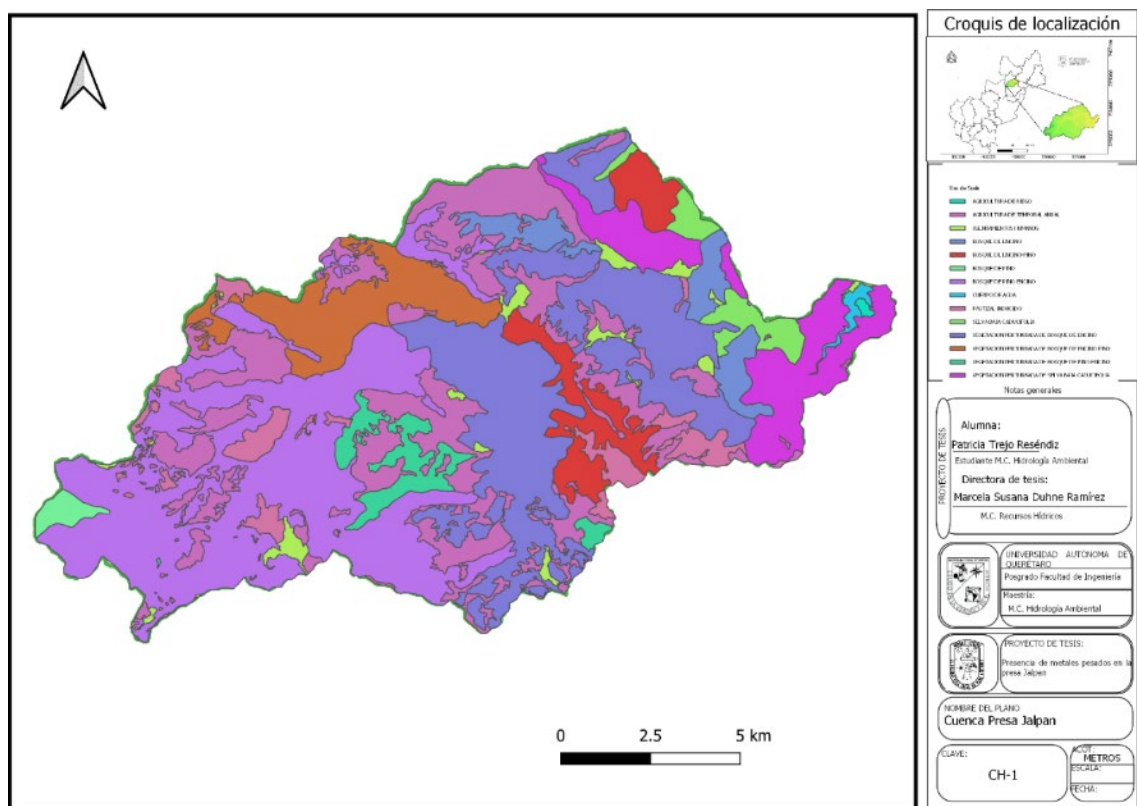


Figura 9. Uso de suelo y vegetación

### 3.2.9 Edafología

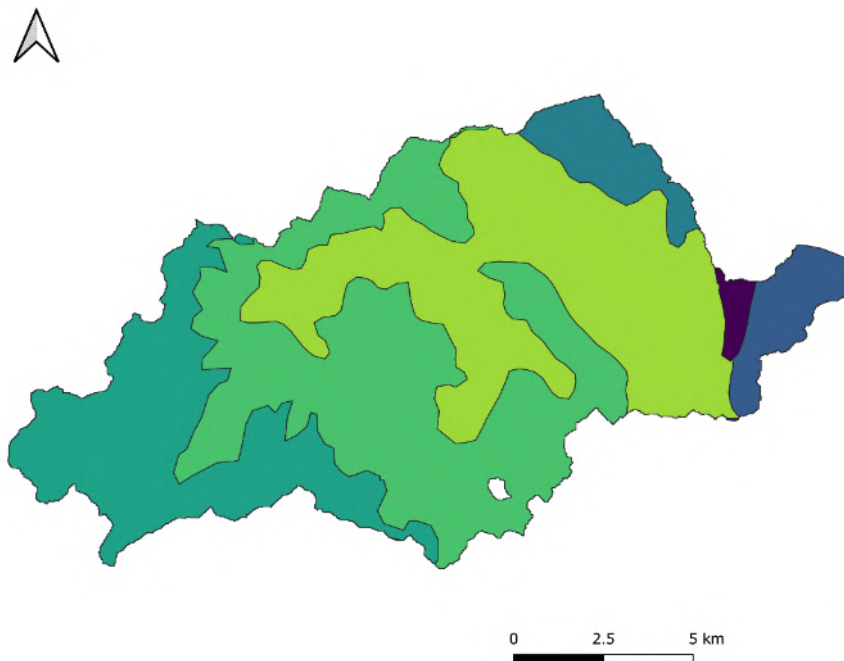
Pertenece a la provincia geológica cinturón plegado de la sierra madre oriental, conformado por el suelo:

- Leptosol ideal para pastar ganado en verano
- Luvisol; suelo arcilloso fértil para agricultura
- Cambisol y regosol suelos Jóvenes con poco desarrollo agrícolas

En la tabla 10 se puede observar el área y porcentaje que corresponde a cada tipo de suelo. En la figura 10 se muestra gráficamente.

Tabla 10. Área por tipo de suelo.

Suelo	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje
Leptosol	57.41	30.62
Regosol	61.06	32.57
Luvisol	67.2	35.85
Cambisol	1.8	0.96



**Croquis de localización**

**Simbología**

Edafología

- CMeKa+LThuca/3r
- LForz+LPcal/3
- LPeul+RGsulep/3R
- LPeul+LPsumo/2
- LPhuz+LVofu+CMofu/3
- LVofu+LVhe+LPeul/3
- RGhulep+LPeu+FLxhu/2

**Notas generales:**

Alumna:  
**Patricia Trejo Reséndiz**  
 Estudiante N.C. Metodología Ambiental

Directora de tesis:  
**Marcela Susana Dunne Ramírez**  
 N.C. Recursos Hídricos

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OAXACA  
 Facultad de Ingeniería  
 Programa de Ingeniería Ambiental  
 N.C. Metodología Ambiental

TÍTULO DE TESIS:  
 Presencia de metales pesados en la cuenca Jalpan

TIPO DE PLAN:  
 Cuenca Presa Jalpan

CUADRO:  
 CH-1

ESCALA:  
 METROS

Figura 10. Edafología de la cuenca

### **3.3 Erosión de la cuenca**

La erosión del suelo es producto de un grupo de procesos que ocasionan el deterioro de suelo, provocando la disminución de la productividad biológica o de su diversidad. Los procesos de degradación que lo originan son las actividades humanas que provocan que el suelo disminuya su capacidad para poder sostener los ecosistemas (CONAFOR, 2015)

La erosión de una cuenca se puede calcular empleando la fórmula de USLE:

$$A = R K L S C P \quad (7)$$

Donde:

R = erosividad (precipitación)

K = erodabilidad (tipo de suelo)

L = longitud de la pendiente (elevaciones)

S = ángulo pendiente (Idem)

C = cobertura/vegetación (Uso de suelo y vegetación)

P = prácticas de conservación

Para fines prácticos el análisis de la erosión se realizó mediante QGis y se obtuvo el siguiente resultado (figura 11):

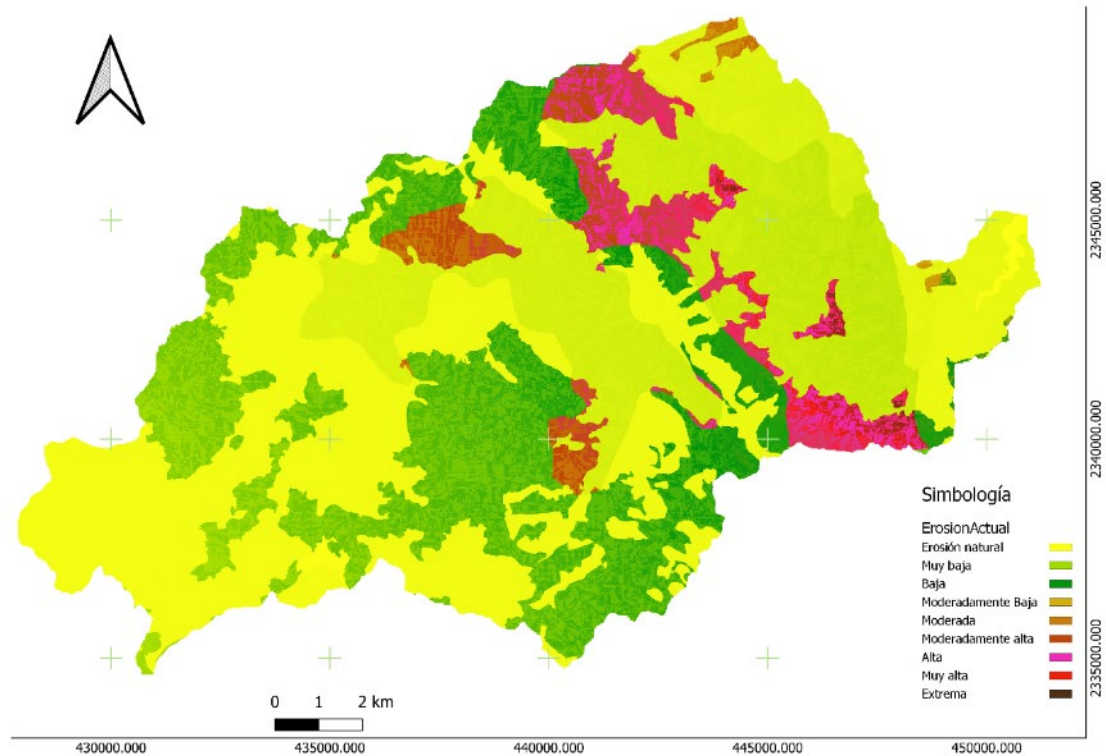


Figura 11. Erosión en la cuenca

Se aprecia la pérdida de suelo de manera natural en las partes más altas de la cuenca principalmente, las zonas más afectadas son aquellas donde se ha realizado un cambio de suelo, como es el caso de la agricultura de temporal y pastizales inducidos (de la figura 9), donde se aprecia erosión desde moderadamente alta hasta extrema.

### 3.4 Cálculo de disponibilidad media anual de agua

La estimación de escurrimiento medio anual de la cuenca se realizó mediante la Norma Oficial Mexicana NOM-O11-CONAGUA-2015 que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Para ello, se requiere de información climatológica como la precipitación, la cual ha sido obtenida de CONAGUA. En la tabla 11 se muestran las estaciones que tiene área de influencia en la cuenca.

Tabla 11. Características de las estaciones climatológicas en el área de estudio.

Estación	Nombre	Coordenadas	Altitud	Área de influencia	Porcentaje
22007	Jalpan de Serra	21.216667°, -99.466667°	760 msnm	60.381	32.21
22064	Pinal de Amoles	21.135278°, -99.6275°	2355 msnm	127.083	67.79

En la figura 12 se pueden ver los polígonos de Thiessen con las áreas de influencia de cada estación, predominando la estación de Pinal de Amoles con un 67.8%

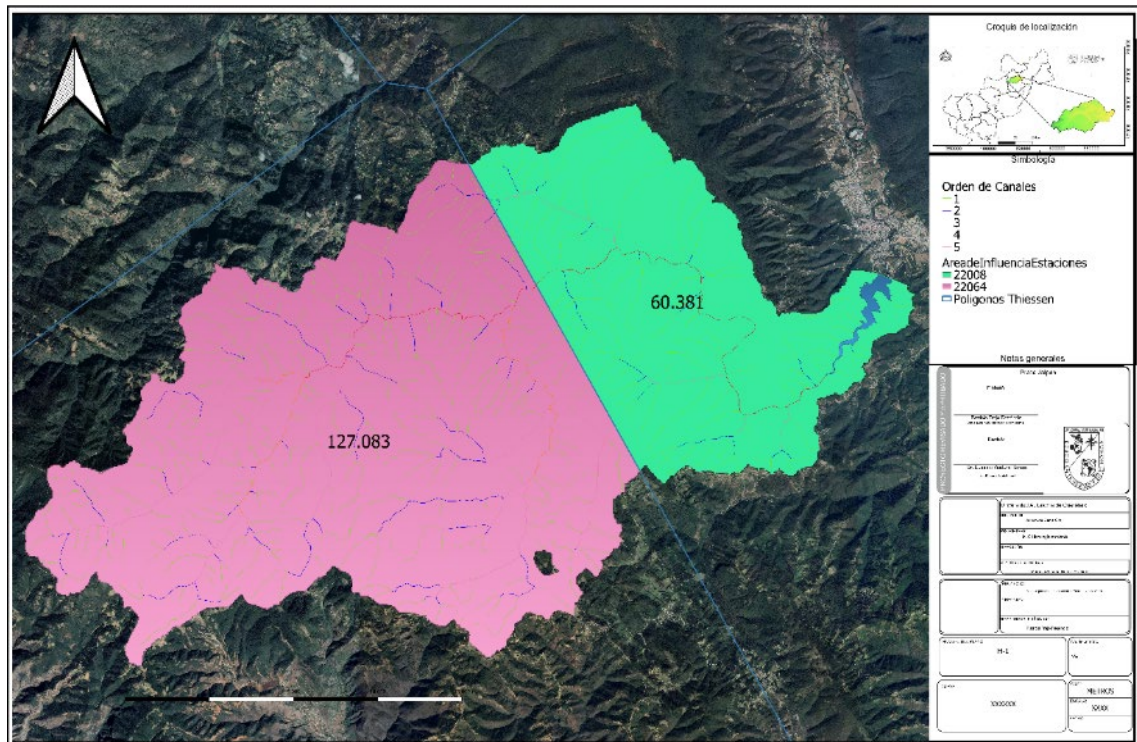


Figura 12. Polígonos de Thiessen

Con información Estadística Climatológica de CONAGUA se tienen los datos de precipitación correspondiente a los años 2001 al 2015 (tabla 12).

*Tabla 12. Precipitación media anual de las estaciones 22064 y 22007*

Año	Estaciones	
	Pinal	Jalpan
2001	252.50	443.00
2002	592.00	438.00
2003	401.00	437.00
2004	641.60	788.00
2005	793.00	433.00
2006	352.20	438.00
2007	856.00	100.00
2008	472.00	802.00
2009	287.70	439.00
2010	369.00	424.00
2011	500.90	412.00
2012	167.80	427.00
2015	280.60	437.00
Prom=	458.95	462.92

Nota: datos correspondientes a los años 2001-2015

Se determinó el porcentaje de cada una de las áreas de influencia en la zona de estudio y el aporte de la precipitación total anual de cada una de las estaciones a partir del análisis de los polígonos de Thiessen. En la tabla 13 se observa la precipitación anual para cada estación y posteriormente se realizó la suma para obtener la precipitación anual de la cuenca. Teniendo 460.22 mm de precipitación anual donde el área de Pinal de amoles aporta 311.12 mm y Jalpan de Serra 149.1 mm.

Tabla 13. Precipitación anual respecto al área de influencia de estaciones climatológicas

Año	Estaciones		Precipitación anual en la cuenca (P)
	Pinal (67.8%)	Jalpan (32.21%)	
2001	171.17	142.69	313.86
2002	401.32	141.08	542.39
2003	271.84	140.75	412.59
2004	434.94	253.81	688.75
2005	537.58	139.47	677.04
2006	238.76	141.08	379.83
2007	580.28	32.21	612.49
2008	319.97	258.32	578.29
2009	195.03	141.4	336.43
2010	250.15	136.57	386.71
2011	339.56	132.7	472.26
2012	113.75	137.53	251.29
2015	190.22	140.75	330.97
<i>PROM=</i>	<i>311.12</i>	<i>149.1</i>	<i>460.22</i>

Se determinó el volumen anual de escurrimiento natural, con el coeficiente de escurrimiento ponderado ( $K=0.30$ ), y precipitación anual total de las estaciones. El valor del escurrimiento anual natural de la cuenca es de 11.90 millones de metros cúbicos (Tabla 14).

Tabla 14. Volumen medio anual de escurrimiento natural de la cuenca

Año	P(mm)	Pm3	Ce anual	Volumen anual de escurrimiento natural (Mm3)
2001	313.86	0.31	0.11	6.45
2002	542.39	0.54	0.14	14.63
2003	412.59	0.41	0.12	9.62
2004	688.75	0.69	0.17	21.41
2005	677.04	0.68	0.16	20.82
2006	379.83	0.38	0.12	8.51
2007	612.49	0.61	0.15	17.73
2008	578.29	0.58	0.15	16.18
2009	336.43	0.34	0.11	7.12
2010	386.71	0.39	0.12	8.74
2011	472.26	0.47	0.13	11.80
2012	251.29	0.25	0.10	4.72
2015	330.97	0.33	0.11	6.96
Prom=	460.22	0.46	0.13	11.90

Se utilizó la fórmula de Ce para un k>0.15

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5} \quad (8)$$

Por lo tanto, el volumen de escurrimiento medio anual es de 11.90 Mm3. Esto indica que en temporada de lluvias la cuenca puede suministrar la suficiente agua para llenar la presa Jalpan y permitir que el agua siga su curso aguas debajo.

### 3.5. Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua superficial entra al suelo permitiendo la recarga a los mantos acuíferos, para generar una buena filtración se requiere de una sana cobertura vegetal y un suelo que permita la permeabilidad. En la figura 13 se puede observar la infiltración de la cuenca.

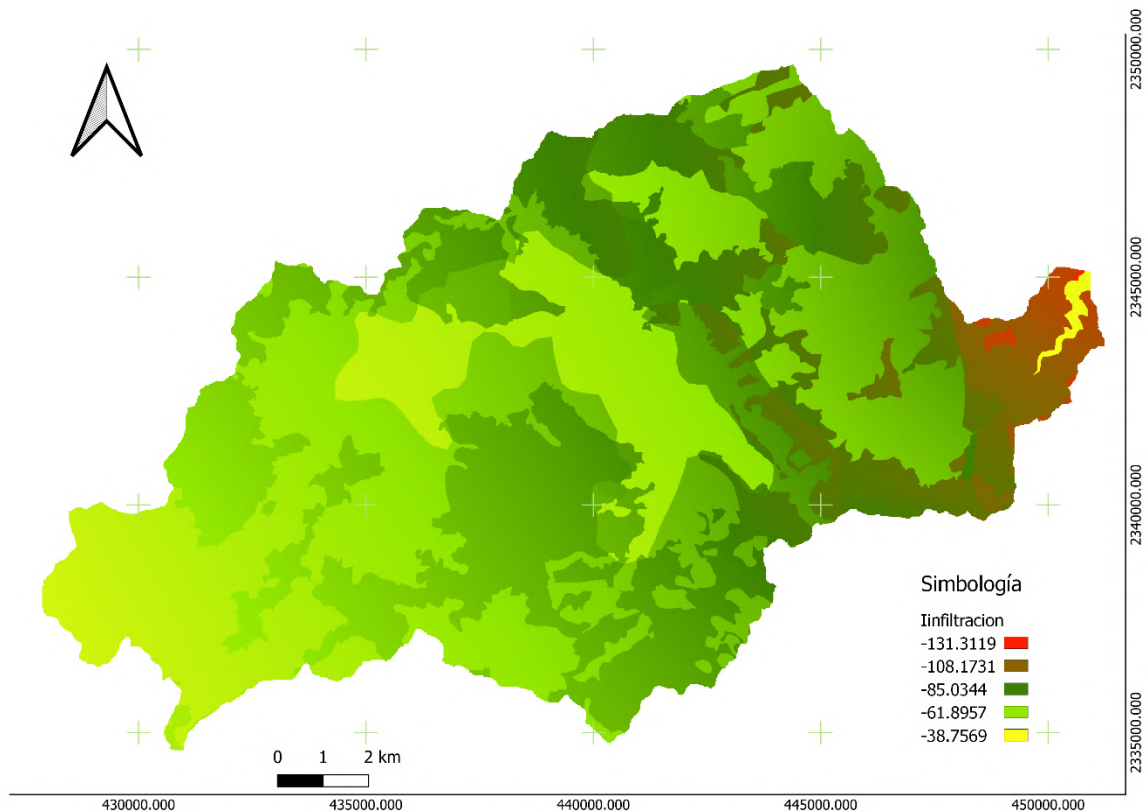


Figura 13. Infiltración en la cuenca

Como se puede apreciar, la parte alta de la cuenca es la que proporciona mayor infiltración, recordando en la figura 9; uso de suelo y vegetación, se observa que estas áreas corresponden a bosques de pino y encino, al tener una buena cobertura vegetal permite una mejor infiltración, en la parte baja de la cuenca, en la figura 10 de tipos de suelos, además de ser selva baja caducifolia, indica la presencia de suelos tipo Leptosol, lo cual sugiere que la roca madre está muy cerca de la superficie, por ende, la infiltración suele ser menor.

### 3.6 Minería

También se realizó un análisis de las minas que se encuentran dentro de la cuenca con el objetivo de observar si estas pudieron tener un aporte de sedimentos en cuanto a metales pesados que representen un riesgo para la salud humana. Encontrando lo siguiente: 44 minas registradas dentro de la cuenca, que representan 2,507.43 ha concesionadas para dicha actividad, con un potencial minero de 3,540,559.00 toneladas de material del cual se puede extraer Au, Pb, Zn, Sb, Ag, Cu y Mn. en la figura 14 se observa que las minas están en el municipio de Pinal de Amoles en la parte alta de la cuenca.

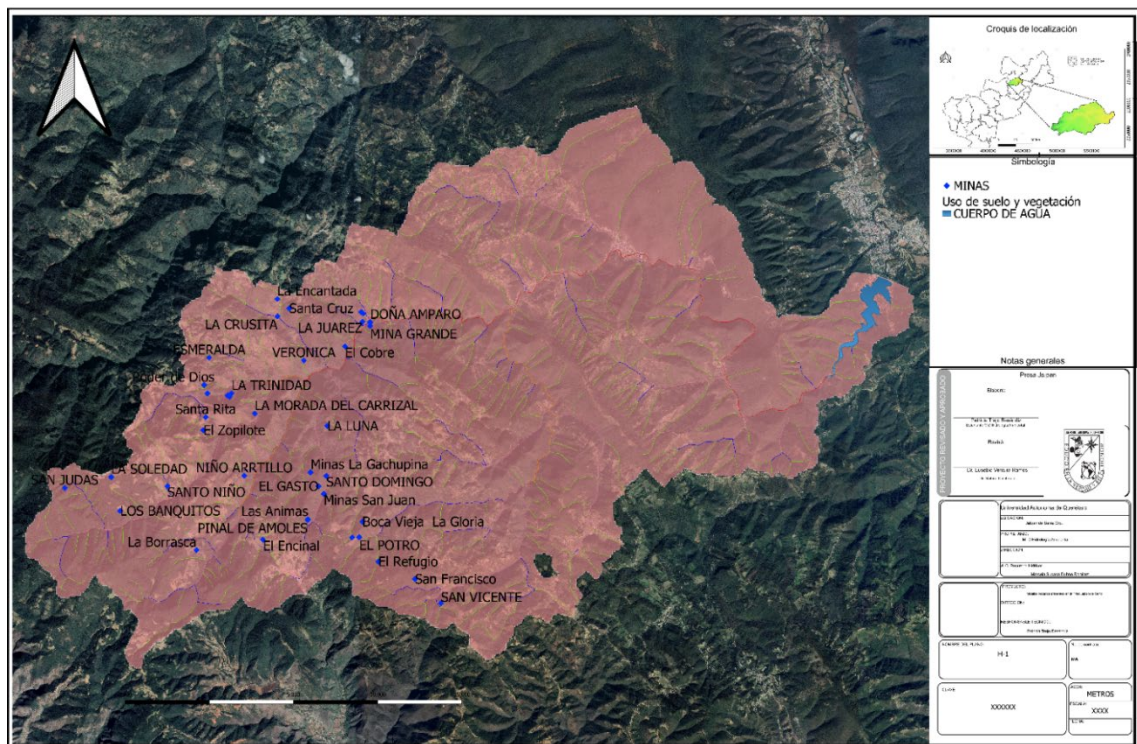


Figura 14. Concesiones mineras dentro de la cuenca

### 3.7 Obtención de muestras

La obtención de las muestras fue realizada con base en la bibliografía consultada, la cual sugiere tres puntos localizados dentro del embalse P1, P2 y P3, distribuidos de forma equidistante desde el punto de entrada al punto de salida del embalse, de tal manera que el punto uno de las muestras es al inicio del embalse, el punto dos corresponde al punto medio y el punto tres fue a la salida del embalse, justo antes de la cortina. También se contempló un blanco de referencia el cual se extrajo fuera del embalse, a cinco metros de distancia de la vialidad de terracería. La figura 15 corresponde a las ubicaciones de extracción de muestras.

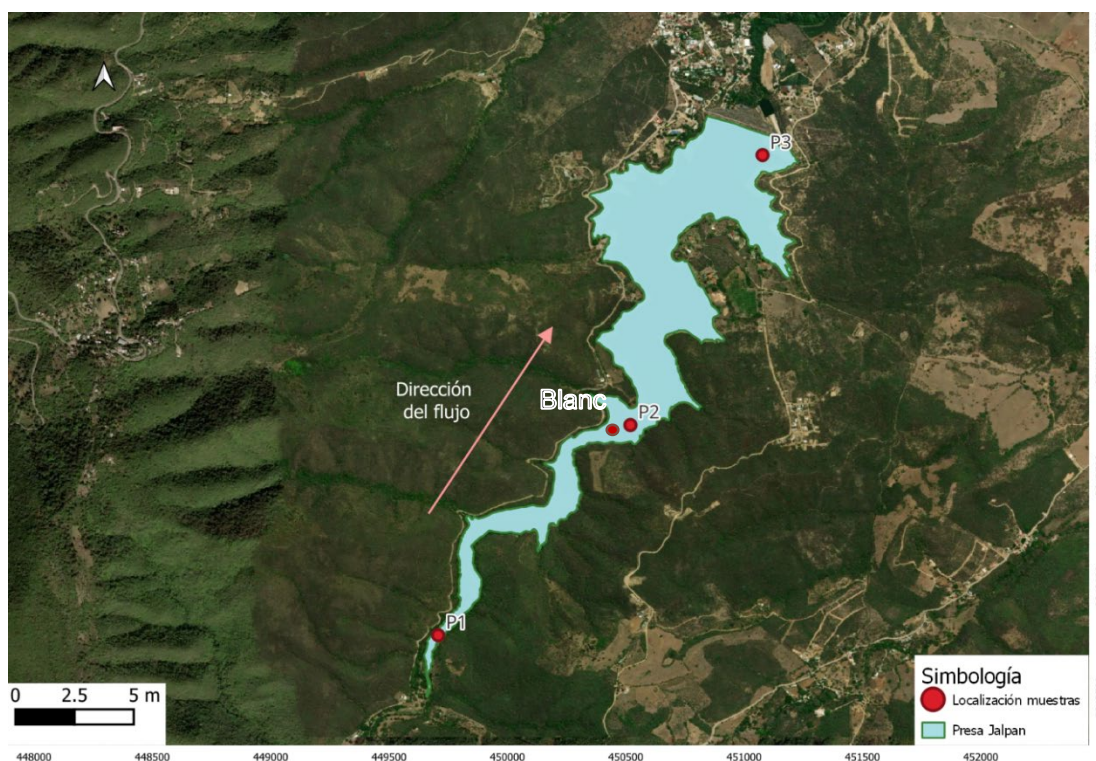


Figura 15. Ubicación espacial de los puntos analizados

Se establecieron dos etapas para la extracción de muestras; la primera etapa se realizó con el objetivo de explorar la zona y conocer la presencia de metales pesados, obteniendo solo tres muestras con un peso promedio de 500 g, una de cada punto. En la segunda etapa; una vez conocida la presencia de metales, se

obtuvieron cinco muestras de cada uno de los tres puntos establecidos, un total de 15 muestras de 2kg cada una.

La profundidad de las muestras en cada etapa fue bajo la normativa NOM-021-RECNAT-2000 la cual establece, entre otros, el estudio, muestreo y análisis de suelos. También con ayuda de Google Earth se obtuvo el perfil de elevación de dentro del embalse, por medio del trazo de una ruta sobre lo que parecía ser la trayectoria del cauce principal, pasando por los puntos donde se extrajeron las muestras.

En la figura 16 se observan picos de elevaciones irregulares en el embalse, que sugieren que ha sufrido de azolvamiento desde el punto de entrada del cauce hasta el nivel del espejo de agua, que es hasta donde permitió analizar el perfil.

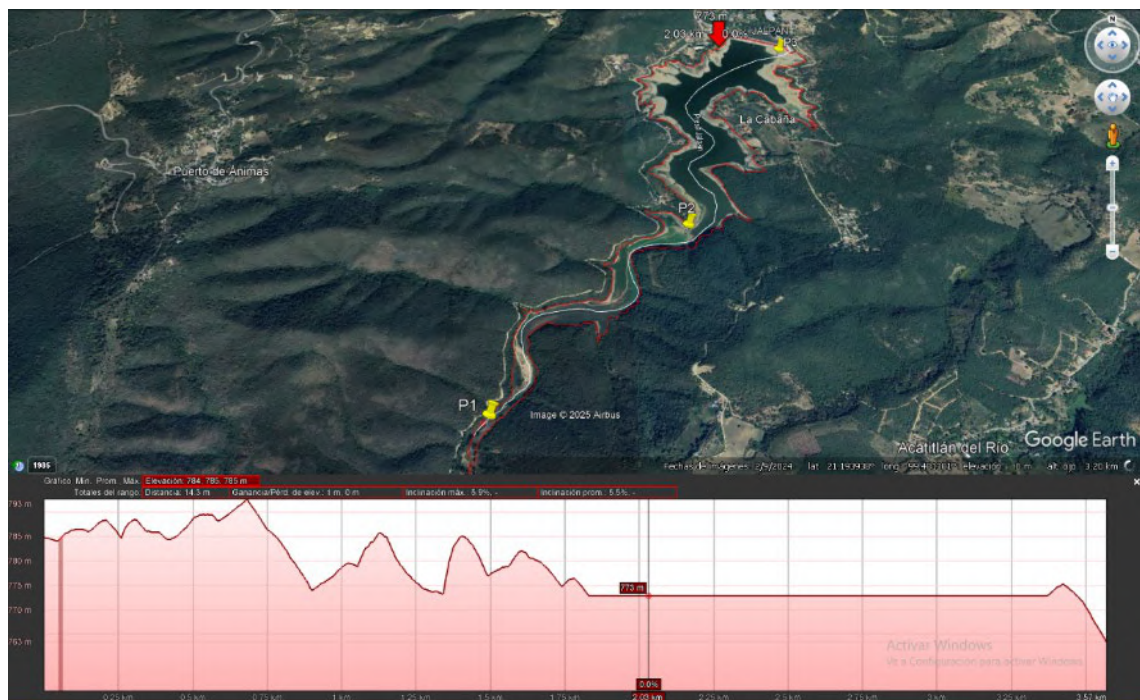


Figura 16. Perfil de elevaciones de los sitios analizados

A continuación, se describe de manera más específica en que consistió cada etapa:

### ***Etapa uno:***

De los tres sitios P1, P2 y P3 para la obtención de muestras se extrajeron 10 cm de la capa superficial de sedimento, por medio de un tubo de CPV de dimensiones de 1.5 pulgadas de diámetro y un metro de largo, el tubo fue graduado indicando 10 cm del extremo inferior e insertado en forma vertical en el sedimento, una vez obtenida la profundidad deseada se extrajo la muestra con mucho cuidado para no afectarla o perderla.



***Descripción:*** entrada del flujo de agua a la presa, presencia de vegetación abundante a ras de suelo, sedimento saturado y agua fluyendo en el cauce, coordenadas: 21.185847, -99.484549, a 786 msnm.

*Figura 17. Sitio número uno de muestreo.*

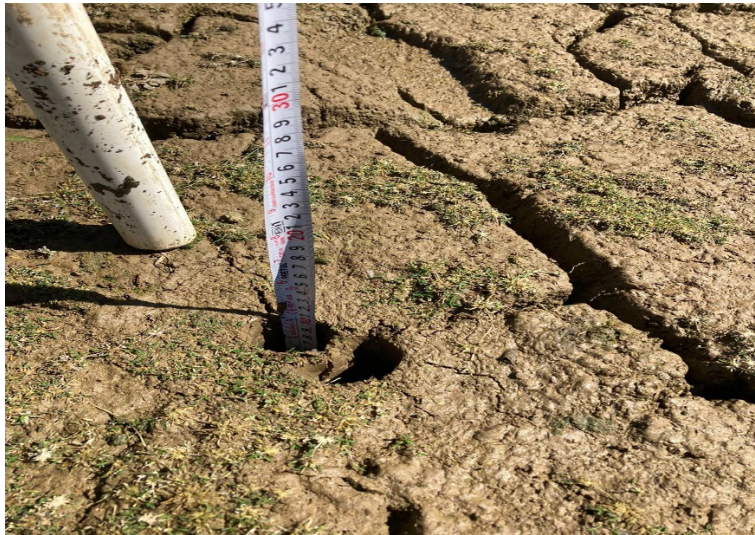


Figura 18. Sitio número dos de muestreo.

Descripción: parte media de la presa, escasa vegetación, sedimento fino y saturado, presencia de grietas en sedimento, se observó poca presencia de materia orgánica. Coordenadas: 21.195539, -99.475791, a 781 msnm.



Figura 19. Sitio número tres de muestreo.

Descripción: A la salida del flujo de agua cerca de la cortina, vegetación escasa, sedimento fino y saturado, sedimento agrietado y formación de prismas. Coordenadas: 21.205375, -99.471275. A 773 msnm.

### **Etapa dos**

La segunda etapa consistió en obtener cinco muestras de aproximadamente 2 kg, en los puntos P1, P2 y P3, Se realizó por estratos a cada 30 cm de profundidad hasta llegar a 150 cm, las muestras se extrajeron con un barreno muestreador para suelos de acero inoxidable FERTILAB, como se muestra en la figura 20, el

mecanismo de funcionamiento es a base de giros en la manija causando la perforación en el sedimento que a su vez es retenido en el núcleo muestreador. Al igual que el tubo de CPVC, se graduó el barreno para garantizar la profundidad deseada.



Descripción. Barreno muestreador para suelo de acero inoxidable, con dos núcleos para suelo fino y granular. Marca FERTILAB.

*Figura 20. Barreno muestreador para suelo*

En el estrato de 0-60 cm de profundidad la extracción de las muestras se hizo con facilidad, sin embargo, a mayor profundidad se requirió cavar alrededor del punto analizado permitiendo así mayor alcance de las muestras. En la Figura 21 y Figura 22 se contextualiza mejor lo explicado.



Extracción de material a una profundidad menor de 60 cm.

*Figura 21. Extracción de material*



Extracción de material a una profundidad mayor de 60 cm.

*Figura 22. Extracción de material profundo*

Debido a la diversidad de sedimento y para garantizar la retención de la muestra se optó por cambiar los núcleos; en el caso de partículas arenosas se empleó el núcleo cerrado, y en sedimento fino y saturado se usó el núcleo abierto.

En el caso de las submuestras del punto uno se realizó en un pozo a cielo abierto existente producto del intento de desazolve del embalse, con ayuda de una pala jardinera se desprendió verticalmente y en un solo movimiento para cada estrato.



*Figura 23. Extracción de muestras en pozo a cielo abierto*

### 3.8 Manejo y conservación de las muestras

La recolecta de las muestras se hizo de cada una de las capas estratificadas, guardadas en bolsas plásticas y selladas, con su respectiva etiqueta de datos indicando su procedencia, profundidad, numero de muestra, coordenadas, punto muestreado y una breve descripción de las características *in situ*. Posteriormente se almacenaron en hielera a 4°C para su traslado, evitando humedad exterior, luz o calor y otros factores que alteraran su composición.



Figura 24. Etiquetado y resguardo de muestras para su traslado

En este proceso se realizó con base en lo que establece la norma NOM-021-RECNAT-2000

### **3.9 Análisis de sedimentos**

Después de la recolección y traslado las muestras se procesaron de manera inmediata, puesto que no se deben dejar pasar más de 28 días desde su recolección. Fue necesario llevar a cabo una serie de pasos para determinar la concentración de los metales pesados. Por ello, se decidió que el mejor método a adoptar para la realización de esta investigación sería la determinación de metales totales por digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos EPA 3050B.

#### **3.9.1 Secado de muestras**

De la muestra total, por el método del cuarteo, se extrajo la cantidad de 300 g. Iniciando el análisis de las muestras con el secado al horno, sin exceder los 35°C como lo indica la norma NOM-021-RECNAT-2000, el proceso consistió en poner la muestra de sedimento en un recipiente de vidrio o porcelana sin sobrepasar los 2.5 cm de espesor de la capa de sedimento, pesar el contenido, ingresar la muestra al horno, dejar 24 horas y pesar nuevamente, registrar el dato, posteriormente pesar de manera periódica hasta que la medición sea constante, siendo este el indicador de la ausencia de humedad. En todo momento se mantuvieron las muestras identificadas.



*Figura 25. Secado de muestras en horno.*

Debido a que algunas muestras estaban saturadas al momento de su extracción, al secarse, se formaron grumos o terrones, por tanto, se requirió de un mazo de goma para disgregar las partículas

La homogenización se realizó colocando la muestra nuevamente en una bolsa, girándola en todas direcciones y extrayendo 20 g de sedimento.

La muestra una vez homogenizada se procesó a través del tamiz n. 230, recolectando el material que pasa las aberturas, se etiquetó y resguardo para la digestión. Instructivo M-S-LC-I077 de IDEAM

### ***3.9.2 Digestión de muestras***

Se decidió que el mejor método a optar para la realización de esta investigación sería la metodología EPA 3050B para la digestión de las muestras, este proceso se utiliza en los laboratorios de calidad ambiental aplicado en sedimentos, lodos y suelos, sirve para obtener la concentración de metales como el arsénico, plomo, cromo, cadmio, níquel, cobre, hierro, aluminio, manganeso y zinc.

El método es a base de digestión ácida de las muestras, por tanto, es importante contar con las medidas de seguridad como lo son: bata, zapatos antiderrapantes, lentes de seguridad, mascara o cubrebocas con filtro para vapores ácidos y guantes de nitrilo.

Los equipos, materiales y reactivos empleados fueron:

Equipos:

- Extractor
- Fuente de calor, que permita temperaturas de 90-95°C
- Cabina de extracción para vapores
- Balanza analítica de cuatro cifras decimales.

## Materiales

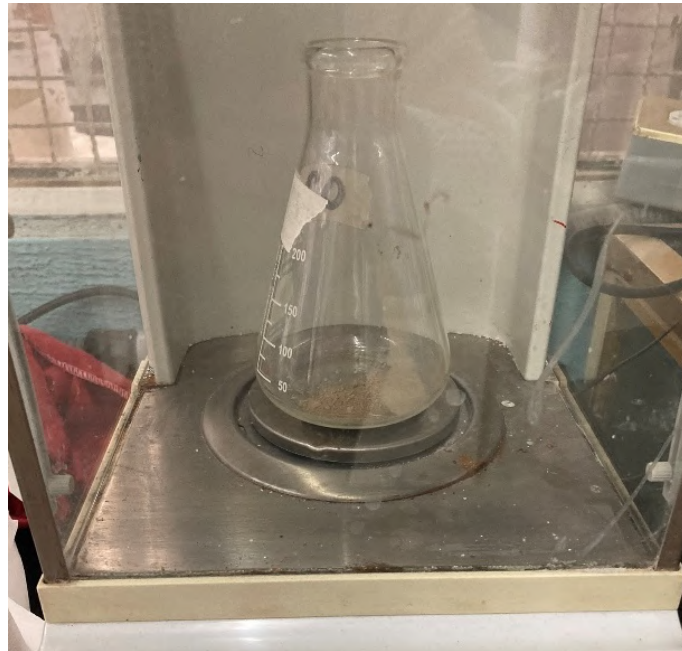
- Espátula Metálica
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml
- Pipetas aforadas de 5, 10 y 25 ml
- Pera de succión
- Papel Filtro N°41 de 11 cm de diámetro
- Embudos de filtración
- Toallas de papel
- Vidrio de reloj

## Reactivos:

- Agua destilada
- Ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  al 60%
- Ácido clorhídrico  $\text{HCL}$  al 30%
- Peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%

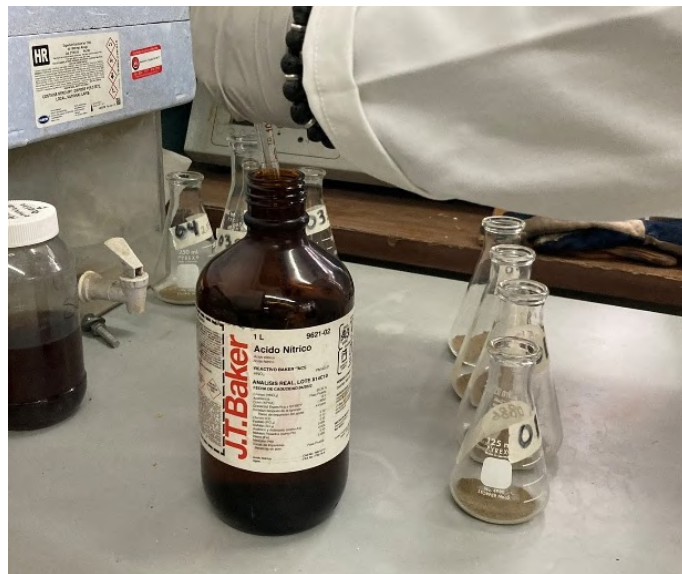
Para descartar la posibilidad de uso de material contaminado, antes de iniciar con la digestión, se realizó la limpieza de vidriería y material de plástico según el instructivo M-S-LC-I015 de lavado de material sin ácido, el cual consistió en el uso de jabón libre de fosfato al 5%, tallado y enjuagado con agua destilada, posteriormente se dejó escurrir en gradillas hasta secar.

1. Atendiendo a la metodología, de la muestra que se secó en el horno se procedió a tamizar por la malla N°230 utilizando solo el material que paso las aberturas, posteriormente en un matraz Erlenmeyer se pesó  $2.0 \pm 0.01$  g se identificó con la etiqueta correspondiente y este proceso se aplicó para cada una de las muestras obtenidas.



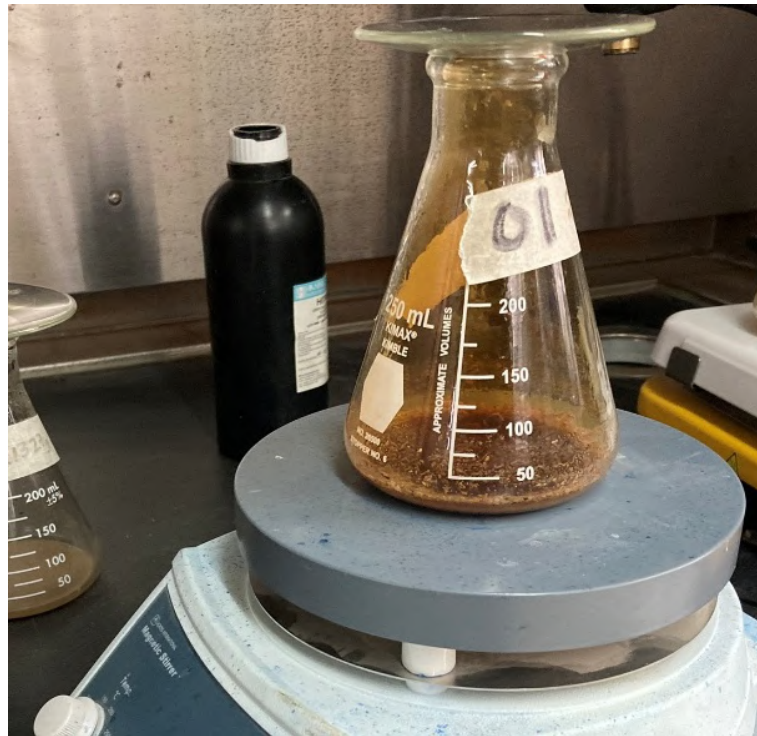
*Figura 26. Pesado de la muestra*

2. Al matraz Erlenmeyer con la muestra se adicionó 10 ml de ácido nítrico 1:1 e inmediatamente se tapó con un vidrio de reloj para recuperar vapores, se llevó a fuente de calor a temperatura de 90-95°C por 15 minutos evitando la ebullición.



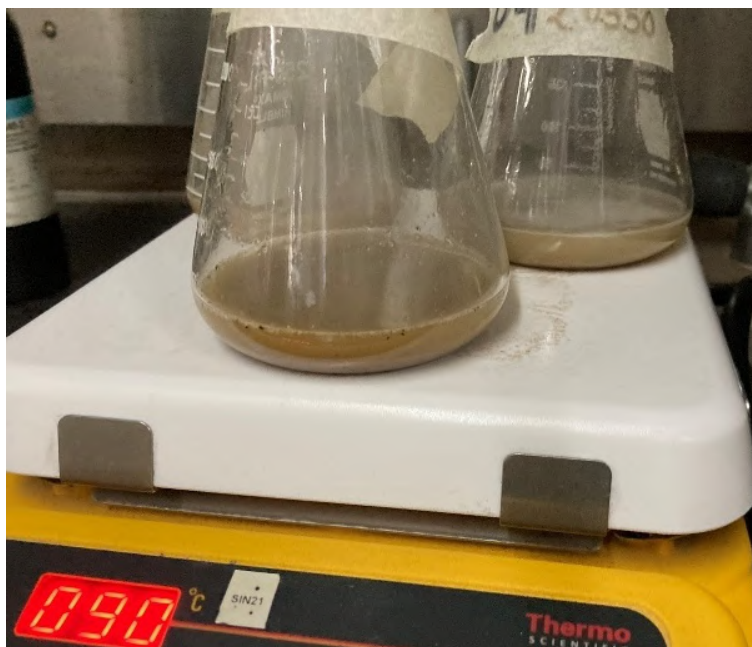
*Figura 27. Adición de ácido nítrico*

3. Transcurridos los 15 minutos, se retiró del calor, dejando enfriar, una vez frio, se adicionaron 5 ml de ácido nítrico concentrado, se cubrió con vidrio de reloj y se regresó a calor durante 30 minutos. Este paso se repitió hasta que la muestra ya no desprendía gas color café asegurando oxidación completa.



*Figura 28. Adición de ácido nítrico concentrado*

4. Posterior a la completa oxidación, la muestra se dejó en evaporación por dos horas a temperatura 90-95 °C. Se dejó enfriar.
5. Se adicionó 2 ml de agua destilada y 3 ml de peróxido de hidrógeno al 30 %, se cubrió con el vidrio de reloj y se dejó en la fuente de calor hasta observar la disminución de efervescencia. Se mantuvo fuera de calor para enfriar.



*Figura 29. Adición de peróxido de hidrógeno*

6. Se continuó agregando 1 ml de peróxido de hidrógeno a las muestras mientras seguía en calentamiento, hasta que se ya no se observó efervescencia o fue mínima, no se agregó más de 10 ml tal cual lo indica el instructivo de digestión.
7. Posteriormente, se evaporó 5 ml de las muestras a temperatura 90-95 °C durante dos horas cuidando de no llegar a la ebullición.
8. Se dejó enfriar la muestra, y se agregó 10 ml de ácido clorhídrico concentrado, se cubrió con el vidrio de reloj y se mantuvo en calentamiento 90-95°C durante 15 minutos.
9. Finalmente, la muestra ya fría, se diluyó con agua ultra pura aforando a 100 ml, se reservó para que se asentaran las partículas, fue filtrada con el papel filtro, y nuevamente aforada a 100 ml con agua ultra pura y transferida a frascos de vidrio para su posterior lectura y análisis en el espectrofotómetro de absorción atómica.



*Figura 30. Filtrado de muestras*

La lectura de las concentraciones de los metales arsénico, plomo y cadmio se realizaron en el laboratorio de calidad de agua y suelos LABCAS de la facultad de Ciencias Naturales empleando el Espectrofotómetro de Absorción Atómica iCE 3000. Marca Thermo Scientific, con Horno de Grafito y Generador de Hidruros VP100. El equipo debe ser calibrado antes de ingresar la muestra, posteriormente arroja los resultados de manera directa, estos resultados numéricos se sustentan en la formula:

$$\frac{mg}{kg} = \frac{\text{Concentración del extracto } \left(\frac{mg}{L}\right) * \text{volumen extracto}(0.01 L)}{\text{peso de la muestra (kg)}} \quad (9)$$



*Figura 31. Espectrofotómetro de Absorción Atómica*

### **3.10 Granulometría método de mallas**

El proceso implicado en la obtención del tamaño de partículas fue por el método de granulometría por mallas de la Normativa SCT, M-MMP-1-06-2003, el material pasó en una serie de mallas acomodadas de mayor a menor abertura, de esta manera se obtuvo el material retenido en cada malla y se calculó el porcentaje en relación a la masa total de la muestra.

#### **Material**

- Mallas 3/8", n.4, n.10, n.20, n.40, n.60, n.100, n.200 y un fondo para retener el material que pase el tamiz n.200.
- Balanza granataria
- Bolsas de plástico de 1-2 kg de capacidad.
- Brocha
- Cucharón de 250 g
- Etiquetas y marcador impermeable.

1. De la muestra inicial obtenida en campo, se realizó el secado al aire libre en charolas de metal, se obtuvo el peso del recipiente, el peso del recipiente más el peso del material (muestra) y el peso al final del secado.



*Figura 32. Secado de muestra al aire libre*

2. Con la muestra seca se procedió a desintegrar los terrones mediante un mazo de goma.
3. En un recipiente limpio se pesó la muestra descontando el peso del recipiente, y se registró el dato (muestra total)
4. Se ordenaron las mallas de mayor a menor abertura, colocando una sobre otra y al final de la malla n.200 el fondo para retener el material que pasó esa malla.
5. Las mallas se colocaron en el agitador de tamices y se agregó la muestra en el tamiz superior. Se dejó trabajar durante 10 minutos, posteriormente se apagó el equipo y se retiraron los tamices.



Figura 33. Mallas en el agitador de tamices

6. Con cuidado se separaron cada uno de los tamices, guardando el retenido en una bolsa plástica y se etiqueto.
7. Se peso el retenido de cada malla y se resguardo.



8. Figura 34. Resguardo y etiquetado de muestras tamizadas

9. Se obtuvo el porcentaje de material retenido en cada malla, con la fórmula:

$$\% = \frac{\text{peso del material retenido en el tamiz}}{\text{peso total de la muestra}} \times 100 \quad (10)$$

10. El procedimiento se repitió para cada una de las muestras.

### **3.11 Clasificación del sedimento**

Para la clasificación del sedimento se empleó la norma ASTM D2487 en la que establece cuatro categorías para conocer la naturaleza del suelo:

- Suelos de grano grueso: tipo grava y arena con menos del 50% del contenido de la muestra que pasa la malla n.200 y se emplearon los símbolos de G (gravel) y S (sand) para grava y arena o suelo arenoso respectivamente.
- Suelos de grano fino: en esta clasificación se ubican las muestras que contienen el 50 % o más de material que pasa la malla n. 200 la denotación es mediante la letra M para el limo orgánico y C para arcilla orgánica.
- Suelos orgánicos: es para limos y arcillas con contenido de materia orgánica, se denomina con el prefijo O (organic).
- Turbas: se emplea el símbolo Pt (peat) en lodos y suelos orgánicos.

### **3.12 Granulometría vía hidrómetro**

El método de granulometría vía hidrómetro se empleó para determinar el porcentaje de arcilla en las muestras, aplica para tamaños de partículas que pasaron la malla n.200 hasta 0.001 mm. Se siguió el procedimiento establecido por Bowles J. N.

Material

- Hidrómetro (ASTM 152 H)
- Hexametáfosfato de sodio
- probetas de 1000 ml
- 1 probeta de 500 ml

- Espátula
  - Cronometro
  - Báscula de precisión de 0.01 g
  - Termómetro precisión de 0.5 °C
  - 2 flaneras o taras
  - Vernier
  - Agua destilada
1. Se inició con la preparación del defloculante (Hexametáfosfato de sodio), en proporción de 5 g de defloculante y 125 ml de agua destilada. Del material obtenido en la granulometría por mallas, se utilizó el material que pasó la malla n.200. en una flanera se colocaron 50 g y se llevó a saturación por 24 horas en el agua con defloculante.



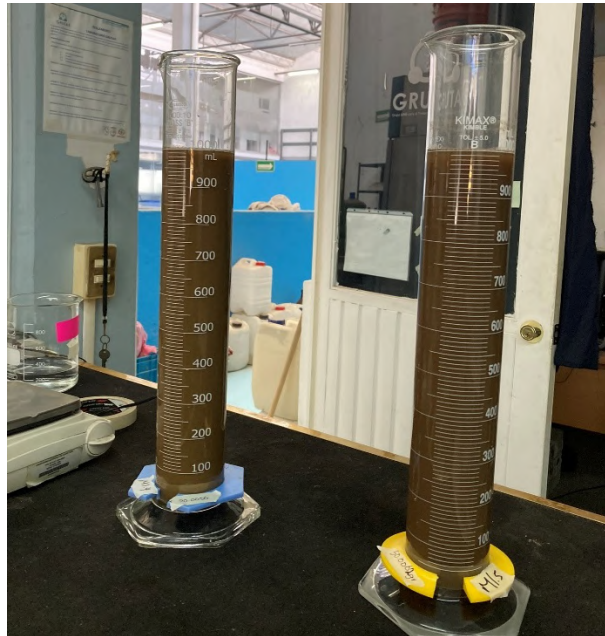
*Figura 35. Muestra en saturación*

2. Se realizó la calibración del hidrómetro, se mide la distancia que hay de la marca del vástago en el hidrómetro del 60 al 0 con ayuda del vernier L<sub>1</sub>, también se midió del extremo inferior al 60 L<sub>2</sub>. Después se midió la sección transversal de la probeta de 1000 ml con el vernier, de la graduación de 900 a 1000 esta es la variable A, posteriormente el hidrómetro se introdujo en la

probeta aforada a 400 ml con agua destilada y se tomó la lectura del desplazamiento del agua producto del volumen del hidrómetro  $V_b$  y se empleó la fórmula 11 para obtener la profundidad efectiva (la superficie del agua al centro del bulbo). Para el registro de los datos se empleó la tabla del anexo 1.

$$3. L = L_1 + \frac{1}{2} \left[ L_2 - \frac{V_b}{A} \right] \quad (11)$$

4. También se realizó la corrección por menisco, alrededor del vástago se forma un menisco, por tanto, hace imposible leer a nivel libre del líquido, adicional cuando el sedimento ya está en la probeta el agua se oscurece, por ello, es importante realizar esta corrección. El hidrómetro se sumergió en el agua destilada de la probeta y se tomó la medida en la parte inferior del menisco y la otra en la parte superior, la diferencia de estas dos medidas fue la corrección  $C_m$ .
5. Debido a que se agregó defloculante, por lo tanto, aumentó la densidad, se requirió de otra corrección, conocida como corrección del cero  $C_d$ . para obtener este valor se sumergió el hidrómetro en agua destilada y se tomó la lectura de la marca del cero del vástago en la graduación de la probeta. Se extrajo el hidrómetro y se le añadió el defloculante preparado de 5 g en proporción a 125 ml de agua destilada, y se agitó tapando el extremo de la probeta con la mano por un minuto, se volvió a introducir el hidrómetro y se realizó la lectura nuevamente. La diferencia de las dos lecturas es la corrección, este valor es negativo.
6. Realizadas las correcciones correspondientes, se procedió a realizar las pruebas. La mezcla sedimento-defloculante se vertió en la probeta y con agua destilada hasta aforar a 1000 ml.



*Figura 36. Mezcla sedimento-defloculante en probeta aforada a 1000 ml*

7. Se cubrió el extremo de la probeta con la palma de la mano y se agitó vigorosamente, se colocó la probeta en una superficie a nivel (mesa) y se introdujo el hidrómetro e inmediatamente se midió el tiempo con el cronometro, se registraron (Tabla anexo 2) las lecturas del nivel del vástago a los 20, 40, 60, 120 y 180 segundos, este paso se repitió tres veces, en la última repetición se dejó la probeta en un lugar seguro, donde no obstruía otros trabajos.



*Figura 37. Lecturas del hidrómetro y termómetro*

8. Las lecturas se realizaron del hidrómetro y también de la temperatura se realizaron en los tiempos 4,8,15 y 30 minutos, posteriormente se alargó a 1,2,4,8,24 y 48 horas y se registraron los datos en el la tabla del anexo 3. Para cada lectura se extrajo el hidrómetro y se introdujo en otra probeta con agua para resguardar el hidrómetro.

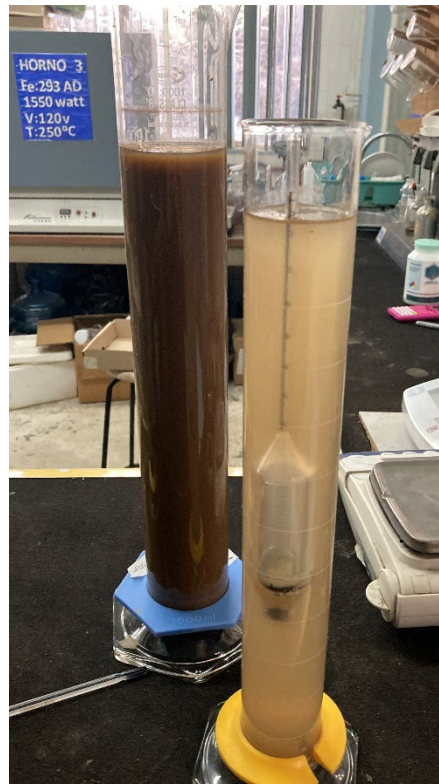


Figura 38. Resguardo del hidrómetro durante las lecturas

El tamaño de partículas se obtuvo por usando la fórmula de Bowles

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (12)$$

Donde:

D= diámetro de partícula (mm)

L= Profundidad efectiva de caída (cm)

t= tiempo (min)

K= constante de pesos unitarios y temperatura (Tabla 5).

### 3.13 Obtención de materia orgánica

El método comúnmente utilizado para la obtención de la materia orgánica es por medio de la ignición, para este estudio se empleó el proceso MTC E 118-2000 basado en la norma AASTHO T 267. Este método aplica para turbas, lodos

orgánicos y suelos con material vegetal presente como madera, raíces, pasto, lignito, carbón entre otros (MTC, 2000).

Materiales y equipos:

- Balanza con sensibilidad de 0.01 g
  - Mufla ( $445\pm 10$  °C)
  - Crisoles o platos de evaporación
  - Equipo de seguridad (bata, guantes, lentes de seguridad)
1. Para iniciar se midió el peso del crisol y registró el dato.
  2. Del material que fue separado por granulometría de mallas, se homogenizó en la bolsa y se extrajeron 20 g, fue pesado en el recipiente de crisol e identificado con marcador permanente, se registró el dato. Este paso se repitió con cada uno de los diferentes tamaños de partículas (malla n.10, 20, 40, 60, 100, 200) de las muestras.



*Figura 39. Peso de muestra para ignición*

- Las muestras se introdujeron a la mufla y se fijó a una temperatura de  $445 \pm 10$  °C durante seis horas, se estableció como tiempo de inicio cuando la mufla alcanzó y mantuvo la temperatura de  $445 \pm 10$  °C.



*Figura 40. Ignición de muestras*

- Pasadas las seis horas, se apagó la mufla y se dejaron enfriar las muestras.



*Figura 41. Muestras sin materia orgánica*

5. Se volvieron a pesar las muestras, obteniendo el peso final.
6. La materia orgánica es el resultado de la diferencia del peso inicial (antes de ingresar la muestra a la mufla) y el peso final (después de la mufla) y se expresa en porcentaje. Matemáticamente;

$$\% M.O = \frac{A - B}{B - C} * 100 \quad (13)$$

Donde:

M.O= Materia orgánica en porcentaje

A= peso del crisol con el sedimento antes de la ignición.

B= peso del crisol con sedimento después de la ignición

C= peso únicamente del crisol

## 4. RESULTADOS

Los resultados se presentan en dos partes, la primera corresponde al análisis que se realizó en la capa superficial del sedimento (de 0 a 10 cm de profundidad) de los cuales se obtuvo una publicación en la Revista Interamericana de Ambiente y Turismo (RIAT) en 2024 (Trejo Reséndiz & Duhne Ramírez, 2024) (Anexo 5), y la segunda presenta los resultados de las muestras que se realizaron por estratos, es decir, corresponden a las 15 muestras de 0 hasta 150 cm de profundidad, de los tres puntos ubicados en el embalse, también se publicaron, en el XXXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica en octubre del 2024 (Trejo Reséndiz *et al.*, 2024) (Anexo 6) .

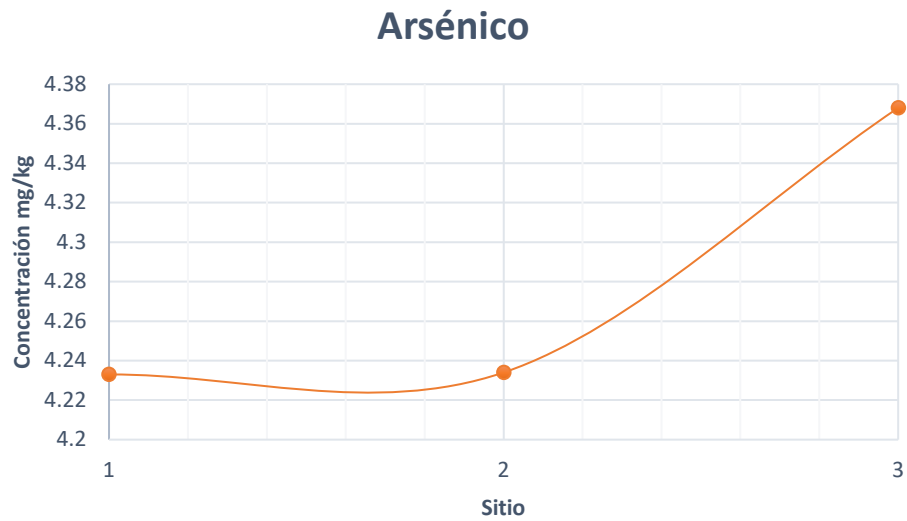
### 4.1 Resultados de la Primera etapa

Realizado todo el proceso de obtención de muestras, digestión y lectura en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica, se tienen (en la tabla 15) las concentraciones de Arsénico, Cadmio y Plomo.

*Tabla 15. Concentraciones de As, Cd y Pb.*

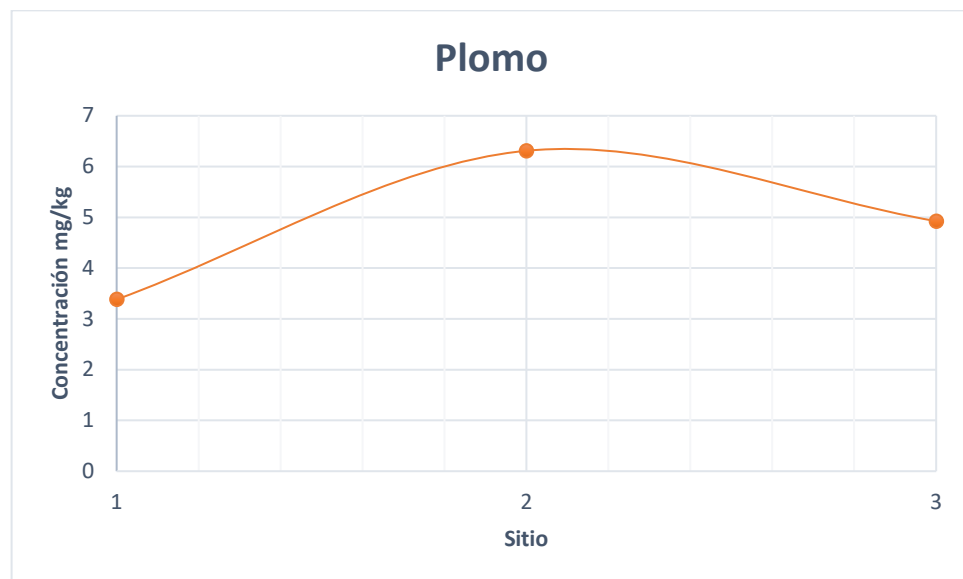
Muestra	Resultados en mg/Kg		
	Arsénico	Plomo	Cadmio
1	4.233	3.383	0.342
2	4.234	6.311	0.339
3	4.368	4.925	0.287

A primera vista se aprecia una tendencia uniforme (Figura 42) en la concentración de arsénico (96.93 % de coincidencia) y un aumento gradual del punto de entrada al punto de salida del embalse. La diferencia en mg/kg es de 0.134 del sitio uno al sitio tres. Esto puede ser un indicio que, en la capa superior del estrato, el arsénico no tiene una distribución particular dentro del embalse.



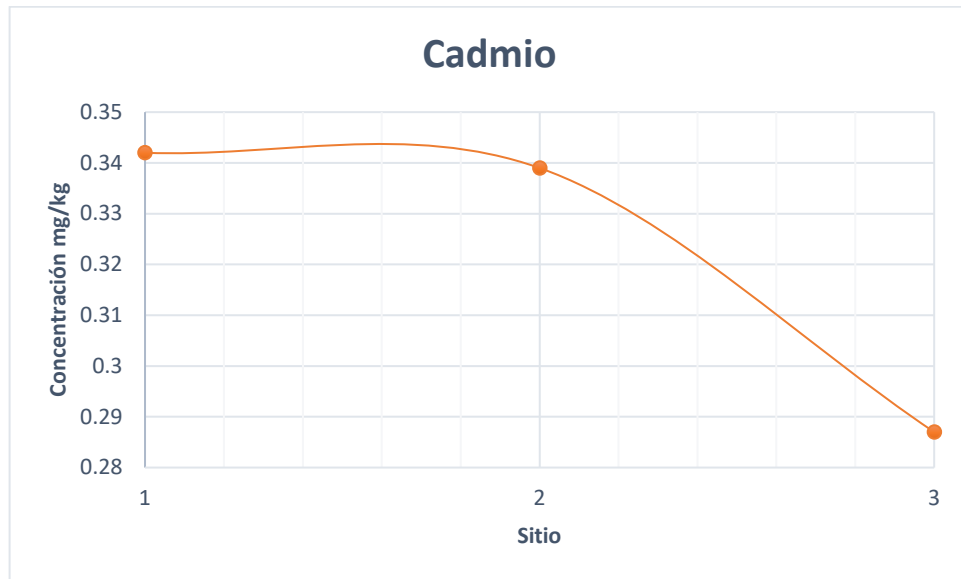
*Figura 42. Distribución espacial del arsénico*

Respecto al plomo, la concentración en el sitio dos que fue a mitad de la presa es donde se encontró la mayor cantidad, y la cantidad más baja fue en la entrada al embalse, el concentrado del sitio uno es el 53.61% de la muestra del sitio dos, la diferencia entre estos es de 2.928 mg/kg.



*Figura 43. Distribución espacial del plomo*

Por otra parte, el cadmio se encontró en concentraciones menores de 1 mg/kg, siendo el sitio uno el de mayor concentración con tendencia a la baja hasta el sitio tres.



*Figura 44. Distribución espacial del Cadmio*

El metal que presentó la mayor concentración (de los tres sitios) fue el plomo con una media de 4.873 mg/kg en un rango de concentraciones de 3.383 hasta 6.311 mg/kg, le sigue el arsénico con una media de 4.278 mg/kg y en última posición el cadmio.

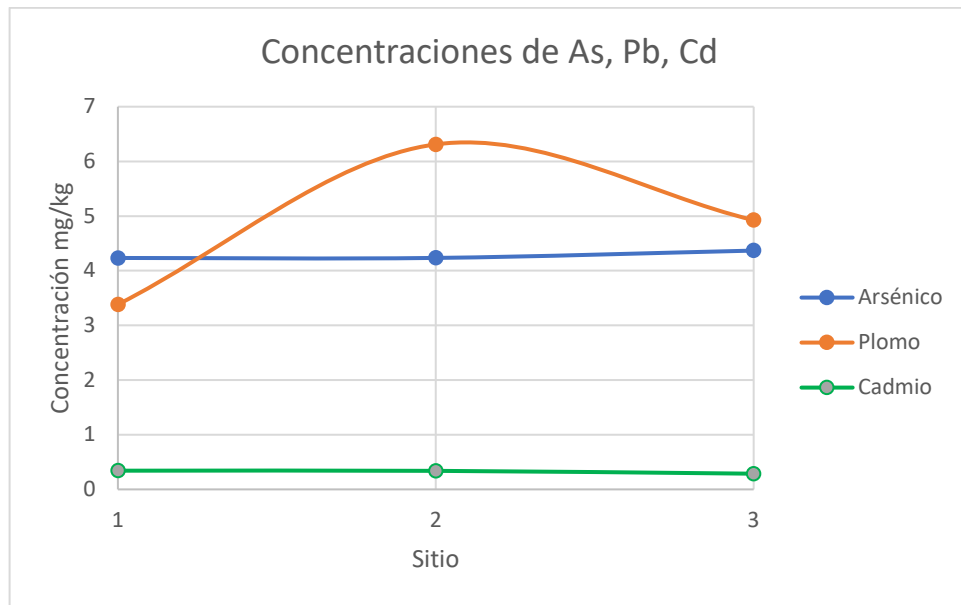


Figura 45. Concentrado de las distribuciones de As, Pb y Cd

Los resultados se compararon con la norma NOM-127-SEMARNAT/SSA1-2004 para la clasificación de límites de contaminantes en suelos destinados para uso agrícola, encontrando que las concentraciones no exceden los límites establecidos.

Tabla 16. Concentraciones de referencia totales por tipo de suelo

Contaminante	Uso agrícola (mg/kg)
Arsénico	22
Cadmio	37
Plomo	400

Fuente: Elaboración propia con información de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Así mismo, se realizó la comparativa con la Guía de Calidad Ambiental Canadiense (CEQG, por sus siglas en ingles), esta guía aplica para sedimentos de aguas continentales, y se divide en dos categorías en referencia a las concentraciones donde se espera que no haya efectos negativos en el ambiente (ISQG) y el nivel donde el efecto es probable (PEL).

Tabla 17. Límites permisibles para metales en sedimentos establecidos por la norma mexicana (NOM) y canadiense (CEQG)

<b>Norma</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>
NOM	22	37	400
ISQG	5.9	0.6	35
CEQG PEL	17	3.5	91.3

Fuente: elaboración propia con información de (Lino Guanes et al., 2015)

Se observa que en el estrato de 0-10 cm de profundidad para las concentraciones de As, Pb y Cd se encuentran dentro de los límites para la norma mexicana y la guía canadiense, es decir, se espera que las concentraciones no representen riesgos biológicos para el ambiente

Sin embargo, en estudios consultados sobre la fitorremediación los autores indican que algunos metales pueden ser absorbidos por medio de las raíces de las plantas (Jara Peña *et al.*, 2014), se debe considerar si este efecto se está reproduciendo en este estudio.

En esta etapa, también, se obtuvieron las concentraciones de los metales pesados en la muestra del blanco, los cuales fueron los siguientes: arsénico de 11.24 mg/kg, cadmio 0.28 mg/kg y plomo 0.38 mg/kg. Se encontraron fuera de los límites establecidos por la normativa, por otra parte, se podría considerar si se encuentran de manera natural en el suelo o fueron producto de algún factor antropogénico.

## 4.2 Resultados de la Segunda Etapa

Los resultados corresponden al total de 15 muestras en los tres sitios establecidos, realizados en estratos de 30 cm de profundidad.

### 4.2.1 Concentraciones de arsénico, cadmio y plomo

Después de los resultados del análisis preliminar obtenidos en la capa superficial del sedimento, por medio del cual se determinó la presencia de arsénico, plomo y cadmio, se prosiguió con las concentraciones a mayor profundidad en los estratos de 0-150 cm en capas de 30 cm. Encontrando valores altos para el arsénico, en la tabla 18, se pueden observar detenidamente los datos de las concentraciones y la profundidad del estrato.

*Tabla 18. Resultados de concentraciones de arsénico, cadmio y plomo, según la profundidad.*

ID Muestra	Profundidad cm	Arsénico mg/kg	Cadmio mg/kg	Plomo mg/kg
1.1	30	367.74	7.94	5.49
1.2	60	225.54	7.27	5.08
1.3	90	187.68	5.09	4.45
1.4	120	264.03	5.96	4.56
1.5	150	260.08	6.67	4.65
2.1	30	275.65	5.87	4.18
2.2	60	247.09	6.43	4.37
2.3	90	236.87	6.99	4.20
2.4	120	291.29	7.88	4.38
2.5	150	227.06	6.19	4.15
3.1	30	100.86	2.53	3.93
3.2	60	185.32	3.52	4.55
3.3	90	77.31	2.28	3.65
3.4	120	3.57	4.79	1.28
3.5	150	0.93	2.02	0.86

Estos resultados fueron comparados con los valores permisibles de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 con el objetivo de conocer que muestras exceden los parámetros. Los límites se dividen en dos clasificaciones aplican para uso de suelo agrícola y para suelo de uso industrial. En la tabla 19 se observan los parámetros.

*Tabla 19. Concentraciones de referencia totales por tipo de uso de suelo*

<b>Metal</b>	<b>Uso agrícola/ residencial /comercial (mg/kg)</b>	<b>Uso industrial (mg/kg)</b>
Arsénico	22	260
Cadmio	37	450
Plomo	400	800

Elaboración propia con datos de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

El arsénico es el metal que excedió los límites, tanto para uso de suelo agrícola como para el uso de suelo industrial.

Con los datos de concentraciones se realizó un análisis de correlación de Pearson para cada sitio muestreado.

En la figura 46 corresponde a la muestra del sitio uno. Se hizo una correlación de profundidad-concentración, y relación metal-metal. Se destaca la relación que a menor profundidad mayor concentración de plomo, ocurre algo similar con los metales de cadmio y arsénico. El comportamiento del arsénico y el plomo presentaron una tendencia de comportamiento similar con un  $r=0.93$ .

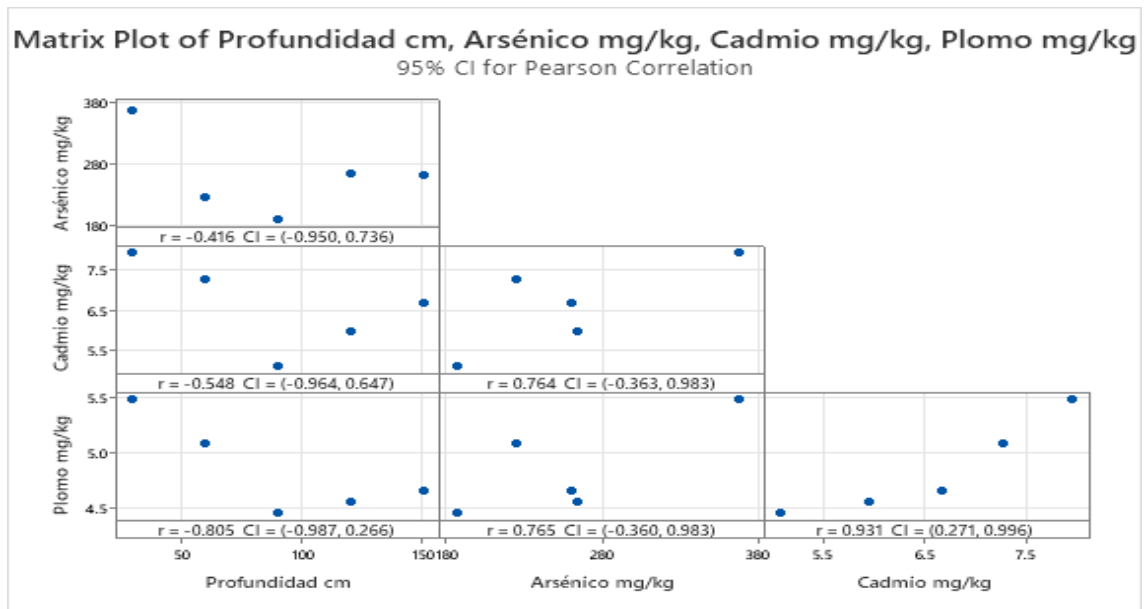


Figura 46. Análisis de correlación de Pearson para la muestra del sitio uno

Para el análisis de la muestra del sitio dos, los resultados se muestran en la figura 47, se evidencia que a mayor profundidad del estrato se tiene una mayor concentración de cadmio, con  $r=0.418$ , el arsénico se sigue comportando de manera similar al plomo con un  $r=0.505$ . Sin embargo, el cadmio presenta mayor similitud con el plomo con un  $r=0.622$ .

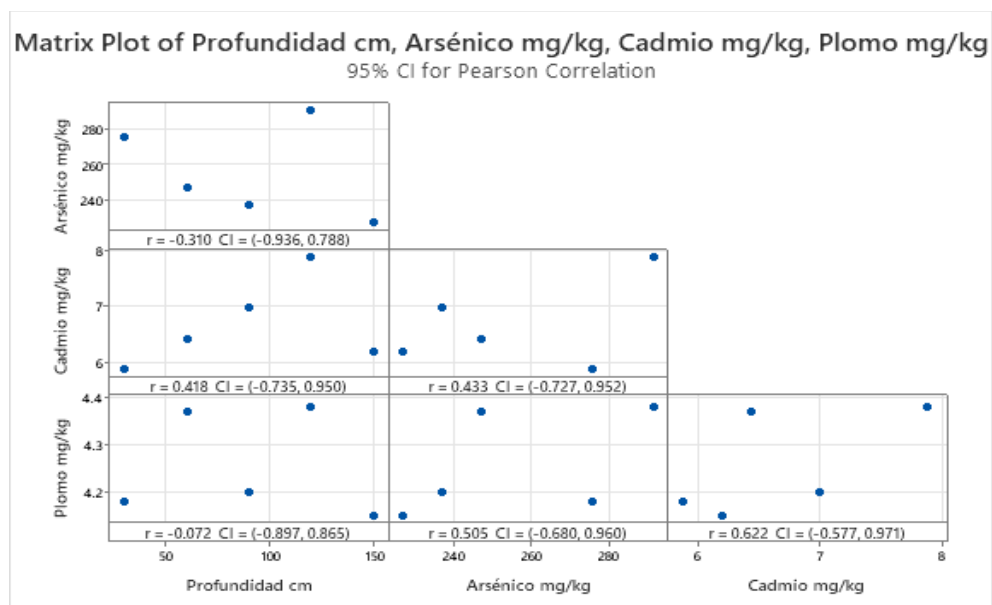


Figura 47. Análisis de correlación de Pearson para la muestra del sitio uno

La correlación para los resultados de la muestra del sitio tres se aprecia en la figura 48.

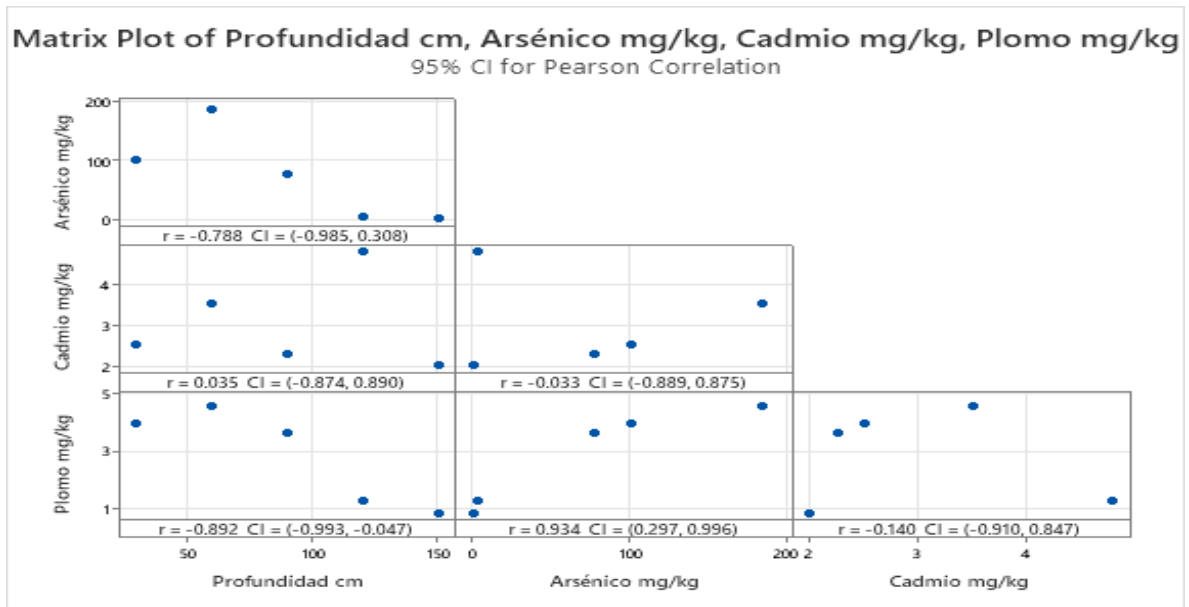


Figura 48. Análisis de correlación de Pearson para la muestra del sitio tres

La relación profundidad- plomo es de  $r=-0.89$ , indicando que a menor profundidad mayor concentración de plomo, de las cinco submuestras solo la del estrato de 30-60 cm no obedece este comportamiento, presentó un valor más alto que la submuestra del estrato 0-30 cm. El arsénico en relación al plomo se observó un comportamiento similar con un  $r=0.934$ .

### 4.2.2 Granulometría

Para dar una relación en las concentraciones de los contaminantes del sedimento, se realizó una granulometría por mallas y se graficaron en escala logarítmica.

La figura 49, corresponde a la granulometría por mallas de las muestras obtenidas en el sitio uno.

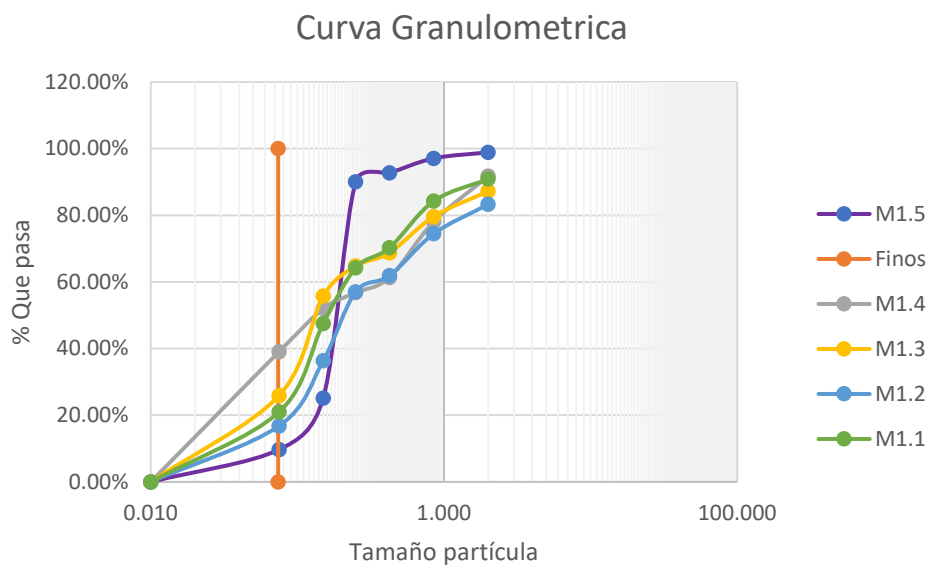


Figura 49. Curva granulométrica de las muestras del sitio uno.

La línea vertical color naranja indica la separación del material que pasó la malla n.200. En el caso de las muestras del sitio uno, se observan que la mayor cantidad de sedimento tiene tamaños de partículas que quedaron retenidas en la malla n.10 a la malla n.200, esto indica que es una arena con finos. Los diámetros de partícula de cada muestra analizada se encuentran en el Anexo 4.

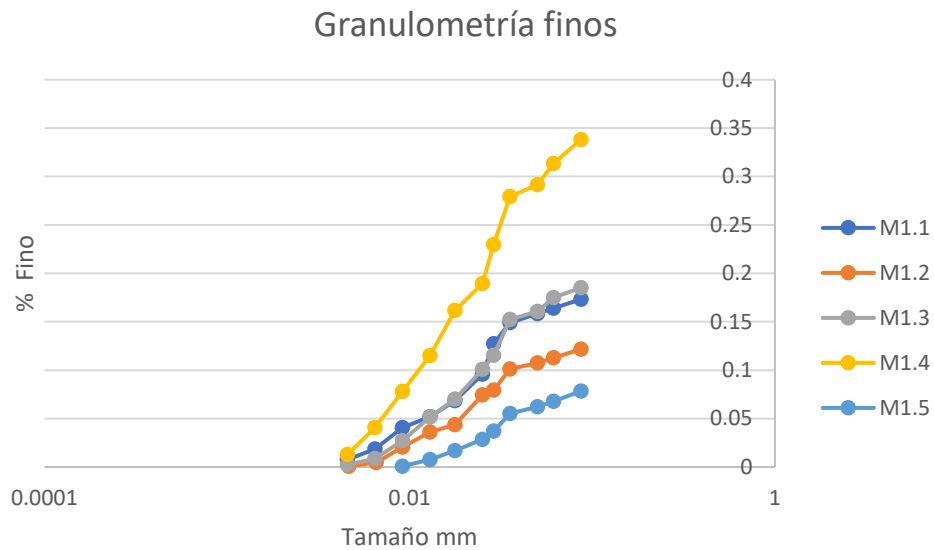


Figura 50. Granulometría de finos Muestra uno.

En la figura 50 se muestra los tamaños de partícula que ronda de los 0.087 hasta los 0.001 mm.

En la curva granulométrica para las muestras del sitio dos (Figura 51), el sedimento quedó retenido en su mayoría en los tamices n.10 al n.200 (arena con finos). La muestra 2.5 presentó mayor cantidad de material que paso el tamiz n.200.

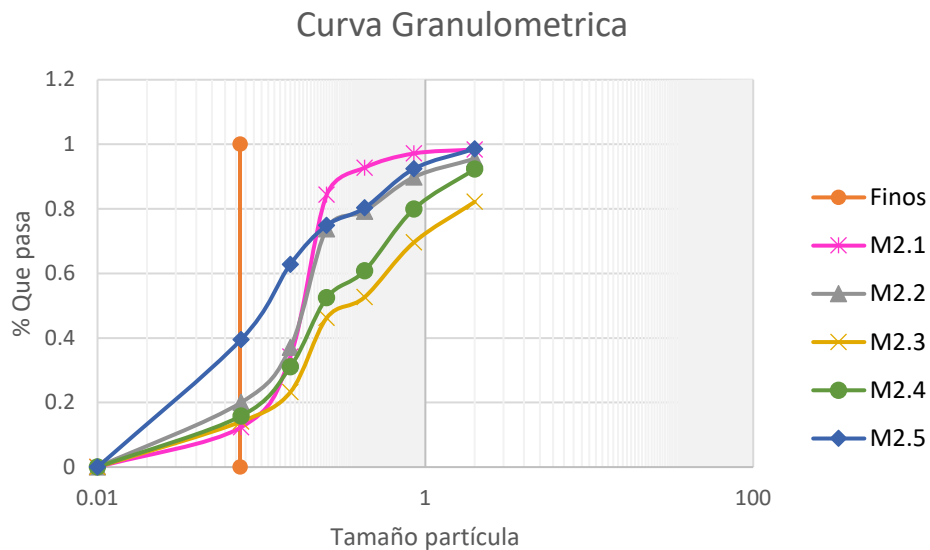


Figura 51. Curva granulométrica de las muestras del sitio dos

En la granulometría fina (Figura 52), para la muestra del sitio dos, se obtuvieron tamaños de partícula de 0.088 a 0.001 mm.

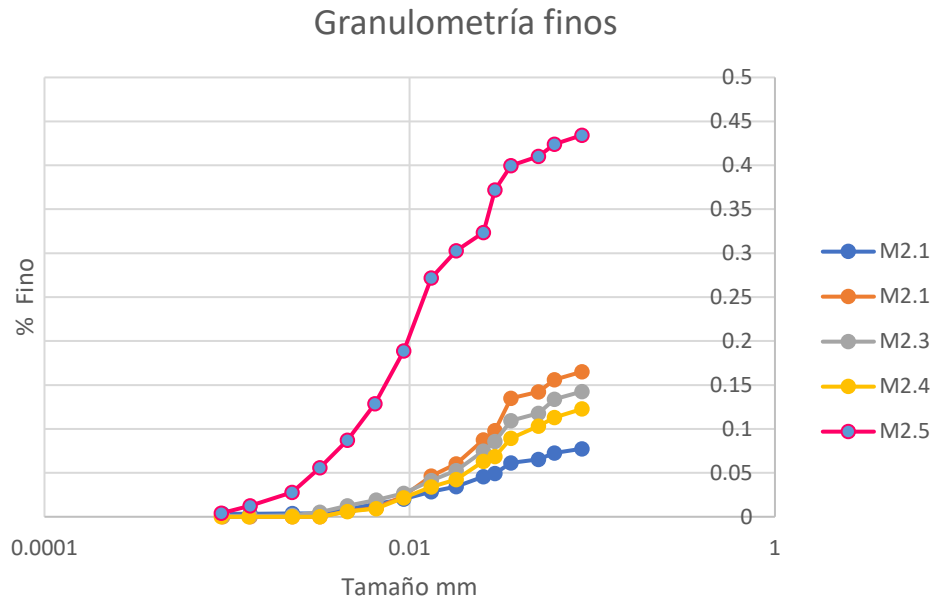


Figura 52. Granulometría de finos Muestra dos

Finalmente, para la granulometría del sedimento del sitio tres (Figura 53), se agregaron dos mallas más, la malla de 3/8" y la de 4", esto fue debido a la presencia de gravas para el estrato dos. La muestra del estrato tres presentó mayor cantidad de material fino, las muestras 3.2, 3.3 y 3.4 presentaron una estructura granulométrica similar.

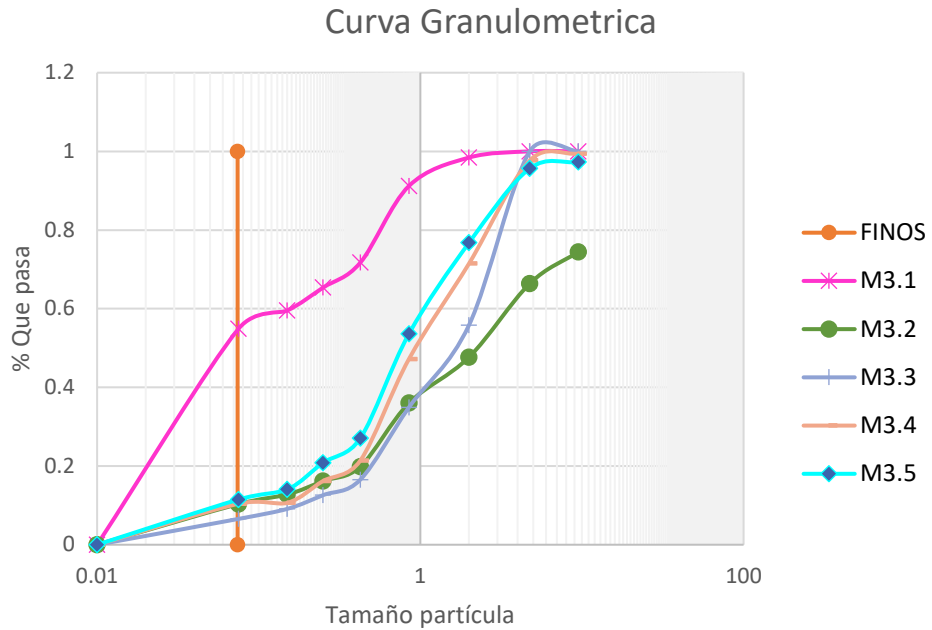


Figura 53. Curva granulométrica de las muestras del sitio tres

En relación a la granulometría fina de este sitio, se observa en la figura 54 que la muestra 3.1 tiene el mayor porcentaje de finos respecto al total.

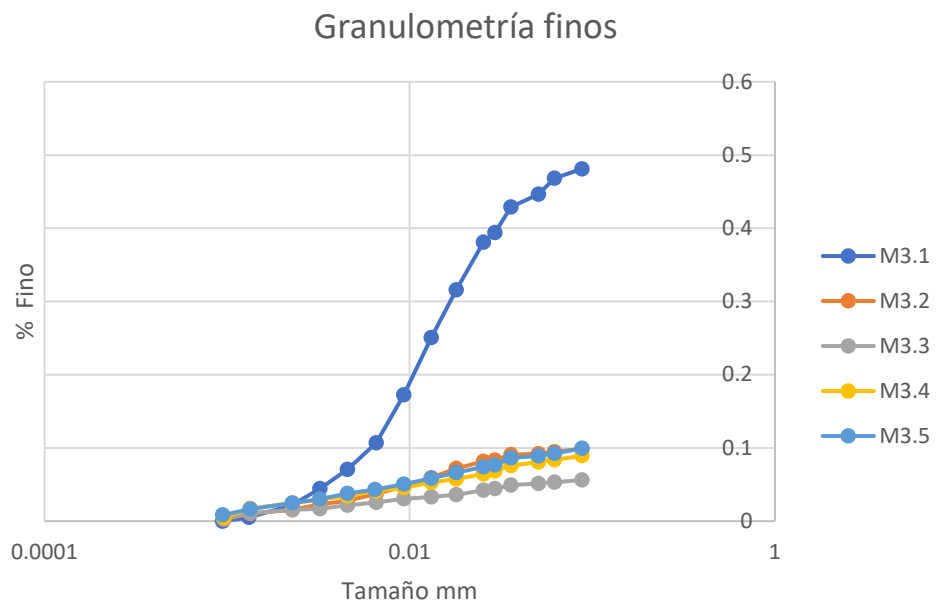


Figura 54. Granulometría de finos Muestra tres

### 4.2.3 Materia Orgánica

La tabla 20 presenta los porcentajes de materia orgánica para la muestra del sitio uno se presentó en un rango promedio de 6.37 al 12.56 %. Se concentró principalmente en los tamices n. 40, n. 60 y n.100. El estrato uno contiene menor cantidad de materia orgánica y el estrato cinco fue el de mayor cantidad.

*Tabla 20. Porcentaje de materia orgánica por estratos en la muestra uno*

<b>Malla</b>	<b>Estrato 1</b>	<b>Estrato 2</b>	<b>Estrato 3</b>	<b>Estrato 4</b>	<b>Estrato 5</b>
N.10	5.19	6.34	6.45	6.56	<b>11.93</b>
N.20	5.73	8.15	6.96	6.51	<b>21.90</b>
N.40	<b>7.81</b>	<b>10.02</b>	<b>10.44</b>	6.76	<b>26.35</b>
N.60	<b>9.27</b>	<b>13.37</b>	<b>13.59</b>	<b>8.13</b>	<b>18.67</b>
N.100	6.33	9.20	<b>15.03</b>	<b>9.77</b>	3.27
N.200	5.68	5.85	7.73	<b>7.79</b>	2.46
Paso N.200	4.58	6.00	7.32	6.28	3.35
Media=	6.37	8.42	9.64	7.40	12.56

En la muestra del punto medio de la presa, tabla 21, se obtuvieron las mayores cantidades de materia orgánica. Los tamices más representativos fueron el n.10 hasta el n.60, en los estratos de 30 a 120 cm de profundidad.

*Tabla 21. Porcentaje de materia orgánica por estratos en la muestra dos*

<b>Malla</b>	<b>Estrato 1</b>	<b>Estrato 2</b>	<b>Estrato 3</b>	<b>Estrato 4</b>	<b>Estrato 5</b>
N.10	<b>11.15</b>	<b>23.56</b>	<b>52.99</b>	<b>42.27</b>	<b>25.89</b>
N.20	<b>15.73</b>	<b>14.63</b>	<b>47.59</b>	<b>31.70</b>	9.80
N.40	8.82	<b>13.67</b>	<b>33.80</b>	<b>31.34</b>	<b>10.70</b>
N.60	3.61	<b>11.76</b>	<b>23.20</b>	<b>21.77</b>	<b>12.80</b>
N.100	2.02	3.57	9.60	10.45	9.32
N.200	1.87	2.53	7.17	6.65	7.05
Paso N.200	4.42	2.37	6.82	3.78	5.93
Media=	6.80	10.30	25.88	21.14	11.64

Por otra parte, en el sitio número tres, se obtuvo que es el lugar con menor cantidad de materia orgánica en un rango de 4.19 a 7.85 %, y se observaron distribuciones similares en los estratos, a excepción del estrato 1 en la malla n.10 (Tabla 22).

Tabla 22. Contenido de materia orgánica por estratos en la muestra tres

Malla	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5
N.10	<b>15.70</b>	3.52	5.05	7.04	5.86
N.20	6.43	2.92	5.66	7.05	6.57
N.40	6.25	3.56	5.04	7.59	7.10
N.60	7.19	4.25	5.37	7.09	7.51
N.100	6.96	4.41	5.32	8.12	7.71
N.200	6.68	5.44	5.83	0.20	7.74
Paso N.200	5.74	5.22	5.96	7.83	6.44
Media=	7.85	4.19	5.46	6.42	6.99

Con los datos de granulometría por mallas, granulometría vía hidrómetro y contenido de materia orgánica se realizó un análisis multivariado para conocer que componentes son las que impactan más en las concentraciones de los metales analizados. En la figura 55, se observa el Factor 1 con una variabilidad de 40.40 % y el factor 2 con variabilidad de 27.17 %, sumando un 67.57 % de variabilidad total.

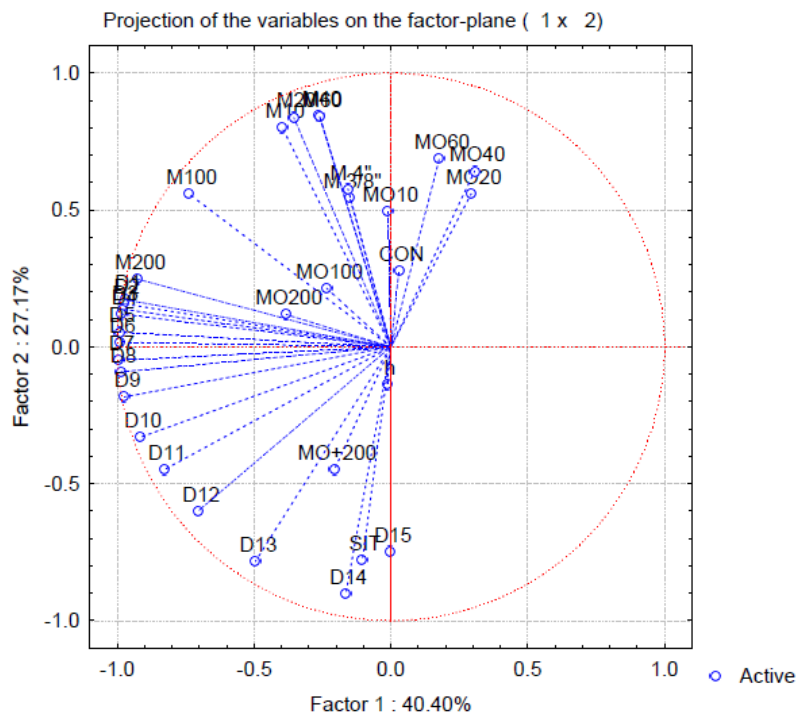


Figura 55. Análisis multivariado

Las características que más interfieren son las de granulometría vía hidrómetro con tamaño de partículas que pasaron la malla n.200. En tamaños de un

rango de 0.087 a 0.001 mm. En contraparte con la característica del porcentaje de materia orgánica obtenidas de las granulometrías de la malla n.20, n.40 y n.60.

Para conocer la agrupación de las concentraciones de los metales con características granulométricas y materia orgánica, se realizó una clasificación por cuadrante, en la figura 56 se observan los cuatro cuadrantes de manera general, más adelante se presentan de manera individual.

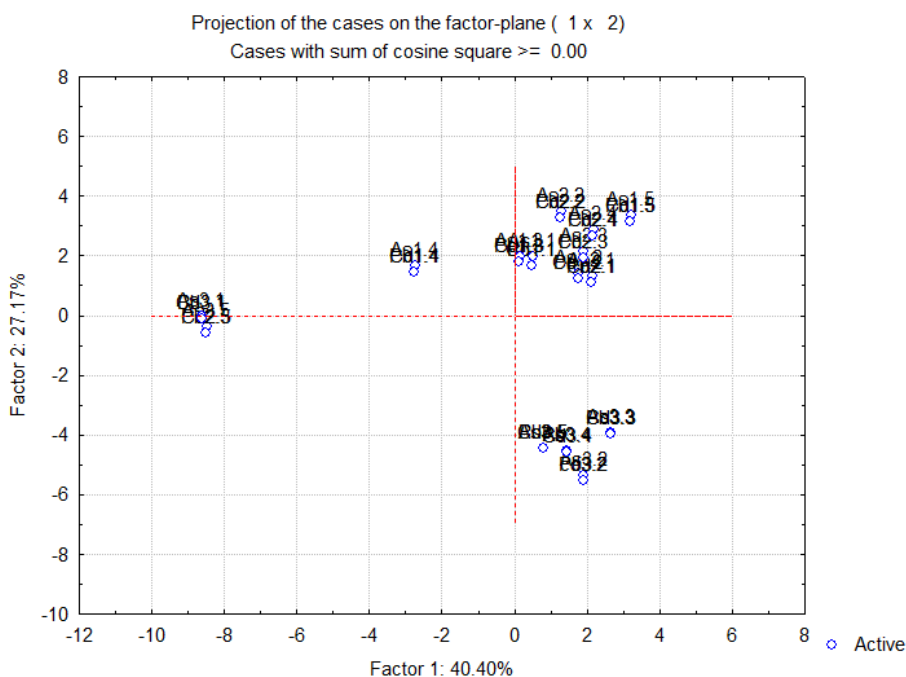


Figura 56. Agrupación de las concentraciones de metales por medio de características similares.

En la agrupación del cuadrante I se encuentran las muestras 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4, en las cuales se presentan características similares en granulometría por mallas, por hidrómetro y la cantidad de materia orgánica. En este cuadrante se ubican la mayor cantidad de muestras (Figura 57).

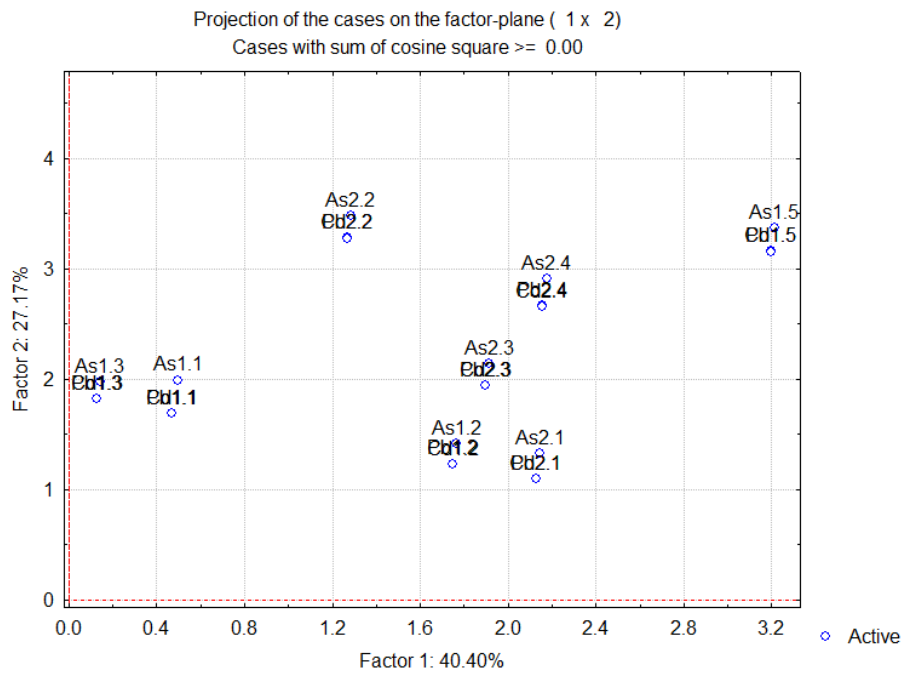


Figura 57. Agrupación de muestras por características similares del cuadrante I

En la agrupación en el cuadrante II se presenta solo una muestra que corresponde al sitio uno en el estrato de 90-120 cm de profundidad (Figura 58).

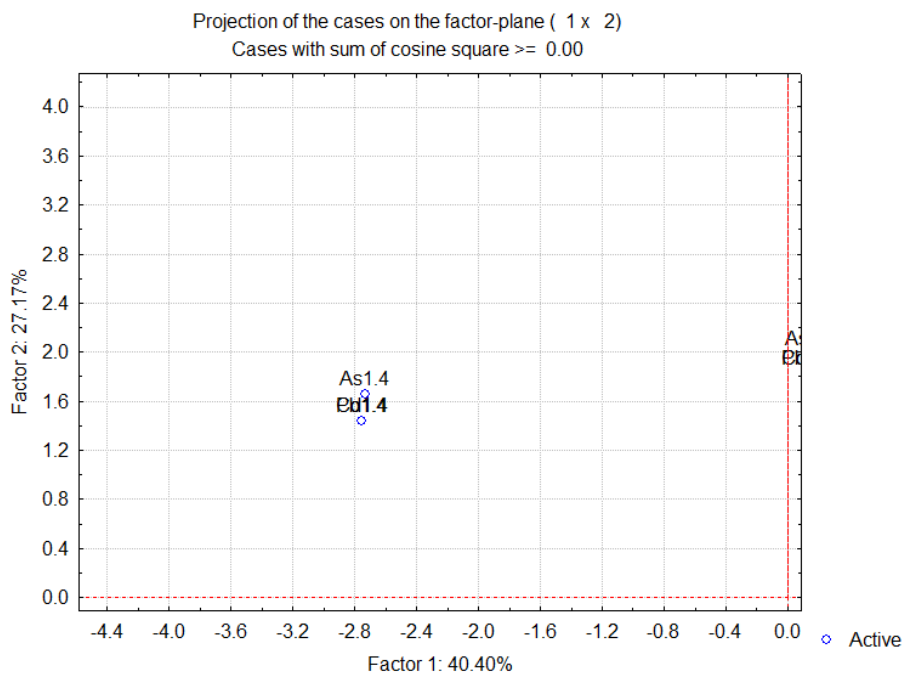


Figura 58. Agrupación de muestras por características similares del cuadrante II

La agrupación del cuadrante III se compone de dos muestras, la muestra 2.5 y 3.1.

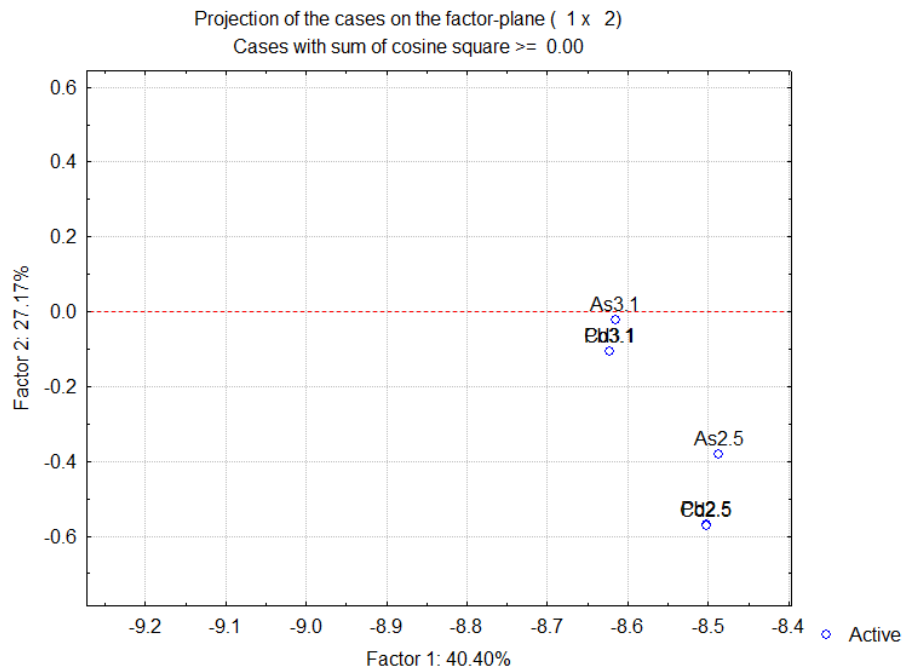


Figura 59. Agrupación de muestras por características similares del cuadrante III

En el cuadrante IV se agrupan las muestras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 (Figura 60).

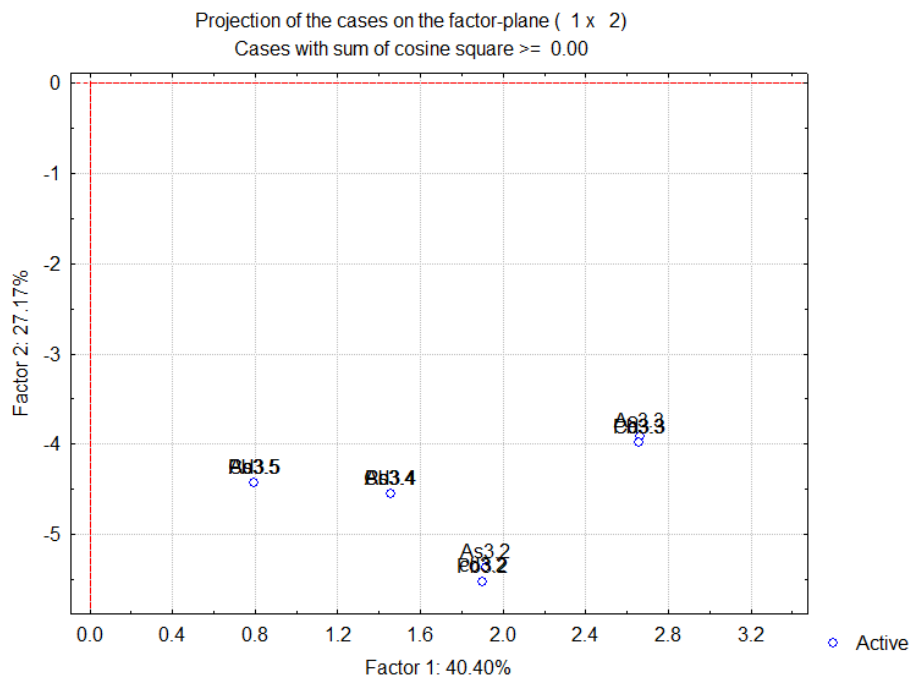


Figura 60. Agrupación de muestras por características similares del cuadrante IV

Nótese que en este cuadrante se ubicaron exclusivamente muestras del sitio tres.

Posteriormente se obtuvieron las características de máximos, mínimos y promedio del porcentaje de granulometría por mallas, granulometría vía hidrómetro y de materia orgánica de cada una de las agrupaciones de los cuadrantes

### ***Características cuadrante I***

Los datos corresponden a las muestras 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 que se mostraron anteriormente en la figura 60.

En la tabla 22, se ilustran los valores máximos, mínimos y promedio de las concentraciones de los metales, en este cuadrante la concentración promedio del arsénico excede los límites establecidos por la norma mexicana para ambos tipos de suelo.

*Tabla 23. Máximos, mínimos y promedio de concentraciones de metales en el cuadrante I*

<b>Metal</b>	<b>Concentración mg/kg</b>	<b>Sitio</b>	<b>Profundidad cm</b>
Máximo As	367.74	1, 2	30 - 150
Mínimo As	187.68		
Promedio	261.49		
Máximo Pb	7.94		
Mínimo Pb	5.09		
Promedio Pb	6.77		
Máximo Cd	5.49		
Mínimo Cd	4.18		
Promedio Cd	4.6		

La tabla 24 sintetiza los tamaños de partículas por el método de mallas, y se pudo clasificar como arena con finos.

Tabla 24. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de tamaño de partículas por mallas para el cuadrante I

	<b>M10</b>	<b>M20</b>	<b>M40</b>	<b>M60</b>	<b>M100</b>	<b>M200</b>
Máximo	98.90	97.16	92.74	90.07	55.75	25.92
Mínimo	82.20	69.60	52.60	46.20	23.20	9.70
Promedio	91.10	84.00	72.40	66.60	36.30	16.90

Datos en porcentaje de material que pasaron las mallas.

El contenido de la materia orgánica, para este cuadrante, se concentró en el material de las mallas n.10 al n.60 en un rango de 15.9 a 22.9 % como se observa en la tabla 25.

Tabla 25. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de contenido de materia orgánica para el cuadrante 1

	<b>MO10</b>	<b>MO20</b>	<b>MO40</b>	<b>MO60</b>	<b>MO100</b>	<b>MO200</b>	<b>MO+200</b>
Máximo	53.00	47.60	33.80	23.50	15.00	7.70	7.30
Mínimo	5.20	5.70	7.80	3.60	2.00	1.90	3.30
Promedio	22.90	20.90	19.50	15.90	7.90	5.30	5.10

El porcentaje del tamaño de partículas por el método del hidrómetro, muestran una tendencia a disminuir su porcentaje desde el D1 al D15, con mayor presencia de los diámetros de D1 a D6, según la tabla 26.

Tabla 26. Máximos, mínimos y promedio porcentaje de tamaño de partícula Método del hidrómetro cuadrante I

	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>
Máximo	18.50	17.50	16.10	15.20	12.70	10.10	7.00	5.20
Mínimo	7.70	6.80	6.20	5.50	3.70	2.90	1.70	0.80
Promedio	13.30	12.40	11.50	10.70	8.30	7.10	4.90	3.70
	<b>D9</b>	<b>D10</b>	<b>D11</b>	<b>D12</b>	<b>D13</b>	<b>D14</b>	<b>D15</b>	
Máximo	4.10	1.90	1.30	0.50	0.40	0.30	0.30	
Mínimo	0.10	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
Promedio	2.30	1.10	0.60	0.10	0.10	0.10	0.10	

**Características cuadrante II**

Los datos corresponden únicamente a la muestra 1.4.

La concentración del arsénico excede el nivel permisible para suelo agrícola y para uso de suelo industrial (Tabla 27).

*Tabla 27. Máximos, mínimos y promedio de concentraciones de metales en el cuadrante II*

<b>Metal</b>	<b>Concentración mg/kg</b>	<b>Sitio</b>	<b>Profundidad cm</b>
As	264.03	1	120
Pb	5.96		
Cd	4.56		

Debido a los porcentajes de material que pasó las mallas n.10 a la n.200, siendo mayor al 50% de la muestra, se considera una clasificación de suelo tipo arena con finos (tabla 28).

*Tabla 28. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de tamaño de partículas por mallas para el cuadrante II*

<b>M10</b>	<b>M20</b>	<b>M40</b>	<b>M60</b>	<b>M100</b>	<b>M200</b>
91.70	78.10	61.30	56.80	52.00	39.10

Datos en porcentaje de material que pasaron las mallas

En esta muestra, la proporción de materia orgánica se aprecia casi homogénea, con un porcentaje promedio de 7.41 %.

*Tabla 29. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de contenido de materia orgánica para el cuadrante II*

<b>MO10</b>	<b>MO20</b>	<b>MO40</b>	<b>MO60</b>	<b>MO100</b>	<b>MO200</b>	<b>MO+200</b>
6.60	6.50	6.80	8.10	9.80	7.80	6.30

El análisis por hidrómetro indico que no se tienen tamaños de partículas en D12 a D15.

*Tabla 30. Máximos, mínimos y promedio porcentaje de tamaño de partícula Método del hidrómetro cuadrante II*

<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>	<b>D9</b>	<b>D10</b>	<b>D11</b>
33.82	31.34	29.17	27.93	22.98	18.95	16.16	11.52	7.80	4.09	1.30

Los datos de D12, D13, D14 y D15 con igual a cero

**Características cuadrante III**

En este cuadrante se ubican las muestras 2.5 y 3.1.

En la tabla 31 se presentan las concentraciones promedio de este cuadrante, para el As= 163.96 mg/kg, Pb=4.36 mg/kg y el Cd= 1.04 mg/kg. El arsénico excedió el límite para uso de suelo agrícola.

*Tabla 31. Máximos, mínimos y promedio de concentraciones de metales en el cuadrante III*

<b>Metal</b>	<b>Concentración mg/kg</b>	<b>Sitio</b>	<b>Profundidad cm</b>
Máximo As	227.06	2, 3	30 ,150
Mínimo As	100.86		
Promedio	163.96		
Máximo Pb	6.19		
Mínimo Pb	2.53		
Promedio Pb	4.36		
Máximo Cd	4.15		
Mínimo Cd	3.93		
Promedio Cd	4.04		

El sedimento de este cuadrante, se clasificó como sedimento con finos, debido a los valores medios de la cantidad del material que paso la malla n.200. Sin embargo, al estar compuesto por dos muestras, una de ellas se clasificó como sedimento de grano fino.

*Tabla 32. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de tamaño de partículas por mallas para el cuadrante III*

	<b>M10</b>	<b>M20</b>	<b>M40</b>	<b>M60</b>	<b>M100</b>	<b>M200</b>
Máximo	98.60	92.40	80.30	74.90	62.80	54.90
Mínimo	98.40	91.20	71.70	65.40	59.50	39.50
Promedio	98.50	91.80	76.00	70.10	61.20	47.20

Datos en porcentaje de material que pasaron las mallas

El contenido de la materia orgánica no presenta alguna tendencia. Se observa una variabilidad de repunte en los estratos.

*Tabla 33. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de contenido de materia orgánica para el cuadrante III*

	<b>MO10</b>	<b>MO20</b>	<b>MO40</b>	<b>MO60</b>	<b>MO100</b>	<b>MO200</b>	<b>MO+200</b>
Máximo	25.90	9.80	10.70	12.80	9.30	7.00	5.90
Mínimo	15.70	6.40	6.20	7.20	7.00	6.70	5.70
Promedio	20.80	8.10	8.50	10.00	8.10	6.90	5.80

Por otra parte, el tamaño de partículas obtenido por vía hidrómetro, presenta una disminución del contenido en porcentaje conforme disminuye el tamaño del sedimento.

*Tabla 34. Máximos, mínimos y promedio porcentaje de tamaño de partícula Método del hidrómetro cuadrante III*

	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>
Máximo	48.10	46.80	44.60	42.90	39.40	38.10	31.60	27.20
Mínimo	43.40	42.40	41.00	40.00	37.20	32.40	30.30	25.10
Promedio	45.80	44.60	42.80	41.40	38.30	35.20	30.90	26.10
	<b>D9</b>	<b>D10</b>	<b>D11</b>	<b>D12</b>	<b>D13</b>	<b>D14</b>	<b>D15</b>	
Máximo	18.90	12.90	8.70	5.60	2.80	1.20	0.40	
Mínimo	17.20	10.70	7.00	4.40	2.20	0.50	0.00	
Promedio	18.10	11.80	7.90	5.00	2.50	0.90	0.20	

#### **Características cuadrante IV**

Los datos corresponden a las características de las muestras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5.

Las concentraciones más bajas de los metales se agruparon en este cuadrante y corresponden al sitio número tres, a excepción de la muestra 3.1. La media de las concentraciones de arsénico indica que también excede los límites para uso de suelo agrícola como se muestra en la tabla 35.

Tabla 35. Máximos, mínimos y promedio de concentraciones de metales en el cuadrante IV

Metal	Concentración mg/kg	Sitio	Profundidad cm
Máximo As	185.32	3	60-150
Mínimo As	0.93		
Promedio	66.78		
Máximo Pb	4.79		
Mínimo Pb	2.02		
Promedio Pb	3.15		
Máximo Cd	4.55		
Mínimo Cd	0.86		
Promedio Cd	2.59		

A diferencia de los sitios uno y dos, en el sitio tres fue necesario incorporar las mallas 3/8" y 4" debido a la presencia de gravas en el estrato dos. El porcentaje de material retenido en estas mallas fue menor del 20%. Lo que permitió que el sedimento se clasificara como sedimento arenoso con finos, según la granulometría por mallas en la tabla 36.

Tabla 36. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de tamaño de partículas por mallas para el cuadrante IV

	M 3/8"	M 4"	M10	M20	M40	M60	M100	M200
Máximo	100.00	100.00	76.80	53.60	27.10	20.90	14.00	11.50
Mínimo	74.40	66.40	47.70	34.90	16.50	12.60	9.10	6.60
Promedio	92.80	89.90	62.90	42.90	21.20	16.50	11.60	9.70

Datos en porcentaje de material que pasaron las mallas

La cantidad de materia orgánica se mostró casi homogénea, con poca variación en los estratos agrupados.

Tabla 37. Máximos, mínimos y promedio del porcentaje de contenido de materia orgánica para el cuadrante IV

	MO10	MO20	MO40	MO60	MO100	MO200	MO+200
Máximo	7.00	7.00	7.60	7.50	8.10	7.70	7.80
Mínimo	3.50	2.90	3.60	4.20	4.40	0.20	5.20
Promedio	5.40	5.50	5.80	6.10	6.40	4.80	6.40

Según la granulometría por hidrómetro (tabla 38), el tamaño de partículas más pequeñas fue en el rango 0.087 a 0.001 mm de diámetro.

*Tabla 38. Máximos, mínimos y promedio porcentaje de tamaño de partícula Método del hidrómetro cuadrante IV*

	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>
Máximo	9.90	9.50	9.20	9.10	8.30	8.20	7.20	5.90
Mínimo	5.60	5.30	5.10	4.90	4.40	4.20	3.60	3.30
Promedio	8.60	8.10	7.80	7.50	6.80	6.60	5.80	5.10
	<b>D9</b>	<b>D10</b>	<b>D11</b>	<b>D12</b>	<b>D13</b>	<b>D14</b>	<b>D15</b>	
Máximo	5.00	4.30	3.80	3.00	2.50	1.70	0.80	
Mínimo	3.00	2.60	2.20	1.70	1.60	1.00	0.20	
Promedio	4.30	3.70	3.00	2.50	2.00	1.40	0.50	

## 5. CONCLUSIÓN

Con los datos obtenidos se puede llegar varias conclusiones, para el caso de la primera etapa, se tiene lo siguiente:

En las muestras obtenidas en el estrato superficial de sedimento analizado, las concentraciones de As, Pb y Cd se encuentran en límites por debajo de los parámetros que establecen las normativas tanto la norma mexicana como la guía ambiental canadiense. Entendiendo que puede ser empleado para uso agrícola y no representa riesgo para la salud humana o de la flora y fauna del lugar.

En el caso particular de la segunda etapa del análisis de este estudio, el arsénico excede los límites permisibles en el 86.67 % de las muestras, es decir, de las 15 muestras analizadas 13 de ellas están fuera de lo permisible en parámetros de suelo agrícola.

En las concentraciones del arsénico el 33.33% (5 de 15) de las muestras en los puntos 1 y 2 excedieron el límite para uso de suelo industrial el cual es de 260 mg/kg.

En referencia al cadmio este se encuentran por debajo de los límites permisibles por la norma mexicana, sin embargo, en la comparación con la Guía de Calidad Ambiental Canadiense en el apartado de Nivel de Efecto Probable (PEL) el 80.00 % de las muestras exceden el límite.

El plomo es el único metal que se encuentra por debajo de los límites permisibles en la norma mexicana y en la Guía de Calidad Ambiental Canadiense.

En los puntos 1 y 3, el plomo tiene una tendencia a depender de la profundidad en un 80 %, la relación profundidad- concentración en el cadmio es del 40-55 % en las muestras del sitio 1 y2, y el arsénico una correlación de 78% en el sitio 3.

No se observó un patrón específico en relación a profundidad vs metal, es decir, las concentraciones encontradas no obedecen que a mayor profundidad menor concentración, se observaron repuntes de concentraciones en estratos intermedios.

En las muestras del sitio 3, el arsénico presentó un comportamiento similar al plomo con una correlación de Pearson de 0.934. En contraparte, en el sitio 1 el cadmio y el plomo presentaron una correlación de 0.931.

A grandes rasgos, se puede concluir que los contaminantes tienen una tendencia a disminuir de forma horizontal y vertical, puesto que las concentraciones de los metales se encontraron en mayor cantidad en los estratos iniciales y a la entrada del embalse, es decir, la disminución horizontal se puede considerar en dirección del flujo del agua.

Las concentraciones mayores de los contaminantes se centran en el cuadrante I, donde el tamaño de partícula en un rango de D8-D15 es escaso. También se observa que estas concentraciones se encuentran en el punto uno y dos de muestreo.

La mayor cantidad de muestras se ubican en el cuadrante I, con características similares de concentraciones medias de As= 261.49 mg/kg, Pb= 6.77 mg/kg y el Cd=4.60 mg/kg, el tamaño de partícula indica que es una arena con fino al tener más del 50% del contenido en las mallas n.10 al n.200, por otra parte, el contenido de materia orgánica se centra en las mallas n.10 a la n.60, con diámetros de partícula en el rango de D1 a D8 predominantes en el método del hidrómetro.

En el cuadrante II, solo se ubicó una muestra, del sitio 1, estrato 4, con características de As= 264.03 mg/kg, Pb= 5.96 mg/kg y el Cd=4.56 mg/kg, sedimento clasificado como arena con finos, con materia orgánica representativa en la malla n.60, n.100 y n.200, un total del 7.41 % de materia orgánica en la muestra,

y por vía hidrómetro los diámetros representativos fueron del D1 al D8 con nula presencia en los diámetros de D12 a D15.

En el cuadrante III, solo se observaron dos muestras, en concentraciones medias de As= 163.96 mg/kg, Pb= 4.36 mg/kg y el Cd= 4.04 mg/kg, se clasificó como material arena con fino debido que el promedio de las muestras no paso el tamiz n.200, sin embargo, algunas muestras si pasaron con más del 50 % del material por la malla n.200, entendiéndose que este cuadrante también incluye suelos de grano fino. El contenido de la materia orgánica se presentó en las mallas n.10 a n.100 con un promedio total del 9.74 % de materia orgánica en las muestras. por granulometría de hidrómetro, los diámetros representativos fueron de D1 a D10 en un rango de 45.8 a 11.80%.

Finalmente, en el cuadrante IV, se ubicaron muestras únicamente del sitio 3 (excepto la muestra 3.1), de concentraciones promedio de: As= 66.78 mg/kg, Pb= 3.15 mg/kg y el Cd= 2.59 mg/kg, respecto a la granulometría se clasifico como arena con presencia de finos, con bajo contenido de materia orgánica del 5.77 % promedio, y diámetros de partícula desde D1 hasta D15 predominando los de D1 a D8.

Con las clasificaciones por cuadrantes se pudo observar que la agrupación de los contaminantes pareciera indicar que la concentración/características del último estrato es muy similar al estrato inicial del siguiente punto.

### ***Consideraciones***

- Los resultados de la muestra obtenida fuera del embalse, como blanco, da indicios el arsénico, plomo y cadmio se pueden encontrar de manera natural en esta cuenca. Sin embargo, se recomienda hacer más muestreos fuera del embalse que permitan determinar si los contaminantes son parte natural del suelo.
- Predecir lo comportamiento del arsénico, plomo y cadmio es una tarea compleja si solo se evalúa solo la profundidad, concentración y distancia al punto de entrada. Se recomienda extender el análisis a la temporada de lluvias en condiciones de sedimento saturado.

Al ser una cuenca de antecedentes mineros, se recomienda hacer un modelo de impacto de la minería en la cuenca, de tal manera que sea observable el rastro de contaminantes no solo en el embalse, sino también, en los cauces dentro de la cuenca.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASTM D2487. (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). EUA: ASTM International.
- ASTM D422-63. (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM INTERNATIONAL.
- Ávila Pérez , P., Balcázar , M., Zarazúa Ortega, G., Barceló Quintal , I., & Díaz Delgado , C. (1999). Heavy Metal concentrations in water and bottom sediments of a Mexican reservoir. *The Science of the Total Environment*.
- Ávila Pérez, P., García Aragón, J., Díaz Delgado, C., Reyes, R., & Tejeda Vega, S. (2005). Caracterización de Sedimentos del embalse J. A. Alzate, en el Estado de México. In F. Rivera Trejo , A. Gutiérrez López , R. Val Segura , R. Mejía Zermeño , P. Sánchez Ruiz , J. Aparicio Mijares , & L. Díaz Flores , *La medición de Sediemntos en México* (pp. 297-316). IMTA.
- Azamar, A., & Ponce, J. (2014). Extractivismo y desarrollo: los recursos minerales en México. *Revista Problemas del Desarrollo*, 45, 137-158. [https://doi.org/10.1016/S0301-7036\(14\)70144-0](https://doi.org/10.1016/S0301-7036(14)70144-0)
- Bárcenas , A. (2018). Estado de la situación de la minería en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades para un desarrollo más sostenible. *IX Conferencia de Ministerios de Minería de las Américas*. Lima: Evaluación del sector minero en Amércia Latina y el Caribe. [https://www.cepal.org/sites/default/files/presentation/files/181116\\_extendida\\_finalconferencia\\_a\\_los\\_ministros\\_mineria\\_lima.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/presentation/files/181116_extendida_finalconferencia_a_los_ministros_mineria_lima.pdf)
- Basile, P. A. (2018). *Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales*. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario. ISBN 978-987-702-257-5.

- Bowles, J. E. (1978). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. Estados Unidos de América: Editorial McGraw Hill Latinoamerica, S.A.
- CONAFOR. (2015). Protección, restauración y conservación de suelos forestales. *Manual de obras y prácticas*. México: CONAFOR.
- Coordinación general de Minería. (2014). *Estadísticas y estudios del sector minero*. Secretaría de Economía.
- Coreño Alonso, O., Leal Vaca, J., Ramos Arroyo, Y., Delgadillo Ruiz, E., Zamorategui Molina, A., & Coreño Alonso, J. (2024). Evaluación del potencial de uso de sedimentos de cuerpos de agua interiores en el Centro de México como materiales de construcción y fuente de elementos de tierras raras. *Acta Universitaria*, 34. <https://doi.org/10.15174/au.2024.4000>
- De la Rosa Hernández, P. (2018). Efectos Toxicológicos: Arsenico. *Beyond the word in the criminal evaluation. Visión Criminológica-Criminalística*. ISSN 2007-5804, 6(24), 36-43.
- Delgado Ramos, G. (2010). *Ecología política de la minería en América Latina*. Universidad Autónoma de México CEIICH.
- EPA 3050B. (2022). *Instructivo de ensayo. Determinación de metales totales en sedimentos por ICP óptico. EPA 3050B*. IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Ferrer Dufol, A. (2003). Intoxicación por metales. *In Anales del sistema sanitario de Navarra. Gobierno de Navarra. Departamento de Salud*, 26, 141-153.
- García Aragón , J., Díaz Delgado , C., Morales Reyes , P., Tejeda , S., & Zarazúa Ortega , G. (2003). Concentración de metales en sedimento y su relación con los patrones de deposición en la presa José Antonio Alzate, Estado de México. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVIII, N°4, 59-71.

- García Chevesich , P. (2010). *Documento técnico N° 22: Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas* (Vol. 1). phi-LAC.
- García Frores, M., & Maza Álvarez , J. (1998). *Origen y propiedades de los sedimentos*. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Hansen, A., León Zavala , A., & Bravo Inclán, L. (1995). Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma-Chapala. *Ingeniería Hidráulica en México, Vol. X, N. 3*, 55-69.
- Hawkes, S. J. (1997). What is a "Heavy Metal"? *Journal of Chemical Education*, 74(11). <https://doi.org/10.1021/ed074p1374>
- Iroume, A. (2003). Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. *Bosque (Valdivia)*, v.24 n.1, 125-135. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002003000100010>
- Jara Peña, E., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M., & Cano , N. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista Peruana de Biología*, 145-154. <https://doi.org/10.15381/rpb.v21i2.9817>
- Jiménez, P., Díaz, X., Naves Silva, M., Vega, A., Macêdo Medeiro, B., & Curi, N. (2024). Evaluación y comprensión de la contaminación por arsénico en suelos agrícolas y sedimentos lacustres de la parroquia Papallacta, Ecuador, a través de índices ecotoxicológicos. *Siembra, Vol. 11, Núm. 3*. [https://doi.org/10.29166/siembra.v11i3\(Especial\)](https://doi.org/10.29166/siembra.v11i3(Especial))
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). Mecánica de suelos . In *Tomo I, Fundamentos de la mecánica de suelos* (pp. 97-104). LIMUSA.
- Kluckhohn, F. (1937, marzo 3). "Se decreta una dictadura petrolera en México". *The New York Times*.

- Lino Guanes, R., Bello Mendoza, R., González Espinoza, M., Marcial Ramírez, N., Jiménez Otarola, F., & Musálem Castillejos, K. (2015). Concentración de metales en agua y sedimentos. *Tecnología y ciencias del agua*.
- Martínez Arroyo, A., Ruíz Suárez, L., Gavilán García, A., & Ramírez Muñoz, T. (2021). *Evaluación de la línea base de actividades mineras en la Sierra Gorda de Querétaro*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
- M-S-LC-I015. (2020). *Instructivo de lavado de material de vidrio y plástico*. IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- MTC. (2000). *Materia Orgánica en el Suelo ( Pérdida por ignición), Manual de Ensayo de Materiales*. DGCF.
- Naturales, S. d. (2002, diciembre 31). NOM-021-RECNAT-2000. *Diario Oficial de la Federación*, p. 7. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002#gs.c.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002#gs.c.tab=0)
- Nordberg, G., Langård, S., Sunderman, F., Mager Stellman, J., Osinsky, D., Markkanen, P., . . . Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2017). *Metales: Propiedades químicas y toxicidad productos químicos*. Recuperado de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/enciclopedia\\_de\\_salud\\_y\\_seguridad\\_en\\_el\\_trabajo\\_oit\\_tomo\\_2\\_capitulo\\_63.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/enciclopedia_de_salud_y_seguridad_en_el_trabajo_oit_tomo_2_capitulo_63.pdf)
- NOM-021-RECNAT-2000. (2000). *NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación.

- Núñez Miranda, A., Sánchez González, J., & Castillo Nieto, F. (2007). *Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio Pinal de Amoles, Querétaro*. Servicio Geológico Mexicano, Fideicomiso de Fomento Minero.
- Palau Ybars, A. (2004). La sedimentación en embalses. *DYNA Ingeniería e Industria, Vol. 79 N°7*, 26-30.
- Portal de Economía. (2025, 01 25). *Cartografía Minera México*. <https://portalags1.economia.gob.mx/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=1f22ba130b0e40d888bfc3b7fb5d3b1b>
- Ramos, G., & Carlo, G. (2010). La gran minería en América Latina, impactos e implicaciones. *Acta sociológica, 54*, 17-47.
- Salazar, M. T. (2010). La estructura territorial de la minería mexicana al inicio del tercer milenio. In G. C. Ramos, *Ecología Política de la minería en América Latina* (pp. 97-132). Universidad Autónoma de México-CEIICH.
- Sánchez, J. G. (1997). *Sedimentación en embalses. Capítulo 18 del Manual de Ingeniería de Ríos*. Instituto de Ingeniería UNAM.
- SCT, M-MMP-1-06-2003. (2003). *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*. Gobierno de México: <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-06-03.pdf>
- Secretaría de Economía. (2024, septiembre 30). *Minería*. Gobierno de México: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- Simões, J., Souza, M., Trzaskos, B., Angulo, R., & Besser, M. (2017). Possibilidade de aproveitamento dos sedimentos de dragagem do porto de Paranaguá. *Quat Environ Geosci*.
- Tejeda, S., Ávila Pérez, P., Zarazúa, G., Carapia Morales, L., Díaz Delgado, C., & Lugo, J. (2005). Distribución de metales pesados en sedimentos; Estudio del

curso alto del Río Lerma. In F. Rivera Trejo , A. Gutiérrez López, R. Val Segura , R. Mejía Zermeño, P. Sánchez Ruiz , F. Aparicio Mijares , & L. Díaz Flores , *La medición de sedimentos en México* (pp. 279-296). IMTA.

Trejo Reséndiz, P., & Duhne Ramírez, M. (2024). Presence of heavy metals in the Jalpan de Serra reservoir, Querétaro, México. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 20(1), 52-58. <https://doi.org/10.4067/s0718-235x2024000100052>

Trejo Reséndiz, P., Rodríguez Morales , J., Duhne Ramírez, M., Gutiérrez López, A., & Otero López , M. (2024). Dispersión De Arsénico, Plomo Y Cadmio En Embalses De Cuencas De Montaña, Situación Jalpan De Serra, Querétaro, México., (pp. 2467-2475). Medellín, Colombia.

Trenado Uribe , M., Rico Rodrigues , M., & Balzacar Regalado , R. (2009). *Evaluar el efecto genotóxico y teretogénico del plomo en renacuajos, en condiciones de laboratorio*. Santiago de Querétaro, Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro. [https://www.uaq.mx/investigacion/difusion/veranos/memorias-2009/3VeranoIntroduccion\\_12/9\\_Trenado\\_Uribe.pdf](https://www.uaq.mx/investigacion/difusion/veranos/memorias-2009/3VeranoIntroduccion_12/9_Trenado_Uribe.pdf)

U.S. Geological Survey . (2025). *Mineral commodity summaries 2025* . U.S. Geological Survey. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/mcs2025>

U.S. Geological Survey. (2009). *Mineral commodity summaries* . U.S. Geological Survey. <http://www.usgs.gov>

Unidad de Coordinación de Actividades Extractivas. (2024). *Boletín estadístico de la industria minero-metalúrgica*. Secretaría de Economía, Dirección General de Desarrollo Minero. Secretaría de Economía. Retrieved marzo 12, 2025, from

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/906899/Bolet\\_n\\_estad\\_stico\\_-\\_enero\\_2024.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/906899/Bolet_n_estad_stico_-_enero_2024.pdf)

Viana Ríos, R. (2018). Minería en América Latina y el Caribe, un enfoque socioambiental. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, Vol. 21 no. 2, 617-631. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1066>

White, R. (2001). *Evacuation of Sediments from Reservoirs*, Londres: hr Wallingford.

Zafra Mejía, C., Temprano González, J., & Tejero Monzón, I. (2009). Evaluación de la contaminación por escorrentía urbana: sedimentos depositados sobre la superficie de una vía. *Ingeniería e investigación*, VOL. 29 No. 1, 101-108.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Tabla de registro de datos para calcular la profundidad efectiva “L”

Lectura del Hidrómetro	L <sub>1</sub> (cm)	L <sub>2</sub> (cm)	V <sub>b</sub> (cm <sup>3</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	L (cm)
-5					
-4					
-3					
-2					
-1					
0					
...					
60					

**Anexo 2.** Tabla de registro de tiempos y lectura de pruebas

Tiempo (s)	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
20			
40			
60			
120			
180			

**Anexo 3.** Tabla de registro de tiempos y temperaturas

Tiempo (s)	Lectura	Temperatura
4 min		
8 min		
15 min		
30 min		
1 hora		
2 horas		
4 horas		
8 horas		
24 horas		
48 horas		

METALES PESADOS PRESENTES EN LOS CAUCES DE LA CUENCA PRESA JALPAN

**Anexo 4.** Tabla de diámetro de partículas por vía hidrómetro.

Muestra	Diámetro de partícula (mm)														
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
1.1	0.087	0.061	0.050	0.035	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
1.2	0.087	0.061	0.050	0.035	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
1.3	0.087	0.061	0.050	0.035	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
1.4	0.087	0.061	0.050	0.035	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
1.5	0.087	0.061	0.050	0.035	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
2.1	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
2.2	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
2.3	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
2.4	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
2.5	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
3.1	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
3.2	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
3.3	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
3.4	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
3.5	0.088	0.062	0.051	0.036	0.029	0.025	0.018	0.013	0.009	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001

# Anexo 5


Research paper

## Presence of heavy metals in the Jalpan de Serra reservoir, Querétaro, México

### Presencia de metales pesados en el embalse Jalpan de Serra, Querétaro, México.

Patricia Trejo Reséndiz<sup>1</sup>, Marcela Susana Duhne Ramírez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Civil Engineer, Graduate School of Engineering, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Mexico. |  0009-0005-6267-163X

<sup>2</sup> M.C. Environmental Hydrology, Graduate School of Engineering, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Mexico. |  0000-0002-5332-5648

\* Patricia Trejo Reséndiz (paty\_uaq@hotmail.com)

Received: 2024-04-25

Accepted for publication: 2024-05-30

Published: 2024-06-30

#### ABSTRACT

*The study was conducted at the Jalpan de Serra dam, Querétaro, Mexico. In a mountain watershed with a history of artisanal mining activity in the upper part, runoff feeds the reservoir, transporting mining tailings. The Jalpan dam has been used for drinking water supply, agricultural irrigation activities and recreational purposes as a Ramsar site. The reason for the study has been the relevance and social impact of the reservoir sediments as a source of diffuse pollution. The objective was to determine the concentration of arsenic, cadmium and lead in the sediment and to evaluate the level of risk to human health and the environment. The methodology consists of the analysis by atomic absorption carried out in three sites sampled in the superficial layer of 10 cm depth, samples obtained with a PVC tube of 7 cm diameter, identified, preserved for transfer and digested with nitric acid. The results show mean arsenic concentrations of 4.278 mg/kg, cadmium 0.323 mg/kg and lead 4.873 mg/kg. In conclusion, the sediment analyzed does not represent a risk to human health or the environment of the reservoir according to NOM-147-SE-MARNAT/SSA1-2004. This investigation demonstrates the lack of a policy or standard that establishes permissible limits for heavy metals in sediment.*

**Keywords:** Heavy metal, polluted sediments, mining tailings transport, water erosion.

#### RESUMEN

El estudio ha sido realizado en la presa Jalpan de Serra, Querétaro, México. En una cuenca de montaña con antecedentes de actividad minera artesanal en la parte alta, la escorrentía alimenta el embalse, transportando relaves mineros. La presa Jalpan se ha empleado para abastecimiento de agua de consumo humano, actividades de riego agrícola y fines recreativos como sitio Ramsar. El motivo de estudio ha sido la relevancia e impacto social que tienen los sedimentos del embalse como fuente de contaminación difusa. El objetivo ha sido conocer la concentración de arsénico, cadmio y plomo en el sedimento y evaluar el nivel de riesgo para la salud humana y del ambiente. La metodología consiste en el análisis por absorción atómica realizada en tres sitios muestreados en la capa superficial de 10 cm de profundidad, muestras obtenidas con un tubo de PVC de 7 cm de diámetro, identificadas, conservadas para su traslado y digeridas con ácido nítrico. Los resultados muestran concentraciones medias en arsénico de 4.278 mg/kg, cadmio 0.323 mg/kg y plomo 4.873 mg/kg. En conclusión, el sedimento analizado no representa riesgo para la salud humana o entorno del embalse según la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Esta investigación evidencia la falta de una política o norma que establezca los límites permisibles de metales pesados en sedimentos.

**Palabras clave:** Metales pesados, sedimentos contaminados, embalse, erosión hídrica.

## INTRODUCTION

### Water erosion

Water erosion is the process by which soil is lost under the action of water, affecting soil fertility, and consists of three stages; soil detachment, transport and sedimentation (Ares & Varni, 2016). Erosion begins at the moment of contact of the water drop on the soil and the magnitude of the phenomenon depends on the size and speed of precipitation (Pizarro et al., 2010).

The variables that make erosion possible are: climate, vegetation, leaf litter, soil type, topography, flow velocity and land use. Water fall factors, precipitation temperature and storm intensity influence the main climate variable, and in the case of land use, the most problematic human activity in sediments is mining, due to its contribution of toxic elements to water bodies (Brea & Balocchi, 2010).

### Heavy metals commonly found in reservoirs

A study of metal and arsenic contamination in sediment has been carried out in three different dams; La Boquilla, Las Virgenes and El Granero in Chihuahua, Mexico, in each of the dams two samples have been extracted, randomly, in the four seasons of the year, using a PVC tube of 7 cm in diameter and one meter long, and each sample with 1.5 kg of surface sediment (0-10 cm), for which one kilogram was used to obtain organic matter, measure pH, salinity and clay, and the remaining 0.5 kg was digested with concentrated nitric acid and hydrochloric acid in a 1:3 ratio, dried, crushed and homogenized, and analyzed for metals, As by atomic absorption spectrophotometer and Cu, Pb and Zn by optical plasma spectrophotometer. The concentrations observed for As and Pb did not change from one dam to another ( $P > 0.05$ ), Cu and Zn varied between dams ( $P < 0.05$ ), and for Cu and Pb they varied between seasons. The concentration ranges for each of the metals were for As from 13.25 to 18.05 mg kg<sup>-1</sup>, for Cu from 3.36 to 5.64 mg kg<sup>-1</sup>, for Zn from 105.54 to 130.66 mg kg<sup>-1</sup>, in the three dams the parameters were below the permissible limit, however, Pb exceeded the limit of 50 mg kg<sup>-1</sup> recommended by the regulations (Hernandez et al., 2008).

Sepúlveda, (2015) conducted a biochemical study in the Suata reservoir, Venezuela, to determine heavy metals in sediment, water and fish. He extracted two sediment samples; one at the dam and the other at the tail of the reser-

voir, with a separation of 3,270 m distance, using the surface layer of the sediment (0-10cm) were identified with date, coordinates and depth. The sediment was sieved, dried and pulverized, then digested with nitric acid and hydrofluoric acid, entered twice in the microwave oven, and at the end of the digestion, it was neutralized with 20 ml of 5% boric acid, The metals Ca, Mg, Al and Si were analyzed by Atomic Absorption Spectrophotometer, and Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, V, Mn, Fe and Ti were analyzed by Atomic Emission Spectroscopy with Inductively Coupled Plasma. The results indicated that Mn and Zn with very high risk in contamination, Ni, Cd and Cr with medium risk, range obtained through the Risk Assessment Code (RAC).

The analysis of heavy metals in the Cerrillos de Ponce reservoir, Puerto Rico (Ortiz, 2019) was performed to know the presence and concentration of heavy metals, through a simple sampling in water from three sites within the reservoir. The sampled points were at the beginning, in the middle and at the outlet (zone A, B and C) during nine months, by means of the plasma induction method coupled by optical spectroscopy emission, where, silver (Ag), arsenic (As), chromium (Cr), lead (Pb), vanadium (V), cadmium (Cd) and zinc (Zn), exceeded the limit of permissible values established by the World Health Organization (WHO) and the U.S. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. This study proved that the water level of the reservoir does have an impact on the concentration of heavy metals that exceed the limits of the applied standards.

### Toxicology of heavy metals

Arsenic (As) is naturally present in the air, water and soil, and by anthropogenic action in some foods, in dyes used in glass and ceramics, in metallurgy, mining, in the manufacture and use of insecticides, herbicides and fungicides. It is of grayish color of soft metallic aspect and it is easy to dissolve, by its characteristic without flavor, in the antiquity, it was used as a powerful poison, added in the drinks or foods of the victim; in small but constant doses, they cause weakness of the living being that consumes them. To measure the level of arsenic intoxication, four clinical forms are established; 1. Over-acute intoxication (evolves in hours). 2. Acute intoxication (weeks): abundant vomiting, diarrhea, abdominal pain, burning sensation in the stomach, odor in breath and mouth fluids, headache, weakness and dizziness; if not treated in time, it causes re-

nal, hepatic and cardiac damage.3. Subacute intoxication and 4. Chronic intoxication: constant intake of arsenic: digestive and nutritional disorders; (thinning, fatigue, lack of appetite, nausea, vomiting, diarrhea), catarrhal disorders (runny nose, headache and bronchial secretion), skin disorders (tanned tone with white spots, palmar and plantar hyperkeratosis that can evolve to epidermoid carcinoma, appearance of white lines on the nails) and neurological disorders (signs of "foot drop" and "claw hand") (Hernandez, 2018).

Lead (Pb) is a gray, soft heavy metal found in the earth's crust, mainly, in galena ores in the form of sulfide associated with other metals such as silver, copper, zinc, iron and antimony. It can be found in gasoline, manufacture and use of paints, pesticides, lead-soldered packaging, tableware and ceramics.

Long-term low-dose exposure through air, water or food causes chronic poisoning. The non-toxic blood concentration for an adult can be up to 10 µg/dl and in children measures should be taken when the concentration is 10 -14 µg/dl.

Ingestion may be by the respiratory route where metal fume or dust is absorbed by the lungs and concentrations retained in the body vary depending on particle size. Dietary intake: adults can absorb up to 30% of the proportion ingested, in the case of children, they absorb up to 50%.

Lead present in the blood is distributed to bones, teeth, liver, lungs, brain, spleen, kidney and has the capacity to cross the placenta. The means of disposal of some of the ingested lead is through feces and urine. Due to its similarity with calcium, lead interferes in several metabolic pathways in the mitochondria and interference with calcium in endothelial cells in brain capillaries produces a disruption in the intercellular junctions of the blood-brain barrier leading to brain edema. Renal alterations, intestinal alterations such as anorexia, constipation, vomiting and colicky pain may also occur. Reproductive health is affected by infertility in both sexes, spontaneous abortions, premature births and congenital anomalies (Ferrer, 2003).

Cadmium (Cd) has the characteristic of corrosion resistance and is therefore used for electroplating and coating of other metals, such as screws, locknuts, various aircraft parts and motor vehicles. Cadmium compounds can also be used as plastic stabilizers and pigments. In cell phones and other small devices it is present in rechargeable batteries.

Other uses of the compounds are: yellow and red pigments in plastics and dyes, colorants in pyrotechnics, photographic films, textile dyes and printing, manufacture of private mirrors, coating of electronic vacuum tubes, electroplating, glass hardening, among others.

Cadmium can be metabolized and accumulated through intestinal absorption. People with low iron reserves have the capacity to absorb up to 20% of the administered dose. By the pulmonary route through inhalation of tobacco smoke or exposure to cadmium in the environment. Metallothionein is a low molecular weight protein resulting from the ingestion of cadmium that has been lodged in the liver, this protein contributes to prevent cadmium ions from exerting their toxic effect, however, it is thought that renal failure is related to the decrease in the production of metallothionein. Importantly, some of the cadmium that enters the human body is excreted in the urine; however, the process of cadmium excretion is slow. The retention period of Cd varies from 7 to 30 years, allowing its accumulation and health effects.

Two levels of cadmium toxicity are considered; Acute: in concentrations higher than 1 mg/m<sup>3</sup> in air, with symptoms of chemical pneumonitis and/or pulmonary edema, starting with flu or fever in a period of 1 to 8 hours after exposure. Food poisoning at concentrations greater than 15 mg/L with symptoms of nausea, vomiting, abdominal pain, diarrhea. The main sources of contamination in food are pots or pans with cadmium-based coatings or welds in hot or cold beverage machines. Chronic toxicity: mainly in occupational exposure to cadmium fumes or dust, affecting the respiratory tract, renal lesions and anemia. In very high concentrations, yellow stains on teeth and loss of sense of smell may be observed. In 1993 the International Agency for Research on Cancer (IARC) determined that cadmium should be considered carcinogenic to humans. (Nordberg, 2017).

### **Characteristics of the Jalpan de Serra Dam, Queretaro, Mexico.**

The Jalpan de Serra dam, Querétaro, Mexico, was built in the Jalpan riverbed in the 1970s, with a capacity of eight million cubic meters, in an area of 68 ha. Since its construction it has served as the main source of supply for agricultural, domestic, small-scale fishing, and recreational activities (Ramsar, 2003). The reservoir is fed by runoff from the upper parts of the basin, which is considered a mountain basin. The upper part of the basin has been used for years for artisanal mi-

ning, where tailings dams are usually located near the main riverbeds, and sediments have been exposed to transport by precipitation runoff. The average slope of the basin is 30%, which indicates that sediments are easily transported. Given the morphological characteristics, land use, and anthropogenic activities, it is possible that sediments with heavy metals are deposited in the Jalpan dam reservoir. The contaminating elements present in the sediments can be incorporated into the water chain and, consequently, into the trophic chain and bioaccumulation in living beings can cause irreversible damage due to intoxication. From the above, the present work aims to analyze the sediment of the reservoir to know the quality of water and soil in relation to the presence of heavy metals. Under this objective, a biochemical study is carried out in sediments to determine the concentrations of heavy metals in the Jalpan Dam reservoir, characterization of the basin and graphic representation of the pollutants in the reservoir.

**METHODOLOGY**

Based on the bibliography consulted, three sampling points were defined, one at the beginning of the dam, the middle point and at the end of the dam, near the curtain as shown in Figure 1 and their respective geographic locations in Table 1. Samples were extracted at a depth of 10 cm, using a 7 cm diameter PVC pipe (Figure 2). The samples were extracted during the dry season in order to reach points of greater depth.

**Figure 1: Location of sites to be sampled within the reservoir.**



Source: Own elaboration.

**Table 1: Geographical location of sampled sites.**

No. Sample	Description	Coordinates	
		X	Y
1	Start of reservoir	18.5908	-99.484615
2	Midpoint	21.195539	-99.475791
3	Near curtain	21.205375	-99.471275

Source: Own elaboration.

**Figure 2: Sample extraction.**



Source: Own elaboration

The characteristics of the sample extraction site were as follows:

Sample 1: at the beginning of the reservoir with abundance of organic matter and vegetation and presence of flowing water (Figure 2). Sample 2: middle point of the reservoir with fine sediment, low presence of vegetation cover and low concentration of organic matter, saturated sediment near the water at rest (Figure 2.1).

Sample 3: very close to the outlet point of the reservoir (curtain) fine sediment and presence of sand in saturation, without organic matter or vegetation (Figure 2.3).

**Figure 2.1: Sample 2**



Source: Own elaboration

**Figure 2.3: Sample 3**



**Figure 4: Sample preservation.**

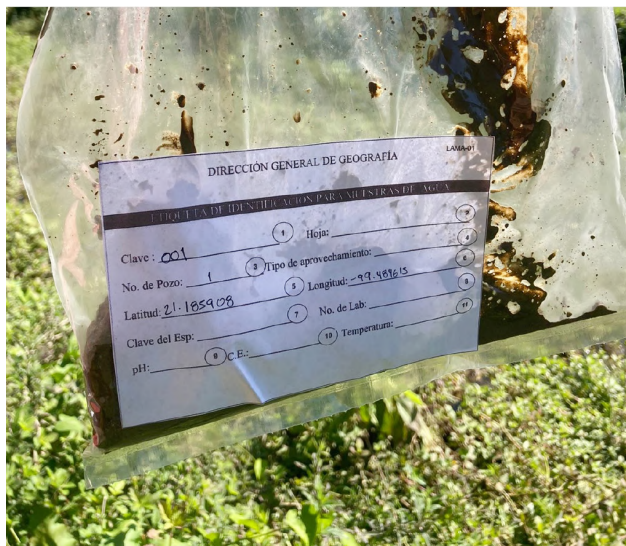


Source: Own elaboration.

Each sample was labeled with its respective geographic location and sample number (Figure 3).

The samples were placed in the drying oven, each sample placed in a container and identified at a temperature of 35°C to achieve evaporation of the liquid (Figure 5).

**Figure 3: Labeling and identification of samples.**



Source: Prepared by the authors.

**Figure 5: Oven drying of samples.**



Source: Own elaboration.

The samples were placed in a cooler with ice to keep them at a temperature of approximately 4°C for transport and preservation (Figure 4).

After drying, they were crushed with the help of the mortar and stored in the desiccator to remove all moisture (Figure 6).

**Figure 6: Shredding and moisture extraction.**



Source: Own elaboration.

Once the sample was dry, crushed and homogenized, the quartering method was used to select 2 g of sediment for digestion. The digestion was carried out with nitric acid, hydrochloric acid, and was calibrated to 100 mL with ultra-pure water (Figure 7).

**Figure 7: Digestion of samples.**



Source: Own elaboration.

After digestion, the samples were sent to the laboratory for reading in the Atomic Absorption Spectrophotometer (Figure 8).

**Figure 8: Atomic Absorption Spectrophotometer.**



Source: Own elaboration.

**RESULTS:**

Analyzed samples were obtained the values of the concentrations of arsenic, lead and cadmium metals representative of the surface layer of 10 cm depth of the reservoir in the three points sampled in the dry season, is illustrated in Table 2.

**Table 2: As, Pb and Cd concentrations results**

Sample	Results in mg/kg		
	Arsenic	Lead	Cadmium
1	4.233	3.383	0.342
2	4.234	6.311	0.339
3	4.368	4.925	0.287

Source: Own elaboration.

It can be observed that arsenic has a homogeneous behavior in the reservoir, with a coincidence of 96.93% between point one and point three, which show the limits of greatest difference of 0.134 mg/kg between them. This indicates that the distribution of arsenic within the reservoir does not have a specific point where the concentration is a red spot or indicative of excess accumulation of the contaminant.

Lead was found in higher concentration in the sample obtained at the midpoint of the reservoir and in lower amount in sample one which was obtained at the beginning of the dam, with a difference of 2,928 mg/kg, that is, sample one represents 53.61% of the concentration of sample two.

In comparison with Cadmium, which was found in lower quantity at point three (outlet) and in the rest of the points it was found in similar concentrations.

**DISCUSSION**

It is important to mention that, in order to evaluate the permissible limits of metal concentrations in sediments of inland waters, in Mexico there is no specific law that dictates the maximum or minimum concentrations, it can be compared with NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Table 3 shows the permissible limits for the metals analyzed.

**Table 3: Heavy metal concentrations for agricultural land use.**

Total reference concentrations per soil type	
Contaminant	Agricultural use (mg/kg)
Arsenic	22
Cadmium	37
Lead	400

Source: Own elaboration with information from NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

On the other hand, Table 4 shows the limits established in the Canadian Environmental Quality Guidelines (CEQG) for sediments of inland water bodies divided into two: the Interim Sediment Quality Guidelines (ISQG) in which it is expected that there will be no negative biological effects on the environment, otherwise the Probable Effect Level (PEL).

**Table 4. Permissible limits for metals in sediments established by the Mexican (NOM) and Canadian (CEQG) standards.**

Norm	As	Cd	Pb
NOM	22	37	400
CEQG	5.9	0.6	35
ISQG PEL	17	3.5	91.3

Source: own elaboration with information from (LAINO GUANES, AND OTHERS, 2015).

The phytoremediation study by Jara Peña, et al. (2014) found that lead can be absorbed by plant roots, mainly by *Fuertesimalva echinata*. That is, the presence of plant cover influences the concentration of heavy metals, due to the fact that some plants have the function of bioremediation of the soil where they are found.

## CONCLUSION

Finally, it can be concluded that the concentrations of arsenic, cadmium and lead found in the sediment layer at a depth of 10 cm in the Jalpan Dam do not exceed the permissible limits in the applied regulations, that it is safe to use the analyzed layer for agricultural purposes (in case of de-silting) because it does not represent a risk to human health or to the flora and fauna that inhabit it. In future studies, a more exhaustive analysis can be carried out by strata at greater depth. With respect to the vegetation found in the study area, two predominant plant species, *Acmella caulirhiza* and *Phyla lanceolata* (Michx.) Greene, were identified, indicating an opportunity to carry out analyses to determine their phytoremediation capacity.

## REFERENCES

**Jara Peña, E., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M., & Cano, N. (2014).** Phytoremediation capacity of five high andean species from soils contaminated with heavy metals. *Revista Peruana de Biología*, 145-154.

**Ares, M. G., & Varni, M. (30 de AGOSTO de 2016).** ¿Qué

es la erosión hídrica y cómo la estudiamos en el IHLA? Obtenido de UNICEN: <https://www.unicen.edu.ar/content/%C2%BFqu%C3%A9-es-la-erosi%C3%B3n-h%C3%ADdrica-y-c%C3%B3mo-la-estudiamos-en-el-ihlla>

**Brea, J. D., & Balocchi, F. (2010).** Documento Técnico N° 22: Procesos de erosión – sedimentación. UNESCO.

**Ferrer, A. (2003).** Intoxicación por metales. In *Anales del sistema sanitario de Navarra* (Vol. 26, ). Gobierno de Navarra. Departamento de Salud., pp. 141-153.

**Hernández, P. M. (2018).** Efectos Toxicológicos: Arsénico. VISIÓN CRIMINOLÓGICA-CRIMINALÍSTICA.

**Hernández-García, Y., Sosa-Cerecedo, M., Moreno, M., Alcalá, J., & Puga, S. (2008).** Evaluación de la contaminación por metales pesados y arsénico en. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(2), 1-6. doi:<https://revista.itson.edu.mx/index.php/rln/article/view/109>

**Laino Guanes, R. M., Bello Mendoza, R., González Espinosa, M., Ramírez Marcial, N., Jiménez Otárola, F., & Musálem Castillejos, K. (2015).** Metal concentrations in water and sediments in the upper Grijalva river basin, Mexico-Guatemala border. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 61-74.

**Nordberg, G. & (2017).** Metales: Propiedades químicas y toxicidad productos químicos. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT,2,63>.

**Ortiz, A. J. (2019).** Heavy metal analysis at the Cerrillos de Ponce Reservoir, Puerto Rico. *Interamerican Journal of Environment & Tourism*.

**Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Valdés, R., Olivares, C., & Baloc, F. (2010).** EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DE CHILE CENTRAL. *AquaLac*, 2(2), 1-11. doi:<https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2010-v2-2-01>

**Ramsar. (17 de septiembre de 2003).** Ramsar.org. Obtenido de Convencion de Ramsar: <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX1352RIS.pdf>



## XXXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA MEDELLÍN-COLOMBIA OCTUBRE 01-04 2024

### Anexo 6

#### Dispersión De Arsénico, Plomo Y Cadmio En Embalses De Cuencas De Montaña, Situación Jalpan De Serra, Querétaro, México.

Patricia TREJO RESÉNDIZ<sup>1</sup>, José Alberto RODRÍGUEZ MORALES<sup>2</sup>, Marcela Susana DUHNE RAMÍREZ<sup>3</sup>, Alfonso GUTIÉRREZ LÓPEZ<sup>4</sup> Martha Leticia OTERO LOPEZ<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Querétaro, México  
patricia.trejo@uaq.edu.mx

<sup>2,3,4</sup> Universidad Autónoma de Querétaro, México  
marcela.duhne@uaq.mx  
jose.alberto.rodriguez@uaq.mx  
alfonso.gutierrez@uaq.mx

<sup>5</sup>Escuela Nacional de Ciencias Biológicas Ingeniería en Sistemas Ambientales  
Instituto Politécnico Nacional  
moterol@ipn.mx

#### RESUMEN

La erosión hídrica es cada vez más frecuente, los factores de precipitación-escorrentía, falta de vegetación y las altitudes altas dispersan contaminantes a las partes bajas de la cuenca, creando ambientes de riesgo para el ambiente y la salud. Las cuencas de montaña están sujetas a este evento, tal es el caso, del embalse Presa Jalpan, el punto más bajo de la cuenca de montaña conocida como “Cuenca Presa Jalpan”. En la parte alta de la cuenca se ubican diversas minas inactivas, es por esta razón que se han analizado los sedimentos del embalse en temporada de estiaje, debido a su importancia de almacenamiento de agua para uso doméstico y agricultura. Mediante tres puntos analizados, uno a la entrada del embalse, punto medio y punto tres a la salida del flujo. Por cada punto de referencia se realizaron cinco submuestras a estratos de 30 cm de profundidad, a digestión acida y las concentraciones fueron leídas con el espectrofotómetro de absorción atómica. Los resultados indican altas concentraciones de arsénico que sobrepasan los niveles permisibles según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para uso de suelo agrícola, el cadmio y el plomo están por debajo de los límites, los contaminantes disminuyen de manera horizontal y vertical en sus concentraciones. Los objetivos del estudio han sido conocer las concentraciones de arsénico, cadmio y plomo en el sedimento, evaluar si existe una situación de riesgo para la salud y finalmente entender el comportamiento de estos contaminantes en el sedimento analizado en la temporada de sequía.

#### 1. Introducción

Las actividades mineras han sido un referente para el crecimiento de la económica de los países. La minería artesanal o a pequeña escala complica el monitoreo por los organismos gubernamentales y ambientales para fines de evaluar el impacto al medio ambiente y a la salud humana.

Las minas artesanales suelen trabajar bajo condiciones desfavorables para los mineros, la falta de equipo especializado para su protección les deja susceptibles a contraer enfermedades producto de la inhalación, contacto o ingesta de vapores, polvos y restos de residuos producto de la extracción de los minerales. Sin



de 46,660 m<sup>3</sup>/año de suelo llega al embalse producto de la erosión hídrica de la cuenca, actualmente la situación de azolve es de 27.41%. La presa de Jalpan al pertenecer a sitios RAMSAR no debe permitirse que los sedimentos sean del 50% de la capacidad, esto implicaría un riesgo ecológico. (CEA, 2024)

Expertos e interesados en la materia se han propuesto implementar estrategias para reducir el aporte de sedimento al embalse, por otra parte, el gobierno municipal realizó obras de desazolve con maquinaria pesada. El destino del azolve extraído se ha utilizado principalmente para jardinería y relleno de algunos predios, siendo la agricultura también una opción para uso y destino del sedimento con mayor contenido de materia orgánica. Sin embargo, debido a las minas en la parte alta de la cuenca deben evaluarse a detenimiento las características y contaminantes del sedimento para evitar su dispersión y la posible introducción al ciclo de la cadena trófica.

Trejo & Duhne, (2024), iniciaron investigaciones para conocer las concentraciones de arsénico, cadmio y plomo en la capa superficial (0-10 cm de profundidad) del embalse, encontrando concentraciones dentro de los parámetros permisibles según la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

## 2. Metodología

### 2.1. Obtención de muestras

Las muestras se tomaron en tres puntos dentro del embalse, una en la entrada, punto medio y la última al final del embalse, cerca de la cortina. Debido a la escasez de agua y precipitaciones tardías, se eligió la temporada de estiaje, cuando el embalse estaba a una capacidad aproximada de 30%, facilitando así, el muestreo en zonas donde años anteriores no se tenía acceso. En la figura 2 se observa la ubicación espacial de los puntos muestreados, seguida de una fotografía aérea del estado de la capacidad de almacenamiento.



**Figura 2:** Ubicación espacial de los puntos analizados y fotografía aérea (cortesía de Isaías Cruz) de la situación del embalse, marzo 2024.

En cada punto se realizaron cinco submuestras por estratos de 30 cm de profundidad; en el caso del punto uno, la extracción de muestras se hizo mediante un pozo a cielo abierto, con poca cobertura vegetal en la superficie. El sedimento se observó seco, con presencia de materia orgánica y de textura arenosa. Como ya se mencionó, el embalse presenta un 30% de azolve, por esta razón el gobierno local inicio actividades de extracción con maquinaria, facilitando la labor de muestreo. En la figura 3 se puede observar el punto uno de estudio, los estratos de sedimentos son claramente visibles.



**Figura 3.** Punto uno de muestreo zona de entrada al embalse.

La zona dos de muestreo, fue el punto medio entre la entrada y la cortina del embalse, aquí se observó presencia de cobertura vegetal al ras de suelo, se identificó la especie de la planta *phyla lanceolata* abundante en la zona, en etapa de floración. El sedimento en los estratos uno y dos (correspondientes de cero a 30 cm de profundidad) presentaban humedad, y el resto se encontraron en estado de saturación, en textura de arenosa a fina conforme aumentaba la profundidad de extracción. En la figura 4 se observa el lugar muestreado, también, es posible identificar la profundidad de la presa, delimitada por el cambio de cobertura vegetal.



**Figura 4.** Punto dos de muestreo, punto medio longitudinal del embalse. Obtención de muestra mediante barreno muestreador.

La muestra tres, obtenida con barreno muestreador de suelo/ sedimento cerca de la cortina del embalse, se observó el tamaño de partícula más fina, sin presencia de materia orgánica, cobertura vegetal escasa, en el estrato uno sedimento compactado y seco formando prismas, en la capa dos, el sedimento con baja humedad y presencia de gravas y arenas, en los estratos tres hasta cinco se observó saturación predominando partículas finas. Figura 5

Es de importancia mencionar, que se obtuvo una muestra fuera del embalse para referencia de blanco que permitiera comparar los resultados e indagar sobre el origen de la fuente del contaminante.

## 2.2. Digestión de muestras

Posterior a la extracción de muestras, cada una de ellas fue resguardada en bolsa plástica y debidamente etiquetada y conservada en hielera a una temperatura de 4°C para su transporte y análisis.



**Figura 5.** Punto de muestreo número tres, a la salida del embalse, sedimento compactado y agrietado formando bloques prismáticos en el estrato superior. Fotografía aérea cortesía de Isaías Cruz.

El proceso de digestión, se obtuvo su peso inicial y secado al horno hasta eliminar humedad y peso final, posteriormente se homogenizo la muestra mediante el método del cuarteo y se extrajeron  $2.0 \pm 0.1$  gramos. La digestión fue realizada agregando diversas dosis de ácido nítrico y calentar de 90-95°C hasta asegurar oxidación.

Se agregó peróxido de hidrógeno para asegurar la eliminación de materia orgánica, por último, se agregó ácido clorhídrico, se aforo a un volumen de 100 ml con agua ultra pura y filtrado con papel filtro no. 42.

Se envió al laboratorio para la lectura de metales de arsénico, plomo y cadmio en el espectrofotómetro de absorción atómica.

## 3. Resultados

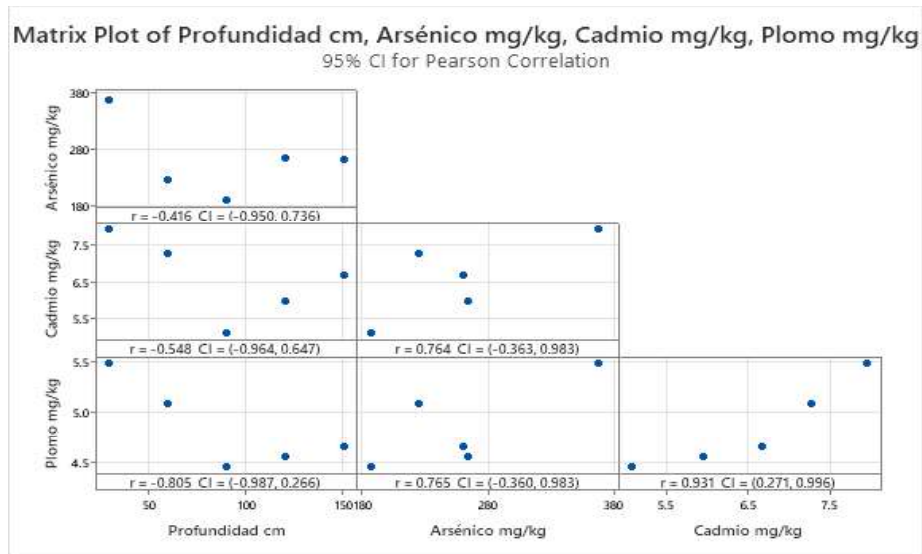
La lectura del espectrofotómetro de absorción atómica de los metales de arsénico, plomo y cadmio se muestran en la tabla 1. Se observa a primera vista que los contaminantes se concentran en mayores cantidades a la entrada del embalse y van disminuyendo al punto de salida, adicional, en cada punto muestreado, los contaminantes reducen su concentración vertical a mayores profundidades.

Particularmente en la zona uno de muestreo, el estrato tres correspondiente a la profundidad de 30 a 60 cm se presentan menores concentraciones de arsénico, plomo y cadmio. Siendo el estrato de 0 a 30 cm las mayores concentraciones como se muestra en la figura 6. El análisis estadístico muestra poca correlación de profundidad vs metales, sin embargo, las concentraciones de metales sí están relacionadas unas a otras, en el caso de As-Pb tiene una correlación de  $r=0.765$ , para As-Cd una  $r=0.764$  y para el Cd-Pb una  $r=0.931$ , lo cual indicaría que el plomo y cadmio se comportan de manera similar en el sedimento analizado. En la tabla 2 se resumen las correlaciones.

El análisis de correlación para la muestra 2 indica baja correlación en los componentes de profundidad vs metales, correlaciones menores en As-Cd con  $r=0.433$ , As-Pb con  $r=0.505$  y para el Cd-Pb  $r=0.622$ , es decir, en el punto medio de la presa la correlación entre metales es menor que en el punto de entrada, figura 7.

**Tabla 1.** Resultados de concentraciones de arsénico, cadmio y plomo en el sedimento.

ID MUESTRA	Profundidad cm	Arsénico mg/kg	Cadmio mg/kg	Plomo mg/kg
1.1	30	367.74	7.94	5.49
1.2	60	225.54	7.27	5.08
1.3	90	187.68	5.09	4.45
1.4	120	264.03	5.96	4.56
1.5	150	260.08	6.67	4.65
2.1	30	275.65	5.87	4.18
2.2	60	247.09	6.43	4.37
2.3	90	236.87	6.99	4.2
2.4	120	291.29	7.88	4.38
2.5	150	227.06	6.19	4.15
3.1	30	100.86	2.53	3.93
3.2	60	185.32	3.52	4.55
3.3	90	77.31	2.28	3.65
3.4	120	3.57	4.79	1.28
3.5	150	0.93	2.02	0.86



**Figura 6.** Análisis de correlación de Pearson para la muestra 1

**Tabla 2.** Resumen de correlaciones de profundidad, Arsénico, cadmio y plomo

	Profundidad cm	Arsénico mg/kg	Cadmio mg/kg	Plomo mg/kg
Arsénico mg/kg	-0.416			
Cadmio mg/kg	-0.548	0.764		
Plomo mg/kg	-0.805	0.765	0.931	

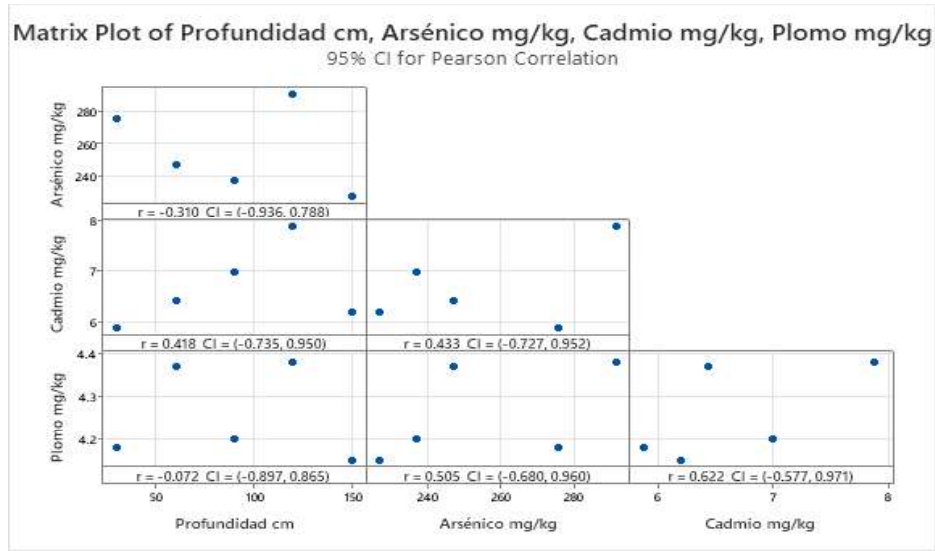


Figura 7. Análisis de correlación de Pearson para la muestra 2

Tabla 3. Resumen de correlaciones de profundidad, Arsénico, cadmio y plomo

	Profundidad cm	Arsénico mg/kg	Cadmio mg/kg	Plomo mg/kg
Arsénico mg/kg	-0.310			
Cadmio mg/kg	0.418	0.433		
Plomo mg/kg	-0.072	0.505	0.622	

Finalmente, en la muestra 3 existe una correlación entre profundidad con los metales de arsénico y plomo, debido a que en las submuestras 2,3,4 y 5 disminuyen las concentraciones de manera inversa a la profundidad, a mayor profundidad menor concentración. La correlación entre metales el As y Pb se observa un comportamiento similar en el sedimento analizado, figura 8.

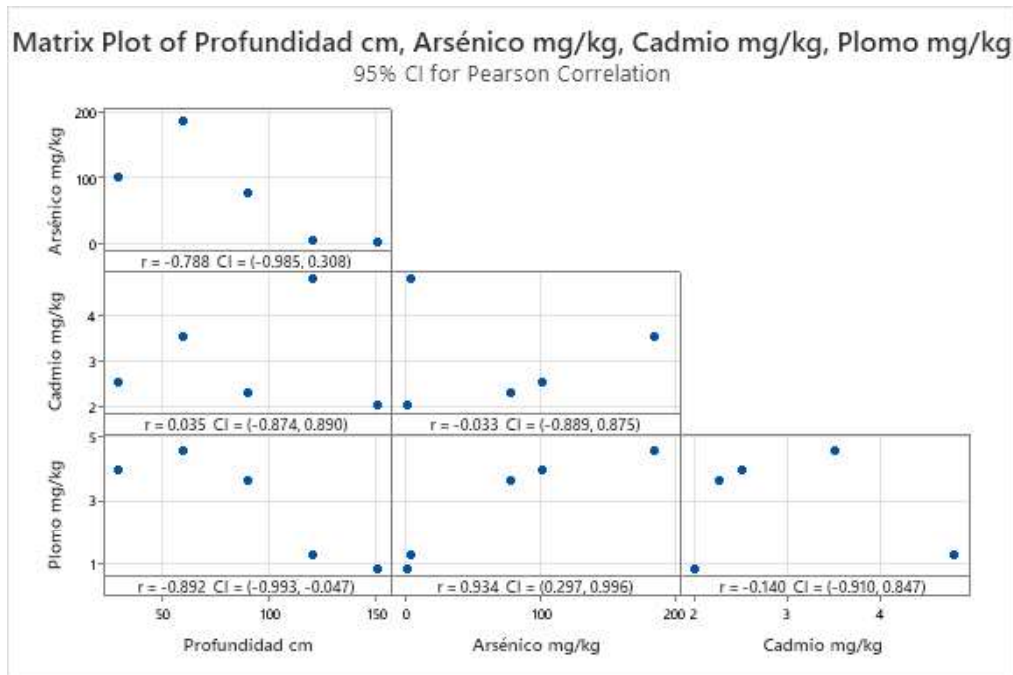


Figura 8. Análisis de correlación de Pearson para la muestra 3

**Tabla 4.** Resumen de correlaciones de profundidad, Arsénico, cadmio y plomo

	Profundidad cm	Arsénico mg/kg	Cadmio mg/kg
Arsénico mg/kg	-0.788		
Cadmio mg/kg	0.035	-0.033	
Plomo mg/kg	-0.892	0.934	-0.140

Los resultados de la muestra extraída fuera del embalse, como referencia de blanco, mostro concentraciones de As= 11.24 mg/kg, Cd=0.28 mg/kg y Pb=0.38 mg/kg, es importante mencionar, que el lugar donde se obtuvo la muestra se ubica a aproximadamente 5 m de distancia de una vialidad de terracería, a las márgenes del embalse.

#### 4. Discusión y conclusiones

El origen de los contaminantes en relación a las concentraciones de arsénico encontradas pudiera tener su origen en actividades antropogénicas (Aveiga, *et al.*, 2020).

La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 indica los valores permisibles para el uso de suelo agrícola, se hace la comparación con esta norma al no existir una normativa o ley específica para las concentraciones de metales pesados en sedimentos de aguas continentales, además, que el sedimento frecuentemente se destina para enriquecer suelos en la agricultura. En la tabla 5, se observan los límites permisibles. (SEMARNAT/SSA1, 2004)

**Tabla 5.** Concentraciones de referencia totales por tipo de uso de suelo

Contaminante	Uso agrícola/Residencial/comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico	22	260
Cadmio	37	450
Plomo	400	400

Elaboración propia. Fuente: NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

El arsénico excede los límites permisibles en al menos 13 de las 15 submuestras analizadas para el uso de suelo agrícola, sin embargo, en los puntos 1 y 2 el 50% de las submuestras exceden el límite para uso de suelo industrial.

La contaminación de arsénico puede tener el origen la parte alta de la cuenca, acumulándose, en este caso en la zona de menor elevación ( Zaharescu *et al.*, 2009).

El Cadmio y el Plomo se encuentran por debajo de los límites permisibles.

El plomo se relaciona en un 80% con la profundidad analizada en los puntos 1 y 3, el cadmio con un 40-55% en los puntos 1 y 2, a diferencia del arsénico que tiene relación en un 78% en el punto 3. La correlación profundidad vs metal no da indicios de algún comportamiento específico en las concentraciones de metal con profundidad. No se observa un patrón.

En el punto 3, el arsénico se comporta de manera similar que el plomo con una correlación de 0.934, sin embargo, en el punto 1; el cadmio y el plomo son los que se comportan de manera similar con un 0.931 de correlación.

Se puede concluir, que los contaminantes disminuyen de forma horizontal y verticalmente, las concentraciones mayores son la entrada al embalse y en los primeros estratos, disminuyendo en dirección del flujo de salida y a mayores profundidades.

Los resultados de la muestra obtenida fuera del embalse, como blanco, indica que el arsénico, plomo y cadmio se pueden encontrar de manera natural en esta cuenca. Sin embargo, se recomienda hacer más muestreos fuera del embalse para determinar si los contaminantes son parte natural del suelo.

Los comportamientos del arsénico, plomo y cadmio son complicados de predecir evaluando solo la profundidad, concentración y distancia al punto de entrada. Se puede trabajar en el análisis granulométrico y cantidad de materia orgánica para entender su comportamiento dentro de los embalses.

La evaluación de dispersión de los contaminantes se puede hacer no solo en temporada de estiaje, sería interesante ver cómo se comportan con el sedimento saturado, es decir, cuando el embalse está al 100% de su capacidad.

Al ser una cuenca de antecedentes mineros, se recomienda hacer un modelo de impacto de la minería en la cuenca, de tal manera que sea observable el rastro de contaminantes no solo en el embalse, sino también, en los causes dentro de la cuenca. (Fernández et al., 2018)

### Agradecimientos

Para la Universidad Autónoma de Querétaro y a CONAHCYT por ser parte del financiamiento de esta investigación

### Referencias

- Aveiga Ortiza, A. M., Noles Aguilar, P. J., Peñarrieta Macías, F., & Murgueitio Herrera, E. (2020). Distribución de arsénico en agua superficial y sedimento en la cuenca del río carrizal, manabí - ecuador. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 86(3), 260-275. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v86i3.299>
- Zaharescu, D. G., Hooda, P. S., Fernandez, J., Palanca Soler, A., & Burghelea, C. I. (2009). On the arsenic source mobilisation and its natural enrichment in the sediments of a high mountain cirque in the Pyrenees. *Journal of Environmental Monitoring*, 11(11), 1973-1981. <https://doi.org/http://doi.org/10.1039/b912432b>
- Alviz Gonzales, C. D., & Alviz Gonzales, L. F. (17 de 12 de 2021). Análisis comparativo en los niveles de concentración de metales pesados (As, B, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn y Pb) en sedimentos, entre la zona alta y zona baja del río Locumba, región Tacna, 2021. Provincia de Jorge Basadre, Perú: Universidad Nacional de Moquegua.
- CEA. (2024). Estudio de la Disponibilidad y Calidad del Agua y del Funcionamiento Hidrológico de Presa Jalpan, Jalpan de Serra del Estado de Querétaro y sus Cuencas de Aportación Hídrica y Sedimentos. *2do Foro regional sobre la problemática de la cuenca hidrológica de la Presa Jalpan*. Jalpan de Serra, Querétaro, México: CEA.
- Fernández, N., Camacho, L. A., McIntyre, N., Huguet, C., & Pearse, J. (2018). PROPUESTA METODOLÓGICA PARA MODELACIÓN DEL IMPACTO DE LA MINERÍA DE CARBÓN EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE CUENCAS DE MONTAÑA. *XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA BUENOS AIRES, ARGENTINA*.
- Mora, A., Jumbo Flores, D., González Merizalde, M., & Bermeo Flores, S. A. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca Río Puyango, Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(4), 385-397. <https://doi.org/https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.02>
- SEMARNAT/SSA1. (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. *Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/*. Ciudad de México, México: Diario Oficial.
- Trejo Reséndiz, P., & Duhne Ramírez, M. S. (2024). Presence of heavy metals in the Jalpan de Serra reservoir, Querétaro, México. *Interamerican Journal of Environment and Tourism*, 52-58 <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-235X2024000100052>.
- Zamora Echenique, G., Trujillo L., E., & Llanque C., M. (2017). Propuesta para el desarrollo sustentable de la pequeña minería en Bolivia. *Revista de Medio Ambiente y Minería*(3), 3-15.