



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

TESIS

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE
ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS (Fe, Zn,
Pb, Cu, Ag, Cd) EN SEDIMENTOS RECIENTES Y
AGUA SUPERFICIAL DE LA PRESA LOS ÁNGELES
13159 (CONAGUA): IMPLICACIONES
AMBIENTALES.**

Para obtener el título de

Licenciado en Ingeniería en Geología Ambiental

PRESENTA

José Guadalupe Martínez Rodríguez
Naara Noemí Vásquez Avila

Director (a)

Dr. Enrique Cruz Chávez

Comité tutorial

Dra. Ingrid Árcega Santillán
Dr. Fred Yoan Pérez Corona
Dr. David Quiroz Jiménez

Pachuca de Soto, Hidalgo., Diciembre, 2023



Mineral de la Reforma, Hgo., a 11 de diciembre de 2023

Número de control: ICBI-D/1932/2023

Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
 DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado a los Pasantes de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Naara Noemí Vásquez Ávila** y **José Guadalupe Martínez Rodríguez**, quien presentan el trabajo de titulación **"Caracterización geoquímica de elementos potencialmente tóxicos (Fe,Zn,Pb,Cu, Ag, Cd) en sedimentos recientes y agua superficial de la presa Los Ángeles 13159 (CONAGUA): Implicaciones Ambientales"**, después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente Dra. Ingrid Arcega Santillán

Secretario: Dr. Fred Yoan Pérez Corona

Vocal: Dr. Enrique Cruz Chávez

Suplente: Dr. Jesús David Quiroz Jiménez

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
 Director del ICBI



OAAS/YCC

Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
 Carboneras. Mineral de la Reforma, Hidalgo,
 México. C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx



I. Dedicatorias

A mis padres (José Guadalupe y Nancy) por su apoyo incondicional, porque siempre han creído en mí y han hecho hasta lo imposible para verme lograr mis sueños, los amo con todo mi corazón.

A mis hermanas (Yoma y Sary) gracias por ser mis amigas, confidentes y compañeras de vida, las amo.

A mi hermano gemelo (Enrique †) porque me enseñaste a hacer realidad cada sueño como lo hacías tú, te amo más allá de esta vida terrenal.

A mi sobrina (Julie) porque cada risa tuya me recuerda lo bonito que es vivir; y a mi cuñado (Fidel) por su apoyo y sus consejos de vida, les quiero mucho.

A mis abuelitos (Enrique y Sarita) por su cariño y apoyo en toda mi vida, les amo siempre.

A mi familia (Tíos, tías, primas y primo) por tanto amor que me dan, vivo agradecido.

A mi compañera de tesis, (Naara) por tu amistad, cariño, entrega y dedicación para este trabajo.

A mis amigos y amigas, gracias por creer siempre en mí, les quiero muchísimo.

En el culmen de esta travesía académica, no puedo más que agradecer primeramente al Creador. Cada desafío ha sido una oportunidad para crecer, y cada logro ha sido una manifestación de su generosidad infinita.

A mi amada madre Raquel por cultivar en mi corazón el hermoso deseo de conectar con las maravillas de nuestro generoso planeta. Además, agradezco profundamente por haberme mostrado el camino para convertirme en un ser lleno de fe, perseverancia, valentía, amabilidad, nobleza, responsabilidad e infinita gratitud. A mi hermana Bathse, por ser otro pilar importante en mi formación, por sus consejos y esa calidez con la que siempre me acompaña en este hermoso viaje llamado vida. Mis amadas virtuosas, ambas son el ejemplo más grande de liderazgo, nobleza, perseverancia, humildad, amor y creatividad.

A mi hermosa familia Saraí, Teté, Abi, Jacob, David, abue Estefana y tíos por brindarme aliento y amor en cada paso que doy, son luz cálida en momentos de vulnerabilidad, me impulsan a ser mejor ser humano día con día.

A mi compañero de tesis José Guadalupe, por su amistad, por permitirme ser parte de este proyecto, por el conocimiento compartido, las experiencias, te admiro y deseo que este sea uno de muchos éxitos más.

A Mery, Max, Mara, Verania, Karla y Ariel porque son parte importante de esta etapa, me hacen creer que los amigos son familia. Agradezco el apoyo, el amor, las aventuras, el respeto, empatía y lealtad que cada uno me brinda.

Con inmenso cariño a esos seres que le dan sentido a mi vida, los que me muestran su fidelidad, lealtad y amor incondicional, mis mascotas Hazel, Príncipe Terry, Bebé, Aslan, Possy, Nola, Arlo Tessa, Luka y a los que siempre vivirán en mi corazón.

II. Agradecimientos

Gracias infinitas al Eterno, por ser luz en nuestra vida, por permitirnos ser parte de su hermosa creación y culminar una meta más.

A nuestra familia por instruirnos con amor, bondad y ser nuestro ejemplo de constancia y dedicación.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por abrirnos las puertas y permitirnos forjar nuestras bases profesionales como Licenciados en Ingeniería en Geología Ambiental.

A nuestros catedráticos por su contribución invaluable en nuestra formación, por fomentar nuestro pensamiento crítico y creatividad, gracias por desafiar nuestros límites, por compartirnos su tiempo, conocimiento y dedicación.

Al Dr. Enrique Cruz Chávez, por ser nuestro director, por su paciencia, sus enseñanzas han sido faros luminosos en nuestro viaje de descubrimiento académico, convirtiendo el aprendizaje en un regalo constante.

Agradecemos a la química Verónica García Hernández por su contribución en el método de Digestión Ácida e ICP, por sus ánimos y paciencia en cada momento.

Expresamos nuestra gratitud al Dr. Marius Ramírez Cardona por su asistencia al interpretar los resultados de difracción de Rayos X, parte de su colaboración está reflejada en este proyecto.

A la Compañía de Real del Monte y Pachuca S.A de C.V por permitirnos utilizar el equipo analizador XRF Portátil Niton XL3t para la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

A nuestros sinodales Dr. David Quiroz, Dra. Ingrid Árcega y Dr. Fred Pérez por impulsarnos a ser mejores estudiantes, por su perseverancia, colaboración, motivación y disposición de tiempo, son nuestra inspiración para ser mejores día con día.

A nuestras amigas, compañeros y compañeras, por impulsarnos a esforzarnos y seguir adelante, gracias por llenar nuestra vida de innumerables satisfacciones y aventuras.

Este logro es el resultado del esfuerzo colectivo de muchos, estamos sinceramente agradecidos por la colaboración y el apoyo recibido. Este trabajo no solo representa

dedicación, sino también generosidad y sabiduría de aquellos que nos rodean, aunque no podemos nombrar a todos individualmente, nuestra gratitud es sincera y extensa. Gracias a cada persona que, de alguna manera, ha sido parte de esta trayectoria.

III. Índice General

1. RESUMEN.....	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. ANTECEDENTES.....	4
5. JUSTIFICACIÓN	8
6. OBJETIVOS	9
6.1 Objetivo General.....	9
6.2 Objetivos Específicos	9
7. MARCO TEÓRICO.....	10
7.1 Contexto Minero Pachuca-Real del Monte.....	10
7.1.1 Yacimiento epitermal de baja sulfuración	10
7.2 Residuos Mineros	12
7.3 Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) contenidos en residuos mineros	13
7.3.1 Toxicidad.....	13
7.3.2 Genotoxicidad.....	14
7.4 Meteorización	14
7.5 Parámetros considerados para la evaluación geoquímica de Elementos Potencialmente Tóxicos en sedimentos recientes.	15
7.5.1 pH	15
7.5.2 Potencial de Óxido-Reducción	15
7.5.3 Conductividad Eléctrica	15
7.6 Parámetros considerados para la evaluación geoquímica de EPT en agua.....	16
7.6.1 pH	16
7.6.2 Temperatura.....	16
7.6.3 Oxígeno Disuelto.....	16
7.6.4 Turbidez.....	16
7.5 Conductividad Eléctrica	17
7.6 Sólidos Totales Disueltos	17
7.7 Dispersión Geoquímica	17
7.8 Medio Ambiente	18

7.9 Sedimento	18
7.10 Edafología.....	18
7.11 Agua	19
7.12 Contaminación Ambiental.....	20
7.13 Marco Legal.....	20
7.13.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).....	20
7.13.2 Ley de Minería.....	20
7.13.3 Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003	21
7.13.4 Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.....	21
7.13.5 Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.....	21
7.13.6 Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000	21
7.13.7 Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007	22
7.13.8 Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009	22
7.13.9 Norma Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011	22
7.13.10 Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021	22
7.13.11 Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997	22
7.13.12 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.....	23
7.13.13 Norma Oficial Mexicana NOM-230-SEMARNAT-2000	23
7.13.14 Programas de Auditoría y Cumplimiento Ambiental (PAMA)	23
7.13.15 Digestión ácida asistida por microondas de sedimentos y suelos (EPA Método 3051 A) con adecuación.	23
7.13.16 Digestión ácida asistida por microondas de muestras acuosas y extractos (EPA Método 3015:) con adecuación.....	24
8. ZONA DE ESTUDIO	25
8.1 Localización.....	25
8.2 Presa Los Ángeles 13159 (CONAGUA).....	26
8.3 Clima	27
8.4 Orografía.....	30
8.5 Hidrografía.....	31
8.6 Geología	32
8.7 Formaciones.....	34
8.8 Edafología.....	35
8.9 Uso de suelo.....	36

8.10 Geomorfología.....	37
9. MÉTODOLÓGÍA	38
9.1 Muestreo de jales	38
9.2 Muestreo de sedimento	41
9.3 Muestreo de agua superficial	43
9.4 Difracción de Rayos X (DRX)	46
9.5 Determinación de parámetros fisicoquímicos de sedimento	48
9.5.1 Medición de pH	48
9.5.2 Concentraciones de metales solubles (Extracto PECT).....	48
9.5.3 Digestión ácida asistida por microondas de sedimentos, y suelos (Método EPA 3051) con adecuación.	49
9.6 Determinación de parámetros fisicoquímicos de agua.	50
9.6.1 Digestión ácida asistida por microondas de muestras acuosas y extractos (Método EPA 3015) con adecuación.	51
9.7 Técnicas analíticas.....	52
9.7.1 Espectrometría con plasma acoplado por inducción (ICP).....	52
9.7.2 Fluorescencia de Rayos X (XRF).....	53
9.8 Interpolación por técnica IDW	54
10. RESULTADOS.....	55
10.1 Difracción de Rayos X.	55
10.2 Geoquímica del Sedimento.....	57
10.3 Hidrogeoquímica	69
11. DISCUSIONES.....	72
11.1 Difracción de Rayos (X).....	72
11.2 Geoquímica del sedimento	72
11.3 Hidrogeoquímica	73
11.4 Interacción Sedimento-Agua	73
12. CONCLUSIONES	74
13. REFERENCIAS.....	75

IV. Índice de figuras

Figura 1. Mapa de zona de estudio ubicación de jales de Velasco y presa Los Ángeles 13159 (CONAGUA).....	26
Figura 2. Presa Los Ángeles, información de infraestructura.....	27
Figura 3. Variabilidad de la precipitación anual de la presa Los Ángeles, del año 2009-2015 (CLICOM-CICESE).....	28
Figura 4. Imagen satelital, presa los Ángeles. 2012.....	29
Figura 5. Imagen satelital, presa los Ángeles. 2018.....	29
Figura 6. Imagen satelital, presa los Ángeles. 2023.....	29
Figura 7. Mapa de climatología.....	30
Figura 8. Mapa de modelo de elevación digital.....	31
Figura 9. Mapa hidrológico del municipio de Omitlán de Juárez, Hidalgo. Elaboración propia.	32
Figura 10. Mapa de geología regional. (Extracto de carta geológica F14-D82 SGM).....	34
Figura 11. Mapa de edafología.....	36
Figura 12. Mapa de uso de suelo y vegetación.....	37
Figura 13. Mapa de muestreo de sedimento de jales de Velasco.....	39
Figura 14. Jales de Velasco.....	40
Figura 15. Cárcavas en jales de Velasco.....	40
Figura 16. Grietas de desecación.....	40
Figura 17. Sequía en presa Los Ángeles.....	40
Figura 18. Sedimento de presa Los Ángeles.....	41
Figura 19. Mapa de muestreo de sedimento, presa Los Ángeles.....	42
Figura 20. Mapa de muestreo de agua de la presa Los Ángeles.....	44
Figura 21. Calibración del potenciómetro.....	44
Figura 22. Toma muestra lado NW de la presa.....	45
Figura 23. Toma de muestra lado NE de la presa.....	45
Figura 24. Acidulación con HNO ₃	46
Figura 25. Medición de pH después de acidular muestra.....	46
Figura 26. Difractómetro.....	47
Figura 27. Datos de equipo de difracción de rayos x.....	47
Figura 28. Procesamiento de las muestras de sedimento.....	47

Figura 29. Obtención de los resultados del difractograma.....	48
Figura 30. Agitación de muestras de sedimento para determinación por el método de extracto PECT.....	49
Figura 31. Medición de pH de sedimento.	49
Figura 32. Sedimento con mezcla de ácidos.	50
Figura 33. Digestión ácida por método EPA 3051.	50
Figura 34. Adición de ácido bórico saturado.	51
Figura 35. Filtrado y aforado de muestras digestadas de agua.	51
Figura 36. Procesamiento de muestras en ICP.....	52
Figura 37. Lectura de muestras en ICP.	52
Figura 38. Procesamiento de muestras en FRX.	53
Figura 39. Lectura de muestras en FRX.	53
Figura 40. Espectro de difracción de rayos x de EJONW01 correspondiente a jales Velasco. ...	56
Figura 41. Espectro de difracción de rayos x de EJONW02 correspondiente a jales Velasco. ...	57
Figura 42. Concentración de pH, muestras de sedimento de la presa Los Ángeles.....	59
Figura 43. Concentración de Fe en muestras de sedimento original en la presa Los Ángeles.....	62
Figura 44. Concentración de Zn en muestras de sedimento original en la presa Los Ángeles. ...	62
Figura 45. Concentración de Pb en muestras de sedimento original en la presa Los Ángeles. ...	62
Figura 467. Concentración de Ag en muestras de sedimento original en la presa Los Ángeles..	62
Figura 476. Concentración de Cu en muestras de sedimento original en la presa Los Ángeles. 63	
Figura 48. Concentración de Zn en muestras de sedimento de digestión ácida, de la presa Los Ángeles.	64
Figura 49. Concentración de Pb en muestras de sedimento de digestión ácida, de la presa Los Ángeles.	64
Figura 50. Concentración de Fe en muestras lavadas de la presa Los Ángeles.	67
Figura 51. Concentración de Zn en muestras lavadas de la presa Los Ángeles.....	67
Figura 52. Concentración de Pb en muestras lavadas de la presa Los Ángeles.	67
Figura 53. Concentración de Cu en muestras lavadas de la presa Los Ángeles.	67
Figura 54. Concentración de Ag en muestras lavadas de la presa Los Ángeles.	68
Figura 55. Concentración de Cd en muestras lavadas de la presa Los Ángeles.	68
Figura 56. Concentración de pH, muestras de agua de la presa Los Ángeles.....	70

V. Índice de Tablas.

Tabla 1. Coordenadas de muestreo de sedimento de jales de Velasco	38
Tabla 2. Coordenadas de muestreo de sedimento de presa Los Ángeles	42
Tabla 3. Coordenadas de muestreo de agua de la presa Los Ángeles	45
Tabla 4. Resultados de medición de pH sedimento de la presa Los Ángeles	57
Tabla 5. Resultados ICP muestra total sedimento de presa Los Ángeles (ppm).....	60
Tabla 6. Resultados ICP digestión ácida muestras de sedimento presa Los Ángeles.	63
Tabla 7. Resultados ICP muestras lavadas de sedimento presa Los Ángeles	64
Tabla 8. Valores de muestra total de sedimento	66
Tabla 9. Valores de digestión ácida de sedimento	66
Tabla 10. Valores de muestras lavadas de sedimento	66
Tabla 11. Resultados de medición de pH agua de la presa Los Ángeles.	69
Tabla 12. Resultados de fluorescencia de rayos x (FRX) de sedimento.	71
Tabla 13. Valores de fluorescencia de rayos x (FRX) de sedimento.	71

1. RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue caracterizar la composición geoquímica de agua y sedimento de la presa Los Ángeles, ubicada en el municipio de Omitlán de Juárez, se evaluaron posibles riesgos ambientales debido al transporte, deposición de jales y disolución de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) provenientes de la presa de jales de Velasco, ubicada a 6 km del cuerpo de agua en el mismo municipio. Este estudio emplea técnicas analíticas por vía húmeda y vía seca, analizando 23 muestras de sedimento total y bajo extracción secuencial, además de 8 muestras de agua superficial.

Se utilizó Difracción de Rayos X (DRX) para identificar las fases minerales de las muestras de jal (Cuarzo, Pirita, Clacopirita, Galena y en orden secundario Sanidina, Albita y Esfalerita), Inducción de Plasma Acoplado (ICP) que permitió conocer de manera cuantitativa la concentración de elementos (Fe, Zn, Pb, Cu, Ag, Cd) respectivamente 8.08, 3.54, 2.22, 0.39, 0.02 ppm y no detectado, y Fluorescencia de Rayos X (FRX) se utilizó para corroborar una similitud de manera cualitativa y cuantitativa de los EPT analizados, de acuerdo con los resultados, Fe, Zn y Pb coincidieron con una concentración elevada a comparación de Cu, Ag y Cd.

Los resultados obtenidos se interpretaron con base a las normas NOM-159-SEMARNAT-2011, NOM-147- SEMARNAT-SSA1-2004, NOM-052-SEMARNAT-2000, Ley Federal de Derechos y disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales (2022).

De acuerdo a los resultados, se concluyó que el sedimento presenta considerables concentraciones de metales, actualmente no representa riesgo alguno ya que existe estabilidad en los sedimentos debido a la naturaleza del yacimiento, el cuarzo (SiO_2) actúa como regulador del pH de los sedimentos; en el agua analizada de la presa Los Ángeles, hay ausencia de EPT, sin embargo, no deja de considerarse un riesgo ambiental a largo plazo, ya que los contaminantes presentes en el sedimento interactúan con el agua de manera directa causando una liberación prolongada.

Palabras clave: Geoquímica, agua, sedimento, jales mineros, Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), disolución, óxido-reducción, Difracción de Rayos X (DRX), Inducción de Plasma Acoplado (ICP), Fluorescencia de Rayos X (FRX).

2. ABSTRACT

The objective of the present study was to characterize the geochemical composition of water and sediment of the Los Ángeles dam, located in the municipality of Omitlán de Juárez, possible environmental risks were evaluated due to the transport, deposition of tailings and dissolution of Potentially Toxic Elements (PTEs). coming from the Velasco tailings dam, located 6 km from the body of water in the same municipality. This study uses wet and dry analytical techniques, analyzing 23 samples of total sediment and under sequential extraction, in addition to 8 samples of surface water.

X-ray Diffraction (XRD) was used to identify the mineral phases of the jal samples (Quartz, Pyrite, Clacopyrite, Galena and in secondary order Sanidine, Albite and Sphalerite), Induction Coupled Plasma (ICP) that allowed us to know clearly quantitative element concentration (Fe, Zn, Pb, Cu, Ag, Cd) respectively 8.08, 3.54, 2.22, 0.39, 0.02 ppm and not detected, and X-ray Fluorescence (XRF) was used to corroborate a similarity qualitatively and quantitative of the EPT analyzed, according to the results, Fe, Zn and Pb coincided with a high concentration compared to Cu, Ag and Cd.

The results obtained were interpreted based on the standards NOM-159-SEMARNAT-2011, NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004, NOM-052-SEMARNAT-2000, Federal Law of Rights and applicable provisions regarding national waters (2022).).

According to the results, it was concluded that the sediment presents considerable concentrations of metals, currently it does not represent any risk since there is stability in the sediments due to the nature of the deposit, quartz (SiO₂) acts as a regulator of the pH of the sediments; In the water analyzed from the Los Angeles dam, there is an absence of EPT, however, it is still considered a long-term environmental risk, since the contaminants present in the sediment interact with the water directly causing a prolonged release.

Keywords: Geochemistry, water, sediment, mining tailings, Potentially Toxic Elements (PTEs), dissolution, oxidation-reduction, X-ray Diffraction (XRD), Induction of Coupled Plasma (ICP), X-ray Fluorescence (XRF).

3. INTRODUCCIÓN

La actividad minera en el distrito minero Pachuca – Real del Monte en el estado de Hidalgo se ha desarrollado desde hace 500 años aproximadamente, en consecuencia, se han producido desechos de mina ubicados en presas a los cuales se les conoce como jales mineros. La su composición de estos desechos obedece a la de los yacimientos (silicatos, sulfuros, sulfatos, óxidos e hidróxidos) y a los minerales que lo conformaron. El yacimiento epitermal de baja sulfuración se desarrolla en un ambiente geotermal y se caracteriza por tener rocas ácidas a intermedias, presenta sulfuros como pirita (FeS_2), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS), que son una fuente de liberación por meteorización de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT). El mal manejo en la deposición final de estos residuos genera un problema socioambiental que impacta significativamente a seres vivos y a los recursos naturales (agua y suelo) del sitio y alrededores donde se presentan.

Los jales de Velasco se localizan en el municipio de Omitlán de Juárez, están ubicados aproximadamente a 6 km de la presa Los Ángeles, en el mismo municipio. En imágenes satelitales se observa un transporte y aporte significativo de los jales de Velasco al sedimento del cuerpo de agua Los Ángeles, resultado de sus condiciones topográficas, el arrastre por acción hídrica y eólica, convirtiéndose en sedimentos recientes. La disolución de las fases mineralógicas está en constante cambio, consecuencia de las variaciones del nivel de agua en la presa, propiciando fenómenos de óxido-reducción permitiendo y/o limitando la liberación de EPT en una fase soluble, para determinarlos se implementaron técnicas analíticas como DRX (Difracción de Rayos X), ICP (Inducción de Plasma acoplado) y FRX (Fluorescencia de Rayos X) en muestras de sedimento y agua (Quevedo-Castañón *et al.* 2019).

Estudios anteriores (Ramos-Arroyo *et al.* 2006, Azpeitia 2007, Romero *et al.* 2008, Hernández-Acosta *et al.* 2009, Medel-Reyes, 2009, Moreno *et al.* 2012, Quevedo-Castañón *et al.* 2019) caracterizaron los Pasivos Ambientales Mineros (PAMs) desde el punto de vista mineralógico y de su afectación sobre suelos; siendo este estudio un sitio de interés para el entendimiento de la disolución de la fase mineral de jales en cuerpos de agua superficial en el estado de Hidalgo.

4. ANTECEDENTES.

Segura y colaboradores, en 2016 identificaron contaminantes (Ba, Pb, As, Sr, Fe, Mn y Al) en muestras de suelo y agua de la presa de Samarco, en Brasil; Obteniendo nueve muestras de lodo seco para evaluarlas por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Fluorescencia de Rayos X portátil (FRX). Para monitorear y proponer soluciones en caso de que represente un riesgo ambiental. Teniendo como resultado que los EPT como los metales pesados rebasa los parámetros de las legislaciones ambientales y esto afecta la calidad de los sedimentos de la presa. En las imágenes MEB se observan superficies irregulares, con tamaño de partículas que oscila entre 1 y 200 nm. El tamaño de las partículas influye mucho en la inhalación y, en consecuencia, en la toxicidad potencial residual. El análisis FRX presentó datos más detallados sobre el contenido de los elementos. En general, SiO₂, Fe, Mn, Cu, Ca y Cr fueron los analitos más abundantes. Para una información más precisa y exacta se utilizó digestión ácida y análisis por ICP-MS. Los resultados se compararon con los estándares de las Directrices de calidad ambiental canadiense (CCME) para suelos agrícolas y de parques/residenciales (CCME, 2001), que se aplican para las agencias ambientales brasileñas.

Hoover, y colaboradores en 2017, analizaron la distribución geoespacial conjunta de arsénico y uranio en fuentes de agua no reguladas en toda la Nación Navajo, en el sureste rural de los Estados Unidos, donde se encuentran más de 500 minas de uranio abandonadas. En dicha investigación se usaron métodos de técnicas de mapeo, análisis de datos y sistemas de información geográfica, obteniendo como resultados la evaluación visual de la distribución geoespacial de As y U en Navajo. Se determinó mediante (US EPA 2000b) que existe un riesgo al consumir agua contaminada, los resultados indicaron que arsénico y uranio excedieron los estándares nacionales de agua potable en 15.1% de As y 12.8% de U, se propuso priorizar políticas y decisiones de investigación relacionadas con la documentación de exposiciones a la salud existentes, además de estrategias de reducción de riesgos.

Cahuana y Aduvire, en 2018 evaluaron la bioacumulación de metales pesados en los tejidos de la vegetación acuática (macrófitas) y vegetación terrestre en instalaciones mineras abandonadas en Perú. Los desechos producidos por antiguas operaciones mineras constituyen un riesgo potencial para la salud de la población y el ecosistema. Por medio del Método SGS-PO-ME-101:2016, determinaron metales en muestras orgánicas por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Se detectó la movilización de drenajes ácidos producidos por la

oxidación de sulfuros, bioacumulación de metales pesados en los tejidos de vegetación acuática y suelo. Concluyeron que las concentraciones de metales están asociadas a los Pasivos Ambientales Mineros, ya que estos se encuentran a cierta distancia de estos, debido a la contaminación por condiciones climáticas (arrastre mineral por escorrentía y viento).

Geyne y colaboradores en 1963 indican que el distrito de Pachuca-Real del Monte es de gran importancia por el yacimiento argentífero que presenta, la explotación minera de la zona inició desde el siglo XVI. La extracción mineral ha sido de plata, oro, hierro, zinc, plomo y cantidades menores de cobre, todos principalmente en sulfuros. Los primeros minerales de veta que se formaron fueron principalmente cuarzo, pirita, con abundancia local de calcita y rodonita-bustamita y con cantidades menores de albita, epidota y clorita. También hay pequeñas cantidades de esfalerita, galena y calcopirita.

Ramos y colaboradores en 2006 desarrollaron una estrategia por medio de técnicas físico-químicas para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en el Distrito Minero de Guanajuato. Se determinaron evidencias morfológicas de acidificación en campo (color, textura al tacto, contenido de carbonatos y estructura), el pH y la conductividad eléctrica se determinaron en extractos de pastas de saturación, y en las muestras se cuantificó el contenido total de Cu, Pb, Zn por una digestión con agua regia. La estrategia propuesta fue útil para identificar los factores que determinan la distribución de elementos con potencial tóxico en los jales de la región, así como para evaluar el potencial de acidificación. Se determinó la mineralogía por Difracción de Rayos X (DRX) en muestras de los horizontes.

Medel-Reyes en 2009 evaluó el estado fisicoquímico actual de jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, con el fin de conocer las características fisicoquímicas del material que determinan la movilidad de EPT hacia el ambiente. Se implementaron técnicas analíticas como DRX, pruebas de extracción secuencial. Se percató que bajo las condiciones actuales no representa gran riesgo, porque tienen una forma muy estable, debido a la composición química del jal que corresponden a cuarzo y calcita, los cuales interactúan con los metales; la presencia de minerales tipo sulfuro es muy baja, predominando los carbonatos, por lo que el potencial de generación de drenaje ácido es bajo.

Hernández-Acosta y colaboradores en 2009 realizaron una caracterización física y química de residuos mineros y de especies vegetales del jal de mina Dos Carlos, en Pachuca, Hgo., México.

Por medio de espectrofotometría de absorción atómica, se utilizó el método de cuadrantes para identificar especies vegetales y en muestras de tejido vegetal de cada especie se determinó el contenido de EPT. Los residuos mineros presentaron textura franco-arenosa, pH medianamente alcalino y bajo contenido de materia orgánica. Los resultados se interpretaron con la NOM-021-RECNAT-2000. Se sugiere la revegetación total del jal de mina con las especies vegetales, ya que son capaces de reducir la disposición de EPT en el suelo y en el aire, al favorecer la acumulación de los residuos mineros en sus tejidos.

Rivera y colaboradores en el 2010 realizaron un análisis geoquímico-estadístico de catorce metales pesados (As-Cr-Cu-Mo-Ni-Fe-Zn-Sn-Cd-V-Hg-Pb-Sb-W) en sedimentos activos de los ríos Huaura y Chancay en Lima, Perú. Emplearon el análisis de correlación lineal de Pearson en los sedimentos de los ríos Chancay y Huaura, con el objetivo de establecer el grado de asociación entre las variables analizadas, para encontrar un patrón geoquímico regional. Comparando los contenidos de los metales de los ríos con la Tabla Holandesa (límites establecidos para metales pesados en suelos) concluyendo que estos ríos sobrepasan los niveles de intervención en lo que respecta al arsénico.

Mancilla-Villa y colaboradores en 2012 analizaron el potencial hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica (CE), As y metales pesados totales: Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn para agua de riego en Puebla y Veracruz, México. Los metales pesados se determinaron mediante el uso de un ICP, utilizándose la metodología recomendada por la EPA (Environmental Protection Agency) y APHA (American Public Health Association). Los resultados mostraron valores bajos en la concentración de metales pesados en agua para riego agrícola y uso urbano, no así, para el criterio de consumo humano, pues 50 % de las muestras tomadas presentaron concentraciones por encima de los límites permisibles para Cd, 20 % para Hg y 2 % para Pb (SSA 2000). Concluyeron que el agua superficial no representa riesgos para riego agrícola. La mayor concentración y dispersión la presentó el As con valores de 0.0 a 0.78 mg L⁻¹, mientras que la menor con 0.0 a 0.03 mg L⁻¹, fue para el Hg.

Moreno-Tovar y colaboradores en 2012 determinaron la mineralogía primaria y secundaria de los jales en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo. Mediante la combinación de la Microscopía Óptica de Polarización (MOP), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Microsonda Electrónica (ME) se identificaron algunas partículas con minerales oxidados con contenidos metálicos (óxidos, sulfatos y arseniats). También utilizaron el método PBET el cual es un sistema

de prueba in vitro que permite predecir la bioaccesibilidad de EPT como As, Pb, Zn y Cd de naturaleza inorgánica contenidos en una matriz sólida. Los resultados de bioaccesibilidad mostraron contenido de As, Pb, Zn y Cd.

Candeias y colaboradores en 2015 analizaron muestras de agua y sedimento en Arroyos mediante ICP-MS para una amplia gama de elementos principales y traza, con el fin de definir la situación hidroquímica actual en Panasqueira, Portugal. Durante dos períodos diferentes (estaciones lluviosas y secas), la lluvia interactúa con los sulfuros alterados almacenados en los relaves de la escorrentía con altas concentraciones de metales (Cd, Fe, Mn, Zn, Cu, As) en solución en las aguas que lixivian los depósitos de jales la localidad. En estación seca, encontraron aguas ácidas, enriquecidas en metales, los resultados determinaron que el uso de estas aguas para el consumo humano y para el riego representa una amenaza para los seres humanos ya que tienen un potencial riesgo carcinogénico, especialmente debido a las concentraciones de As. Como conclusión, la oxidación de sulfuros puede dar lugar a la movilización y migración de metales traza de los desechos mineros al medio ambiente, liberando los contaminantes a los ecosistemas.

Quevedo-Castañón y colaboradores en 2019 evaluaron el impacto al medio ambiente de EPT en los jales mineros del Depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero, México. Ellos identificaron las fases minerales a través de Difracción de Rayos X y EDS-MEB para determinar la distribución química de los EPT y su potencial emisión al ambiente. Los resultados indican que en los jales no oxidados los metales están ligados preferencialmente a la materia orgánica/sulfuros y oxihidróxidos de Fe. Los jales no oxidados están constituidos por sulfuros que interactúan como portadores de metales tóxicos mientras que los jales oxidados constituyen los reservorios más relevantes. Los resultados permitieron concluir que los jales no oxidados no representan, por el momento, un peligro inminente de liberación de metales tóxicos al ambiente. Por el contrario, los jales oxidados, presentan un alto potencial de emisión de metales en formas químicas accesibles al medio ambiente.

5. JUSTIFICACIÓN

La actividad minera en el estado de Hidalgo se ha desarrollado desde hace aproximadamente 500 años a la fecha, siendo una de las principales actividades económicas dentro del distrito minero Real del Monte- Pachuca, aunado a esto, la incorrecta disposición final de desechos de mina (jales mineros) y la contaminación derivada de estos residuos es un problema socioambiental que impacta significativamente a seres vivos y recursos naturales (agua y suelo).

La naturaleza geoquímica y mineralógica de los jales mineros, los procesos de alteración a los que están sometidos generan la liberación de EPT; tal es el caso la zona de estudio, la presa de Jales de Velasco, ubicada en la comunidad de Velasco, Omitlán de Juárez y la presa Los Ángeles ubicada en la comunidad de Venta de Guadalupe, en el mismo municipio. La zona de estudio se considera que tiene un impacto de contaminación por Fe, Zn, Pb, Cu, Ag y Cd, considerados como EPT.

Este proyecto integra información sobre el análisis de 23 muestras de sedimento y 8 muestras de agua extraídas de la presa, pretendiendo identificar el posible nivel de contaminación presente en el sedimento y agua, debido a la importancia económica que tiene al agua de la presa para la comunidad, ya que el cuerpo de agua es utilizado para agricultura y ganadería.

La importancia del estudio se debe a que, dentro de la región y el estado de Hidalgo, no existe un proyecto similar que relacione la contaminación de un cuerpo de agua debido a sedimentos provenientes de jales mineros, generando un precedente para futuros proyectos.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Caracterizar la composición geoquímica de agua y sedimento en la presa Los Ángeles, Omitlán de Juárez, Hidalgo por medio de técnicas de extracción, para evaluar los posibles riesgos ambientales debido al transporte, deposición de jales y disolución de EPT.

6.2 Objetivos Específicos

Determinar la composición mineralógica de los jales de Velasco mediante Difracción de Rayos X (DRX) y así identificar las fases minerales presentes.

Analizar la composición geoquímica de los sedimentos y agua de la presa Los Ángeles, mediante Espectroscopia de Inducción acoplada a Plasma (ICP) para determinar los EPT (Fe, Zn, Pb, Cu, Ag, Cd).

Implementar sistemas de información geográfica para representar información característica de la zona de estudio y las concentraciones de EPT.

Determinar la composición química de EPT de los sedimentos de la presa Los Ángeles mediante fluorescencia de rayos X (FRX) del equipo analizador XRF Portátil Niton XL3t.

7. MARCO TEÓRICO

7.1 Contexto Minero Pachuca-Real del Monte

El estado de Hidalgo es una de las entidades federativas más importantes en el desarrollo minero de México, pues cuenta con un historial de 500 años de minería. El estado se caracteriza por ser el principal productor de manganeso en el país, ocupa el segundo lugar en producción de fosforita y también es productor (en menor medida) de oro, plata, plomo y zinc (SGM, 2021).

El municipio de Omitlán de Juárez Hidalgo, dónde se encuentran las presas de jales, pertenece al distrito Pachuca-Real del Monte, desarrollado, sobre una gran cantidad de vetas de origen hidrotermal, específicamente los epitermales de sulfuración media-baja (Camprubí, 2018). Estos yacimientos poseen el potencial de constituir fuentes importantes de gran cantidad de metales o semimetales, tales como plata, oro, bismuto, cobre, arsénico, antimonio, mercurio, selenio, telurio, zinc, plomo, galio, germanio, indio, talio, molibdeno, cadmio, estaño, o platino.

7.1.1 Yacimiento epitermal de baja sulfuración

Los depósitos epitermales de baja sulfuración son desarrollados en un ambiente geotermal, dominado por aguas cloruradas donde hay un fuerte flujo de circulación de aguas a profundidad (principalmente de origen meteórico), conteniendo CO₂, NaCl y H₂S (González, 2010).

De acuerdo a Camprubí, 2018, hace una comparación de yacimientos epitermales de alta y baja sulfuración, dónde indica que las características de un yacimiento de baja sulfuración son:

- Parte de vulcanismo subaéreo, con rocas ácidas a intermedias (andesita, riolita y riolita). Encajante de cualquier tipo.
- Los controles de emplazamiento son fallas o zonas de fractura estrechamente relacionadas a centros volcánicos.
- Generalmente la extensión de la zona de alteración periférica es bastante restringida y de visualización muy sutil, aunque puede abarcar áreas relativamente extensas.
- La alteración asociada es extensa en alteración propilítica en zonas adyacentes con baja relación agua/roca. Presenta gran cantidad de mica blanca en zonas con alta relación agua/roca. Alteración argílica dominante conforme disminuye la temperatura. Los gases escapados a partir de ebullición pueden originar alteración argílica o argílica avanzada en la periferia, o bien superpuesta a partir de fluidos profundos. Clorita: común. Generalización: alt. sericítica → argílica.
- Los minerales clave de alteración proximal son sericita o illita ± adularia; roscolita (mica-V) en depósitos asociados a rocas alcalinas; a veces, clorita.
- La geomorfología del cuerpo mineralizado es de tamaño variable y morfología tabular.

-Presencia de sínteres y niveles o cobijaduras de calcedonia (niveles superficiales), posible presencia de vetas de sulfuración intermedia en inmediaciones de cuerpos de alta sulfuración (en profundidad).

-El carácter de la mineralización económica es característicamente como relleno de cavidades o porosidad, en vetas con contactos netos con el encajante. Típico relleno de filones en bandas, comúnmente con brechificaciones polifásicas. Hacia la superficie se presenta en *stockwork* o diseminada, según la naturaleza de la permeabilidad primaria y secundaria local.

-Ganga de cuarzo: Cuarzo y calcedonia dispuestos en todo tipo de texturas primarias, de recristalización o reemplazamiento de carbonatos. Calcedonia: común, en bandas.

-Otros minerales de la ganga son carbonatos: presentes, comúnmente calcita y rodocrosita. Adularia: diseminada y en vetas. Alunita y pirofilita: escasas. Barita y/o fluorita: presentes localmente; la barita se halla por lo común por encima de la mena. Azufre nativo: ausente. Illita.

-La abundancia de sulfuros es de 1–20% del volumen total, pero típicamente menos del 5%, pirita predominante. Contenido de azufre total típicamente bajo. Bajo contenido en metales base (Pb, Zn), aunque en numerosos depósitos son relativamente abundantes.

-Los minerales metálicos clave del yacimiento son pirita, esfalerita, marcasita, galena, electrum, oro (sulfosales de Ag, arsenopirita, argentita, calcopirita, tetraedrita). Telururos: relativamente abundantes en algunos depósitos. Enargita: muy raramente. Seleniuros: poco comunes. Bismutinita: muy raramente.

La profundidad de formación de este yacimiento es en su mayor parte, entre 0 y 1,000 m., a temperaturas generalmente, entre 100–320°C (la mayoría entre 150–250°C).

De acuerdo con los datos analíticos de los yacimientos epitermales de baja sulfuración son:

-Profundidad de formación 0-1000 metros. Entre temperaturas 100-320°C (la mayoría entre 150-250°C) –Carácter de fluidos: Baja salinidad (0–15% en peso de NaCl eq.), aguas meteóricas; posible interacción con fluidos de origen magmático, reducidos, pH aproximadamente neutro; puede volverse alcalino debido a ebullición; los gases separados pueden ser oxidados y producir fluidos ácidos.

-Edad: Terciaria o más reciente.

-Los metales predominantes son Au, Ag y sus asociaciones (Zn, Pb, Cu) y los metales presentes localmente son Mo, Sb, As y sus asociaciones (Te, Se, Hg).

-Los yacimientos de baja sulfuración pueden clasificarse de acuerdo su estilo de mineralización (*stockwork*, diseminaciones, vetas, brechas), según contenido de metales base (rico o pobre),

contexto geológico (depressiones con vulcanismo silíceo, estratovolcanes, andesíticos, vulcanismo, tipo Cordillera, islas, volcánicas oceánicas), según profundidad de formación (someros, profundos), según la mineralogía de las asociaciones de sulfuros (sulfuración intermedia, baja sulfuración). Igualmente, se distingue el subtipo de epitermales alcalinos con base a su mineralogía como a su asociación con rocas volcánicas alcalinas.

7.2 Residuos Mineros

Los residuos mineros conocidos también como colas (*tailings*), relaves o jales mineros o producto de la trituración o molienda del mineral una vez que se han recuperado los metales comerciales, de las rocas, mediante procesos químicos y físicos (Armienta, 2005).

Generalmente se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos, actualmente se acumulan en grandes terrenos llamados presas de jales (Medel-Reyes, 2009).

En estos materiales van restos de los minerales que no se pudieron recuperar, partículas de los reactivos que se utilizaron para separar el mineral de la roca, la misma roca que contenía la mineralización (roca de caja) y otros elementos que se concentran en montones denominados presas de jales, varían en su composición química y mineralógica (SGM, 2019).

Romero en 2008, describió que los jales que se generan en el proceso de concentración de minerales entre los que destacan silicatos, óxidos, hidróxidos, sulfuros y sulfatos, los elementos presentes son plomo, plata, zinc y cobre. Contienen sulfuros metálicos residuales ejemplo de ello es la pirita (FeS_2), pirrotita (FeS), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS) que son la fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), entre otros.

Los residuos mineros al ser expuestos a temporadas de estiaje, comienzan a reaccionar ante la presencia o ausencia de oxígeno, agua y microorganismos, dando paso a un proceso de oxidación. Al ocurrir este fenómeno se generan efluentes ácidos con altas concentraciones de metales en solución, lo que facilita su biodisponibilidad y potencial de lixiviación hacia los depósitos subterráneos (Brousett-Minaya *et al.*, 2021).

Una repercusión ambiental ocurre cuando la disposición final causa diversos problemas, como la pérdida de cobertura vegetal, creación de estructuras poco consolidadas que son susceptibles a la erosión eólica e hídrica, generación de acidez y liberación de EPT al exponer los minerales de los yacimientos a un ambiente oxidante. La industria minera impacta en el entorno ecológico por los residuos generados, mediante dispersión (eólica e hídrica) y lixiviación de contaminantes. Esta representa un gran peligro, por la presencia de EPT en las fracciones finas de los jales mineros

(partículas menores de 2.5 μm). La dispersión eólica llega a permanecer en el aire, en forma de partículas suspendidas, las cuales llegan a moverse a cientos de kilómetros, afectando la biota y calidad del suelo donde se depositen. En el caso del proceso hídrico, depende del grado de precipitación, las escorrentías superficiales, contribuyen al arrastre de contaminantes hacia los terrenos cercanos (Pérez-Martínez, *et al.*, 2015).

Los residuos mineros pueden contener EPT, como metales pesados y sustancias químicas utilizadas en el procesamiento minero. La gestión adecuada de estos residuos es esencial para prevenir la liberación, migración de estos elementos hacia el medio ambiente, evitando así la contaminación y los riesgos para la salud humana (Medel-Reyes, 2009).

7.3 Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) contenidos en residuos mineros

Los EPT conocidos como metales pesados, son contaminantes persistentes y acumulables. Al estar presentes en presas de jales mineros, son un riesgo ambiental severo, por la lixiviación e incorporación a cuerpos de agua, suelo, sedimento, así como la movilización a otros ecosistemas. El grado de disponibilidad de los EPT en jales mineros depende del pH, del potencial de óxido-reducción y de la composición química del material, la mineralogía original, actividad bacteriana, así como las condiciones climáticas de la región, esto influirá en el desarrollo de los procesos fisicoquímicos de la liberación y retención de los EPT (Romero, *et al.* 2008).

Algunos de los EPT comunes son arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), selenio (Se), Mercurio (Hg), níquel (Ni). Debido a las características fisicoquímicas de los metales, es como se concentran en los niveles tróficos de la cadena alimenticia, alcanzando concentraciones que pueden causar problemas a los seres humanos (Medel-Reyes, 2009).

7.3.1 Toxicidad

La toxicidad de los jales mineros está relacionada con la presencia de sustancias químicas tóxicas o metales pesados en su composición. Estos elementos pueden estar presentes en los minerales o incluso pueden ser añadidos durante el proceso de extracción o beneficio de los minerales. Cuando los jales mineros se disponen en depósitos o almacenamientos sin la gestión adecuada, pueden ocurrir diferentes procesos como lixiviación, erosión, infiltración de agua de lluvia o drenaje ácido de mina, que podrían liberar los elementos tóxicos al medio ambiente, provocando efectos adversos en la salud humana y en los ecosistemas (Camarillo-Ravelo *et al.*, 2015).

Medel-Reyes en 2009, indica que la toxicidad tiene relación en función de los altos valores de pH, CE y concentración de metales. El pH predomina en la movilidad de los metales pesados y es causa probable de dicha toxicidad. La composición mineral influye en la oxidación, ya que liberan

elementos como Al, As, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn en las escorrentías de aguas a través de los jales. Una concentración mayor de estos metales corresponderá a su vez a una mayor toxicidad, causando efectos en la salud debido a la concentración, duración de exposición y vías de exposición (inhalación, ingestión o contacto dérmico).

7.3.2 Genotoxicidad

Cualquier modificación que afecta negativamente al material genético independientemente del mecanismo por el cual se induce dicha modificación (PROY-NOM-257-SSA1-2013).

Gamiño en 2012 dice que los jales mineros influyen en la genotoxicidad de diferentes maneras debido a la presencia de elementos tóxicos y sustancias químicas en su composición. La exposición a estos, tiene impactos negativos en la salud humana, como enfermedades respiratorias, trastornos neurológicos, daño renal, problemas cardiovasculares, daño hepático y riesgo de desarrollar cáncer, ya que dañan directamente el ADN, provocando rupturas en las hebras de ADN, formación de aductos de ADN y alteraciones estructurales.

Los pasivos ambientales pueden desprender sustancias tóxicas al medio ambiente, como partículas finas en suspensión, polvo y lixiviados, las cuales pueden ser inhaladas, ingeridas o entrar en contacto con la piel, los agentes genotóxicos presentes, afectan directamente las células del cuerpo. Hay estudios que contribuyen a comprender los riesgos potenciales para la salud, pueden ayudar a implementar medidas de gestión, mitigación adecuada, para reducir la exposición, proteger a las personas y al medio ambiente (Mendoza, 2023).

7.4 Meteorización

Los procesos de meteorización de los jales mineros son significativos en las implicaciones ambientales, ya que es la alteración de fragmentos rocosos por fuerzas exógenas, derivados del proceso de beneficio al ser expuestos al aire, humedad y al efecto de la materia orgánica. Estos procesos pueden ser de origen físico-mecánico o químico, esto puede provocar que los minerales de la superficie de la tierra cambien de forma y los nuevos minerales que se forman sean estables (Escobar, 2020).

-Meteorización Física: produce degradación del material rocoso.

-Meteorización Química: oxida y disuelve selectivamente los constituyentes minerales de la roca.

-Meteorización biológica: producida por los efectos físicos y químicos orgánicos sobre la roca

En este trabajo de investigación los factores que influyen en los procesos de meteorización son la litología, topografía ya que regula la circulación del agua y el tiempo de exposición los jales mineros.

7.5 Parámetros considerados para la evaluación geoquímica de Elementos Potencialmente Tóxicos en sedimentos recientes.

7.5.1 pH

Parámetro con mayor influencia en los procesos edáficos, así como en los procesos de lixiviación en jales mineros y en la movilidad de los metales. Los suelos de pH más básico presentan adsorción más fuerte para los metales pesados, que los de pH más ácidos. Cuando se presenta un decremento marcado en la movilidad del metal al incrementar los valores de pH y la solubilización de estos en condiciones ácidas, es de gran importancia dado el proceso de generación de drenaje ácido que se presenta en jales mineros, producto de la oxidación de los minerales presentes resultando en efluentes con pH muy ácidos (Medel-Reyes, 2009).

7.5.2 Potencial de Óxido-Reducción

La variación de pH, será la que indique la disponibilidad y movilidad de los metales pesados, ya que depende del ambiente oxidante o reductor que predomine. La solubilidad de zinc, cadmio, cobre y plomo es menor en condiciones reductoras que en condiciones oxidantes, cuando se encuentran en medio ácido, debido a la formación de complejos órgano minerales y a la formación de sulfuros. Sin embargo, existen otros elementos químicos que trabajan con valencias variables, pudiendo oxidarse o reducirse según el ambiente que predomine.

Ejemplo de ello, en la oxidación de minerales primarios el Fe^{2+} se convierte en Fe^{3+} formando óxidos e hidróxidos; la transformación de Mn^{2+} en Mn^{4+} ; la oxidación de S^{2-} , por ejemplo, pirita, en sulfatos; transformación de NH_4^+ en nitritos y nitratos (nitrificación).

El suelo, se encuentra en contacto con el aire, esto conlleva a que presente condiciones oxidantes. En cambio, al tener suelos saturados de forma temporal o permanente por exceso de agua, (suelos hidromorfos), se complica la aireación, esto tiende a provocar un ambiente reductor (Medel-Reyes, 2009).

7.5.3 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica se relaciona directamente con la concentración de iones en disolución, midiendo el grado de salinidad. La salinidad es un parámetro que indica la influencia en metales pesados se determina por el contenido en sales. El aumento en la salinidad puede incrementar la

movilización de metales pesados, los cationes asociados con las sales (sodio y potasio) pueden reemplazar a metal (Medel-Reyes, 2009).

7.6 Parámetros considerados para la evaluación geoquímica de EPT en agua.

La evaluación hidrogeoquímica de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) en el agua implica analizar una serie de parámetros para determinar su presencia y concentración. La elección de los parámetros específicos puede variar dependiendo de los objetivos del estudio y las regulaciones ambientales aplicables. Es importante realizar un monitoreo regular (en temporada de lluvias y estiaje), riguroso de estos parámetros para evaluar la calidad del agua y tomar medidas adecuadas para proteger la salud humana y el medio ambiente. De acuerdo con Brousett-Minaya *et al.*, en 2021 es importante el análisis de los siguientes parámetros físicoquímicos:

7.6.1 pH

El pH del agua puede influir en la movilidad y disponibilidad de los EPT. Algunos elementos pueden ser más solubles y estar más disponibles en aguas ácidas, mientras que otros pueden ser más solubles en aguas alcalinas.

7.6.2 Temperatura

La temperatura del agua puede influir en la presencia y el comportamiento de los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) en el medio acuático. Puede influir en la solubilidad de algunos EPT, en la reactividad química, en el metabolismo y toxicidad en organismos acuáticos, así como en la disponibilidad de oxígeno.

7.6.3 Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto en el agua es importante para la vida acuática y puede afectar la disponibilidad y movilidad de los EPT. Los niveles bajos de oxígeno disuelto pueden favorecer la liberación y movilización de ciertos elementos tóxicos.

7.6.4 Turbidez

La turbidez impacta en los ecosistemas acuáticos por dispersar la luz solar y reducir la concentración de oxígeno. Afecta a la fotosíntesis, así como a la respiración y reproducción de los peces. Las partículas suspendidas también ayudan a la adhesión de metales pesados y muchos otros compuestos tóxicos. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua, cuanto más turbia menor será su calidad (Ibañez, 2017).

7.5 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica del agua está relacionada con la presencia de sales disueltas, incluidos los EPT. Un aumento en la conductividad puede indicar una mayor concentración de EPT en el agua.

7.6 Sólidos Totales Disueltos

Los sólidos totales disueltos (STD) en el agua se refieren a la suma de todas las partículas sólidas que están en suspensión y disueltas en el agua. Estos sólidos pueden incluir minerales, sales, compuestos orgánicos, materia orgánica y otros elementos disueltos. La relación entre los STD y los EPT en el agua puede estar influenciada por factores como movilidad, solubilidad, transporte, adsorción y disponibilidad para los organismos. La relación entre estos puede ser compleja, dependerá de las características específicas del agua y los EPT involucrados. La concentración de los STD y los EPT en el agua, así como otros parámetros ambientales, influirán en su interacción y efectos en el medio ambiente acuático.

7.7 Dispersión Geoquímica

Corona-Chávez y colaboradores en 2017, explican que la dispersión geoquímica se refiere a la distribución y transporte de elementos químicos al medio ambiente. Con respecto a los jales mineros, se relaciona directamente con la liberación y dispersión de elementos tóxicos contenidos en los residuos mineros, al depositarse en un área determinada, ocurren procesos que conducen a la dispersión geoquímica de los elementos tóxicos, cómo:

1. Erosión y lixiviación: La erosión causada por el agua o el viento puede desplazar y dispersar los jales mineros. El agua de lluvia puede lixiviar los elementos tóxicos de los jales, transportándolos a través de la escorrentía superficial y los cuerpos de agua cercanos. La lixiviación puede resultar en la liberación de metales pesados y otros contaminantes al medio ambiente.
2. Transporte fluvial: Si los jales mineros se encuentran cerca de ríos o corrientes de agua, el flujo de agua puede transportar los elementos tóxicos disueltos o en forma de partículas a distancias mayores. Esto puede resultar en la contaminación de cuerpos de agua más alejados y afectar la calidad del agua.
3. Movimiento de partículas: Las partículas finas presentes en los jales mineros pueden ser fácilmente transportadas por el viento, lo que puede llevar a la dispersión de elementos tóxicos en áreas cercanas o incluso a distancias más lejanas. Esto puede tener efectos negativos en la calidad del aire y en la salud humana si se inhalan estas partículas.

4. Interacción con sistemas acuáticos y suelos: Una vez que los elementos tóxicos se dispersan en cuerpos de agua o se depositan en los suelos, pueden interactuar con diferentes componentes del medio ambiente. Estos elementos pueden ser adsorbidos por las partículas del suelo o bioacumulados por organismos acuáticos, lo que puede tener impactos en los ecosistemas y en la cadena alimentaria.

7.8 Medio Ambiente

Bolaños y colaboradores en 2015, indican que el medio ambiente un sistema formado por factores bióticos y abióticos, los cuales interactúan y se desarrolla la vida. Al hablar de factores bióticos se hace referencia a todos los seres como bacterias microscópicas, los hongos, la flora, la fauna y seres humanos. Por el contrario, los factores abióticos carecen de vida, sin embargo, determinan el espacio físico del ambiente, como el aire, el suelo y el agua, los cuales son esenciales para la subsistencia de los organismos. Es el componente de elementos físicos, químicos biológicos, incluso sociales y culturales.

7.9 Sedimento

Son granos no consolidados de minerales, materia orgánica o rocas preexistentes, que pueden ser transportados por el agua, el hielo o el viento, para luego ser depositados. Los procesos por los cuales los sedimentos se forman y son transportados tienen lugar en la superficie terrestre o cerca de ésta y a presiones y temperaturas relativamente bajas. Las rocas sedimentarias se forman a partir de la acumulación y la litificación de los sedimentos. Los sedimentos se clasifican de acuerdo con el tamaño, con la escala de Udden-Wentworth (Schlumberger, 2023).

7.10 Edafología

Es la ciencia que se encarga de estudiar el suelo en todos sus aspectos; desde su morfología, su composición, las propiedades tanto físicas como químicas, biológicas, su formación, evolución, taxonomía, distribución, utilidad, recuperación y conservación.

Se estudian y analizan diversos aspectos de los suelos, como su estructura, textura, porosidad, retención de agua, contenido de nutrientes, pH, capacidad de intercambio catiónico, actividad biológica y capacidad de soporte de plantas. Estos estudios ayudan a comprender la función, los procesos del suelo, así como su relación con el medio ambiente, la agricultura, la conservación de los recursos naturales y otros aspectos.

La edafología es fundamental para la gestión y la conservación de los suelos, ya que proporciona información valiosa para la agricultura, la silvicultura, la restauración de ecosistemas, la

planificación del uso del suelo y la mitigación de la degradación del suelo. Los edafólogos utilizan diversas técnicas y herramientas, como análisis de laboratorio, muestreo de suelos, estudios de campo y modelización, para obtener datos precisos sobre las propiedades y la calidad del suelo. Existe relación entre esta ciencia y los jales mineros ya que estos causan un impacto ambiental, que afecta la calidad del suelo. Ejemplo de ello es la contaminación del suelo, acidificación, alteración de la estructura y pérdida de biodiversidad (Navia-Paz, 2019).

7.11 Agua

El agua es elemental para vivir, sustancia cuya molécula está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno unidos por un enlace covalente. Es la única sustancia que puede hallarse en los tres estados de la materia (líquida, sólida o gaseosa) de forma natural en la Tierra. Se le conoce como el solvente universal, posee minerales y nutrientes.

Sus propiedades físicas son no tiene color, sabor, ni olor. Su punto de congelación es a cero grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), mientras que el de ebullición es a 100°C . Se caracteriza por estar en constante cambio y movimiento. En cambio, sus propiedades químicas son el potencial de hidrógeno (pH), medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El agua pura tiene un pH neutro de 7, lo que significa que no es ácida ni básica. Reacciona con los óxidos ácidos (compuesto químico binario que resulta de la combinación de un elemento no metal con el oxígeno), reacciona con los óxidos básicos (combinación de un elemento metálico con el oxígeno), reacciona con los metales, no metales y se une en las sales formando hidratos (CONAGUA, 2017).

Peña, S. y colaboradores en 2021 explican que la contaminación minera puede tener un impacto significativo en la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. Esto influye por la lixiviación de metales y productos químicos, ya que, durante la extracción y procesamiento de minerales, se utilizan sustancias químicas como cianuro, ácido sulfúrico y otros reactivos, las cuales se filtran en el suelo, llegando a las fuentes de agua subterránea o a los cuerpos de agua superficiales a través del proceso de lixiviación. Como resultado, los metales y productos químicos tóxicos pueden contaminar el agua, lo que afecta la calidad y la potabilidad del agua. La contaminación minera puede tener efectos tóxicos directos sobre la vida acuática, los metales pesados liberados en el agua pueden ser absorbidos por los organismos acuáticos, acumulándose en sus tejidos y causando daños en su salud y reproducción. Esto puede llevar a la disminución de la biodiversidad acuática y desequilibrios en los ecosistemas.

7.12 Contaminación Ambiental

La contaminación ambiental es un problema a nivel mundial, afecta directa e indirectamente la salud los seres humanos y altera el equilibrio de los ecosistemas.

Se entiende por contaminación ambiental a la presencia de sustancias nocivas en el agua, aire o suelo, las cuales son nocivas, se conocen como contaminantes ambientales y tienen diferente origen. El contacto con contaminantes tóxicos por desechos mineros persiste durante mucho tiempo en el agua y los sedimentos, incluso después de que la actividad minera ha cesado. Los contaminantes pueden permanecer en el medio ambiente, afectando negativamente la calidad de los ecosistemas durante años o incluso décadas. Es de vital importancia implementar prácticas mineras responsables, con sistemas efectivos de gestión de residuos para minimizar el impacto y proteger los recursos hídricos. La monitorización regular de la calidad del agua, la implementación de tecnologías de tratamiento y la aplicación de regulaciones ambientales son medidas clave para mitigar los impactos de la contaminación minera en el agua (Peña, S. et al., 2021).

7.13 Marco Legal

7.13.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

Esta ley establece las bases para la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente en México. Contiene disposiciones generales que son aplicables a todas las actividades, incluida la minería. La LGEEPA establece los principios y criterios para la evaluación y prevención de impactos ambientales, la gestión de residuos peligrosos y la protección de los recursos naturales.

7.13.2 Ley de Minería

La Ley Minera regula las actividades mineras en México, incluyendo la exploración, explotación y beneficio de minerales. En relación con la gestión ambiental, la Ley Minera establece la obligación de los titulares de concesiones mineras de cumplir con las disposiciones ambientales aplicables, así como de implementar medidas de protección ambiental y rehabilitación de áreas afectadas por la actividad minera.

El Reglamento de la Ley Minera contiene disposiciones complementarias a la Ley Minera y establece los requisitos y procedimientos para la obtención de concesiones mineras, el cumplimiento de las obligaciones ambientales, la elaboración de planes de manejo y la remediación de sitios contaminados, entre otros aspectos.

7.13.3 Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003

Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y posoperación de presas de jales.

Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones para la caracterización del jal y la caracterización del sitio, así como los criterios para la mitigación de los impactos ambientales por la remoción de la vegetación para el cambio de uso del suelo. Asimismo, señala especificaciones y criterios ambientales para las etapas de preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales, y para el monitoreo.

7.13.4 Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

Esta Norma Oficial Mexicana establece el procedimiento para identificar si un residuo es peligroso, el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales.

7.13.5 Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

La presente Norma Oficial Mexicana establece criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos; así como los criterios de remediación.

7.13.6 Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000

Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios y muestreo de análisis.

La presente Norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional y tiene por objetivo establecer las especificaciones técnicas de muestreo y análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, a partir de sus características específicas de constitución, formación y distribución.

7.13.7 Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007

Esta norma establece los criterios y especificaciones técnicas para el diseño, construcción, operación, monitoreo y cierre de depósitos de jales y sistemas de lixiviación de minas. Establece requisitos para el manejo y disposición de los jales, incluyendo la prevención de drenaje ácido de minas y la protección del suelo y agua subterránea.

7.13.8 Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009

Esta norma establece los criterios para la caracterización de los residuos de manejo especial (RME), que incluyen los residuos sólidos generados por la minería, como los jales mineros. Establece procedimientos para la identificación, clasificación y manejo seguro de estos residuos.

7.13.9 Norma Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011

Esta norma establece los límites máximos permisibles de metales y sustancias tóxicas en los suelos y sedimentos contaminados. Establece los valores límite para metales como arsénico, cadmio, cobre, plomo, mercurio y zinc, entre otros, en suelos y sedimentos afectados por actividades mineras.

7.13.10 Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021

Establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

La Norma Oficial Mexicana tiene por objeto establecer los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, con el fin de proteger, conservar y mejorar la calidad de las aguas y bienes nacionales.

Es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas de aguas residuales en cualquier tipo de cuerpo receptor propiedad de la Nación.

La Norma no aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes destinados exclusivamente para aguas pluviales ni a las descargas que se vierten directamente a sistemas de drenaje y alcantarillado municipales.

7.13.11 Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997

Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que son reutilizadas en servicios al público, como riego agrícola, recreación y otros usos. Define los criterios de calidad del agua para su reutilización y establece los límites de concentración para diferentes parámetros.

7.13.12 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

Esta norma establece los límites de calidad y tratamientos para el agua destinada al consumo humano. Define los requisitos microbiológicos, químicos y físicos del agua potable, incluyendo los límites máximos permitidos de contaminantes y los criterios para su desinfección y potabilización.

7.13.13 Norma Oficial Mexicana NOM-230-SEMARNAT-2000

Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, distintos a las descargas municipales y a las industriales específicas. Establece los criterios de calidad del agua y los límites de concentración para diversos parámetros.

7.13.14 Programas de Auditoría y Cumplimiento Ambiental (PAMA)

Los PAMA son instrumentos de gestión ambiental que se aplican a los proyectos y actividades que requieren autorización o permisos ambientales. En el caso de la industria minera, los PAMA establecen las acciones y metas específicas que deben ser cumplidas por los titulares de concesiones mineras para mitigar impactos ambientales, prevenir la contaminación y asegurar el cumplimiento de las normas ambientales.

Estas normas y leyes tienen como objetivo asegurar una gestión ambiental adecuada en la industria minera, promoviendo la protección del medio ambiente, la salud humana y la sustentabilidad de los recursos naturales. Las autoridades competentes son responsables de supervisar el cumplimiento de estas normas y aplicar sanciones en caso de incumplimiento.

7.13.15 Digestión ácida asistida por microondas de sedimentos y suelos (EPA Método 3051 A) con adecuación.

La EPA 3051 se refiere a una norma establecida por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Esta norma describe el procedimiento de digestión ácida asistida por microondas para muestras de sedimentos, lodos, suelos y aceites. Proporciona instrucciones detalladas sobre cómo realizar la digestión ácida de estas muestras utilizando un horno de microondas. El objetivo es disolver los componentes inorgánicos de la muestra para su posterior análisis de elementos traza y metales pesados. Se utiliza una mezcla de ácidos para lograr una disolución eficiente de los constituyentes de la muestra. Esta norma establece los parámetros específicos, como la relación muestra/solución ácida, las temperaturas y los tiempos de digestión,

para garantizar una disolución adecuada de los elementos y minimizar la pérdida o alteración de estos durante el proceso (EPA, 2007).

7.13.16 Digestión ácida asistida por microondas de muestras acuosas y extractos (EPA Método 3015:) con adecuación.

Esta norma establece el procedimiento de digestión ácida asistida por microondas para muestras acuosas y extractos utilizados en el análisis de elementos traza y metales pesados. Su objetivo es disolver los componentes inorgánicos de las muestras acuosas y extractos para su posterior análisis. Se utiliza una combinación de ácidos para lograr una disolución eficiente de los elementos. La norma EPA 3015 proporciona instrucciones detalladas sobre el procedimiento de digestión, incluyendo la preparación de la muestra, el uso de ácidos y aditivos, y las condiciones de temperatura y tiempo de digestión utilizando un horno de microondas (EPA,2017).

8. ZONA DE ESTUDIO

8.1 Localización

El sitio de estudio, jales de Velasco y presa Los Ángeles (Figura 1), se localiza en la porción sureste del estado de Hidalgo, México, dentro del municipio de Omitlán de Juárez cuyas coordenadas geográficas son 20° 10' 09'' de latitud norte y 98° 39' 01'' de longitud oeste, respectivamente, con una altura de 2357 msnm. Colinda por el norte con el municipio de Atotonilco el Grande; por el noreste con Huasca de Ocampo; por el sur con Mineral del Monte; por el oriente con Epazoyucan y por el occidente con Mineral del Chico (Ángeles O, 1989).

La distancia entre Pachuca de Soto y Omitlán de Juárez es 19 km por carretera, para llegar a la zona de estudio es necesario dirigirse hacia el corredor de la montaña pasando a través de Mineral del Monte, después tomar la Carretera Pachuca – Tampico 105 dirección hacia Huejutla, pasando

las comunidades de Velasco (donde se encuentra la presa de jales), Vicente Guerrero y finalmente al llegar a Venta de Guadalupe a mano izquierda se encuentra la presa Los Ángeles.

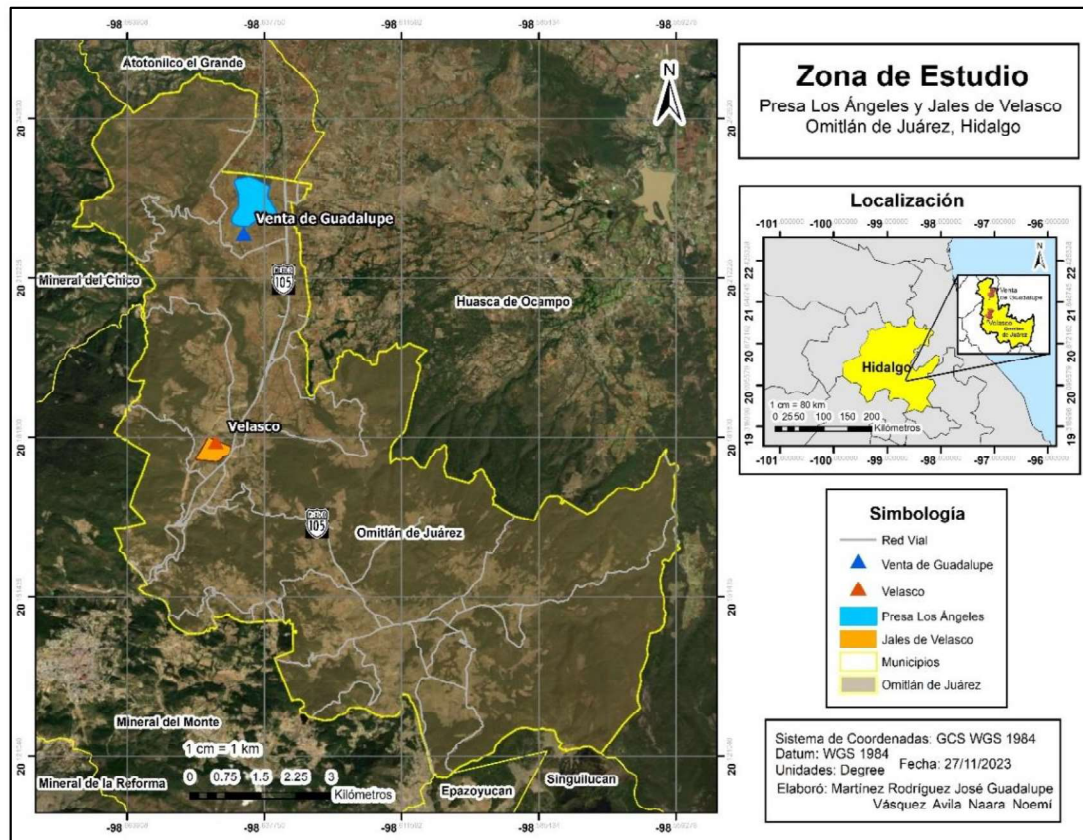


Figura 1. Mapa de zona de estudio ubicación de jales de Velasco y presa Los Ángeles 13159 (CONAGUA).

8.2 Presa Los Ángeles 13159 (CONAGUA)

La presa Los Ángeles se localiza en el poblado de Venta de Guadalupe, municipio de Omitlán de Juárez. Sus coordenadas son latitud norte $20^{\circ}13'56''$ y longitud oeste $98^{\circ}38'31''$, sobre una altitud de 2280 msnm. Construida durante los años de 1957 a 1960 por la Secretaría de Agricultura y Ganadería. Su cortina es de tierra compactada con taludes de enrocado basáltico; tiene una longitud de 1,140 m, altura de 16 m, ancho de la corona de 6 m, y la capacidad de almacenamiento es de 4.1 millones de metros cúbicos. Esta presa queda comprendida sobre una extensa meseta de relieve ligeramente inclinado en dirección hacia el norte, cuyos límites son al este el río Metztlán y al oeste el río Amajac. La geología superficial que caracteriza el área está formada principalmente de basaltos masivos en colores que varían de gris oscuro a café amarillento por

meteorización, de estructura compacta y vesicular, con una cubierta de suelo residual café rojizo de uso agrícola, muy susceptible a la erosión (Camargo, 1997).



Figura 2. Presa Los Ángeles, información de infraestructura.

8.3 Clima

El clima en el municipio de Omitlán de Juárez (Figura 7) es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (90.26%) y semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (9.74%) (INEGI, 2010).

Con base a los datos meteorológicos del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) se tiene registro de la estación 13159, en dónde se observa una precipitación variable (Figura 3), presentando el nivel más bajo para el año 2012 con un valor de 640 mm.

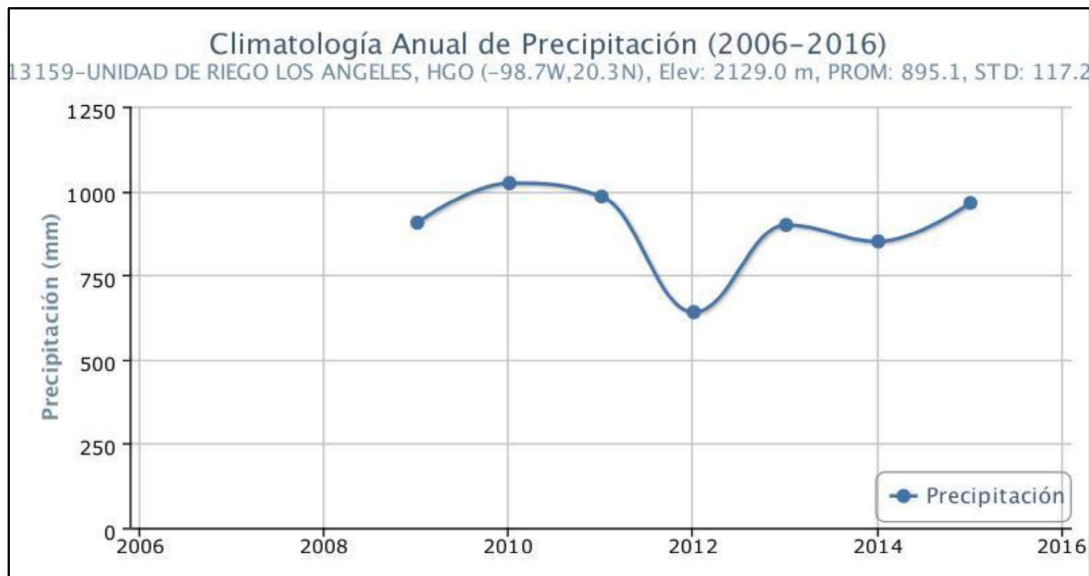


Figura 3. Variabilidad de la precipitación anual de la presa Los Ángeles, del año 2009-2015 (CLICOM-CICESE).

De acuerdo con el Monitoreo de Sequía de México (SMN, 2023) se tiene registro municipal para Omitlán de Juárez, con datos de intensidad de sequías desde el año 2003 hasta el año 2023. Del año 2003 al 2010 la presa Los Ángeles 13159 mantuvo un valor de sequía anormal seco, sin embargo, a partir del 2011 hubo un cambio considerable en los datos, categorizándola como sequía severa (Figuras 4 y 5), mientras que, durante el primer trimestre del 2023 se alcanzó la categoría de sequía extrema (Figura 6).

Es importante destacar que, si bien el estiaje es un fenómeno natural y cíclico, el cambio climático está intensificando la frecuencia y magnitud de las sequías, lo que a su vez contribuye a periodos más prolongados de estiaje y sus impactos asociados, un ejemplo evidente es la zona de estudio.



Figura 4. Imagen satelital, presa los Ángeles. 2012



Figura 5. Imagen satelital, presa los Ángeles. 2018.



Figura 6. Imagen satelital, presa los Ángeles. 2023

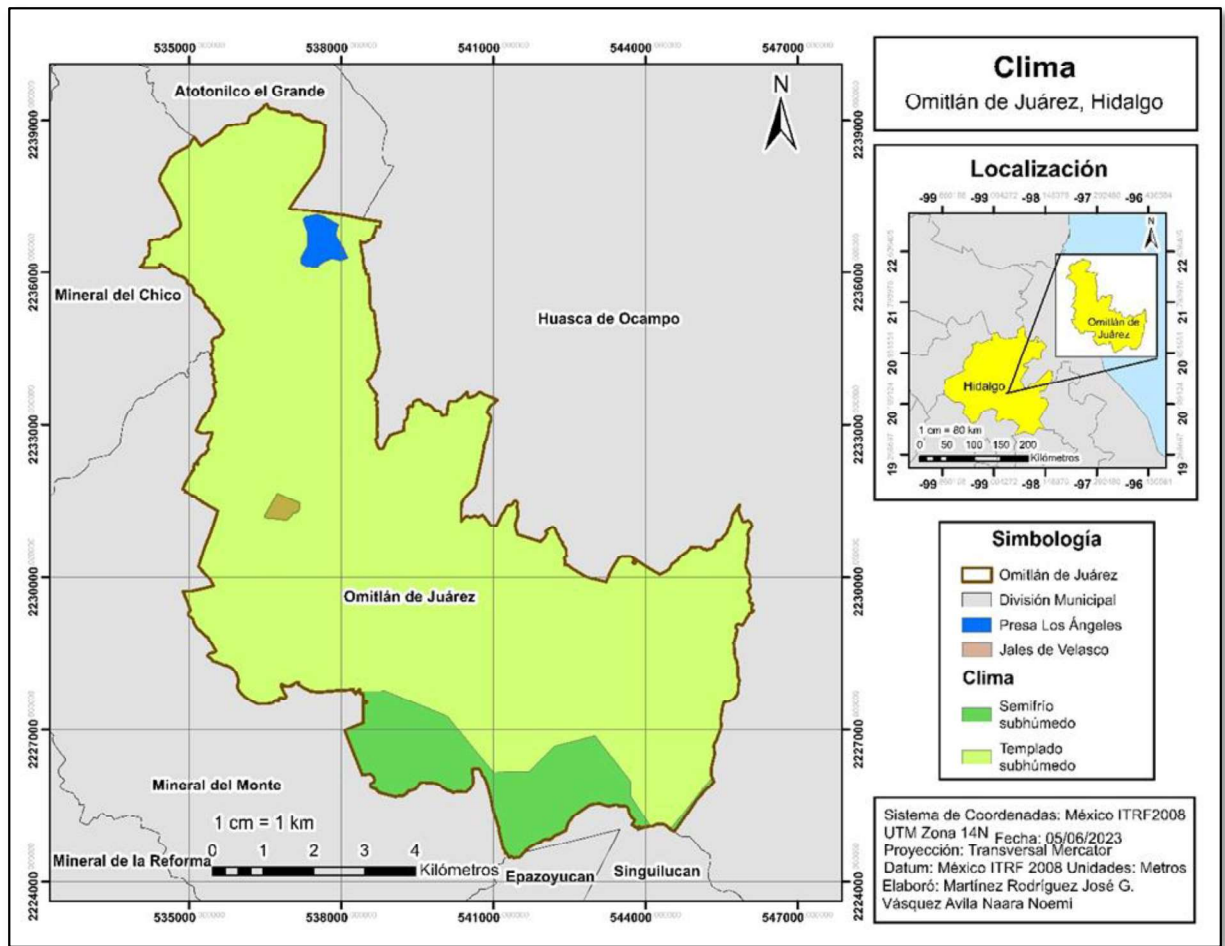


Figura 7. Mapa de climatología.

8.4 Orografía

El Municipio de Omitlán de Juárez se encuentra ubicado en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) formado por sierra en un 80% y en menor grado por llanuras (Figura 8).

Al sur se levanta una serie de promontorios conocidos como cordillera de Pachuca; al oriente varias montañas en las que se hallan enclavados algunos poblados. Al poniente los cerros Zumate Grande (3, 157 msnm) y Zumate Chico (2, 992 msnm), al noreste Cerro del Gallo (2, 943 msnm), Cerro Gordo (2, 640 msnm) (INEGI, 2010).

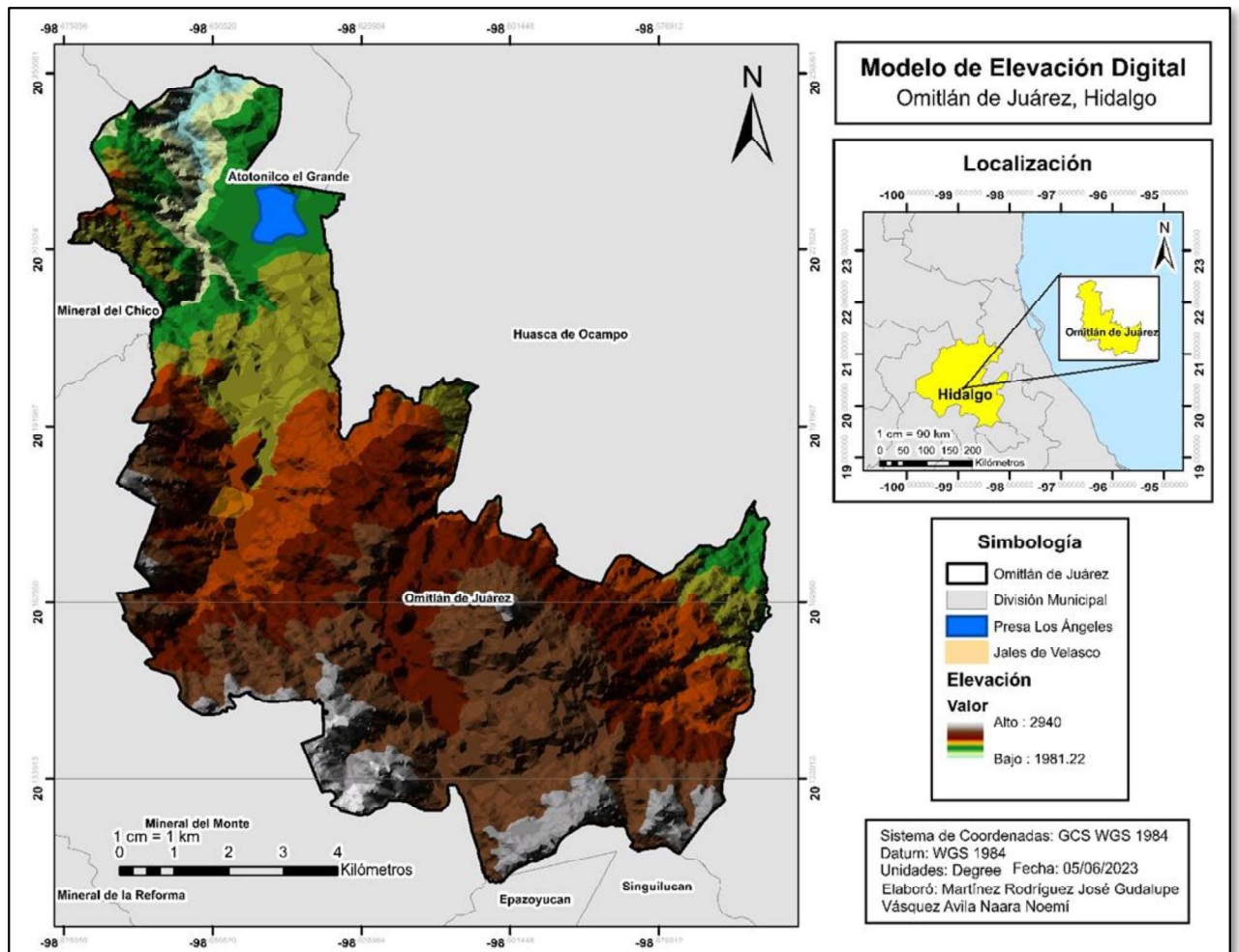


Figura 8. Mapa de modelo de elevación digital.

8.5 Hidrografía

Los sistemas hidrográficos del estado de Hidalgo están compuestos por afluentes del Golfo de México. El primero es el Amajac, que nace en la Sierra Baja y pasa sobre Omitlán, bordea los municipios de Actopan y Atotonilco el Grande, donde se incorpora al río Tizahuapan (Ramírez-Bautista et al., 2017).

En lo que respecta a la hidrografía del municipio (Figura 9), atraviesa el río Pánuco que forma parte de la Cuenca del Río Moctezuma, posee los ríos: Amajac, al oriente el arroyo de Salazar y

el río Bandola que desemboca en la Presa de Los Ángeles. Además, existen algunos pozos en las comunidades más alejadas de la cabecera municipal (INEGI, 2010).

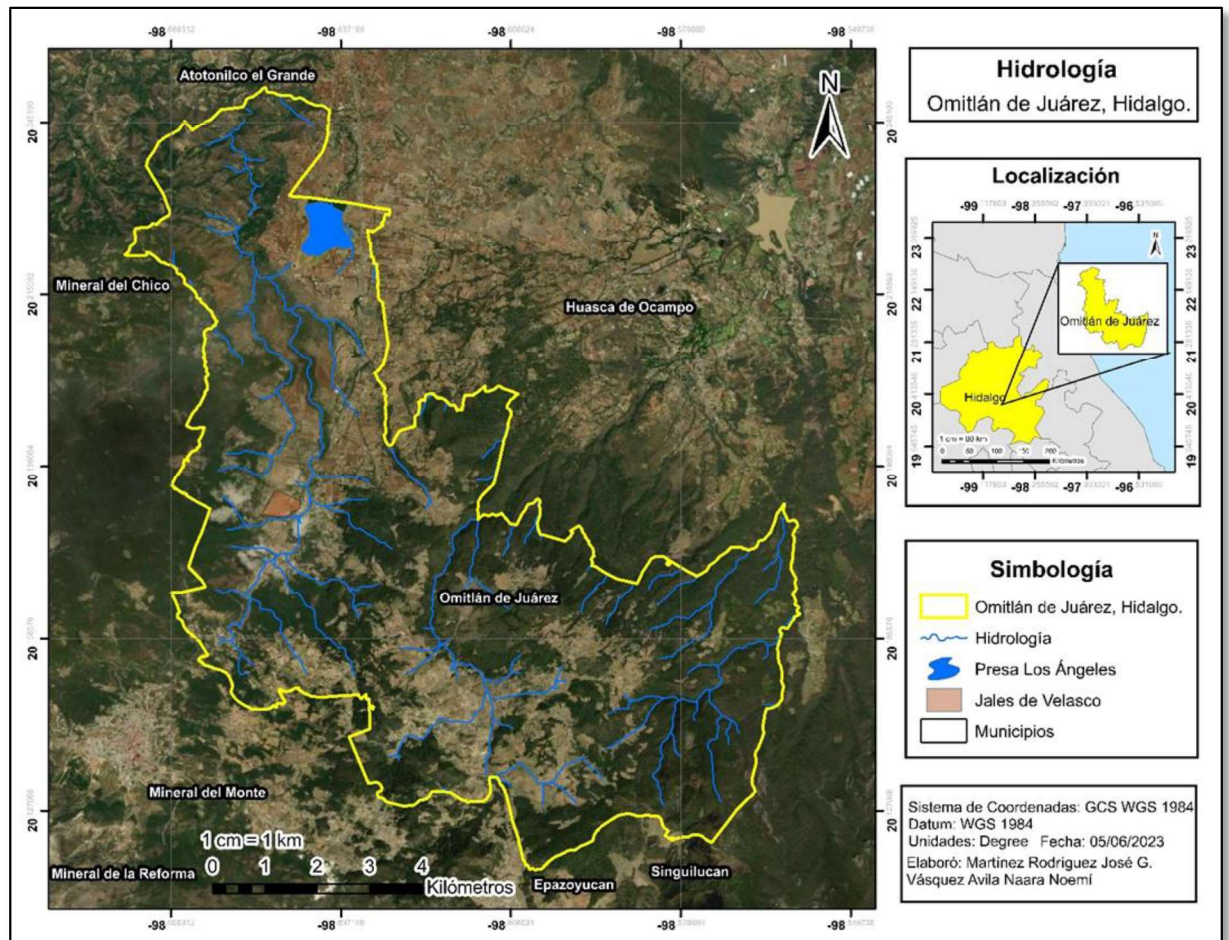


Figura 9. Mapa hidrológico del municipio de Omitlán de Juárez, Hidalgo. Elaboración propia.

8.6 Geología

De acuerdo con INEGI 2010, el municipio de Omitlán de Juárez corresponde al periodo del Neógeno, para la mayoría del territorio encontramos roca ígnea extrusiva, andesita brecha volcánica intermedia (53%), toba ácida (27.27%), toba ácida brecha volcánica ácida (7.14%), basalto (9.74%) y (0.55%) caliza (Figura 10).

La zona de estudio pertenece al Distrito Minero Pachuca-Real del Monte (DMPRM), el cual se ubica en la porción Oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), en el segmento Centro-Meridional del Estado de Hidalgo y se desarrollaron sobre una gran cantidad de

vetas de origen hidrotermal que, en conjunto, contienen una de las mayores concentraciones de plata conocidas a nivel mundial, además de albergar contenidos nada despreciables de otros metales (Escamilla-Casas *et al.*, 2020; Camprubí, 2018)

Los minerales primarios y secundarios identificados en las vetas del distrito llegan en número a unas 25 especies, las más comunes son cuarzo, calcita, albita, rodonita o bustamita. Entre los sulfuros innobles la pirita es el mineral más extendido, seguido por esfalerita, galena y calcopirita. Estos minerales están presentes en todas las vetas del distrito, aunque no necesariamente se hallan en todas partes.

Los sulfuros argentíferos constan predominantemente de argentita y acantita; la polibasita y la estefanita se encuentran en menos de la mitad de las vetas del distrito y en gran parte del área de Pachuca; son raras la miargirita, pirargirita, proustita y sternbergita.

Los sulfuros cupríferos secundarios, tales como la calcocita y la covellita, son comunes, en cantidades pequeñas. El cuarzo, incluyendo la amatista, el ópalo y la calcedonia, es el mineral más abundante en la ganga, presentándose en todas las vetas. La calcita si encuentra en pequeñas cantidades en todas las vetas; falta localmente, mientras que comprende la mayor parte de la ganga en otros lugares. La albita es un mineral común en la ganga de la mayoría de las vetas, aunque se presenta solo en cantidades pequeñas, con excepción de unas pocas vetas.

La rodonita y la bustamita en cantidades pequeñas en muchas de las muestras del distrito y sólo localmente se presentan en cantidades grandes; son más comunes en las vetas norte - sur del área de Real del Monte que en las vetas del área de Pachuca. En donde se presentan en cantidades grandes, comúnmente se hallan asociadas con menas ricas en plata.

La clorita, prehnita, caolín, barita, sericita, adularia, epidota y otros minerales de la ganga de las vetas se presentan en cantidades que difieren considerablemente de uno a otro lugar, pero generalmente son menos abundantes que los minerales anteriormente mencionados de la ganga. Muchos minerales secundarios formados por la oxidación supergénica en pequeñas cantidades en la mayoría de las vetas.

En la zona mineralizada Dos Carlos, Distrito Minero Pachuca- Real del Monte, afloran rocas volcánicas y cuerpos intrusivos del Mioceno, pertenecientes a la Sierra de Pachuca. Los rasgos geológicos y estructurales observados sugieren cuatro eventos geológicos principales: 1)

instauración de la roca de caja, 2) emplazamiento de cuerpos intrusivos, 3) deformación frágil y 4) mineralización. En campo, se identifican diferentes litologías: cuerpos ígneos intrusivos félsicos a intermedios, variando en composición desde cuarzolita, micro-granodiorita, micro-diorita porfídica y granitoide rico en cuarzo; así como rocas extrusivas intermedias. Las observaciones en la deformación frágil sugieren la existencia de un régimen transtensional, asociado con la Falla Santa Gertrudis, constituyendo un sistema de fallas lateral izquierdo, muy probablemente de escala regional (Escamilla-Casas, 2020).

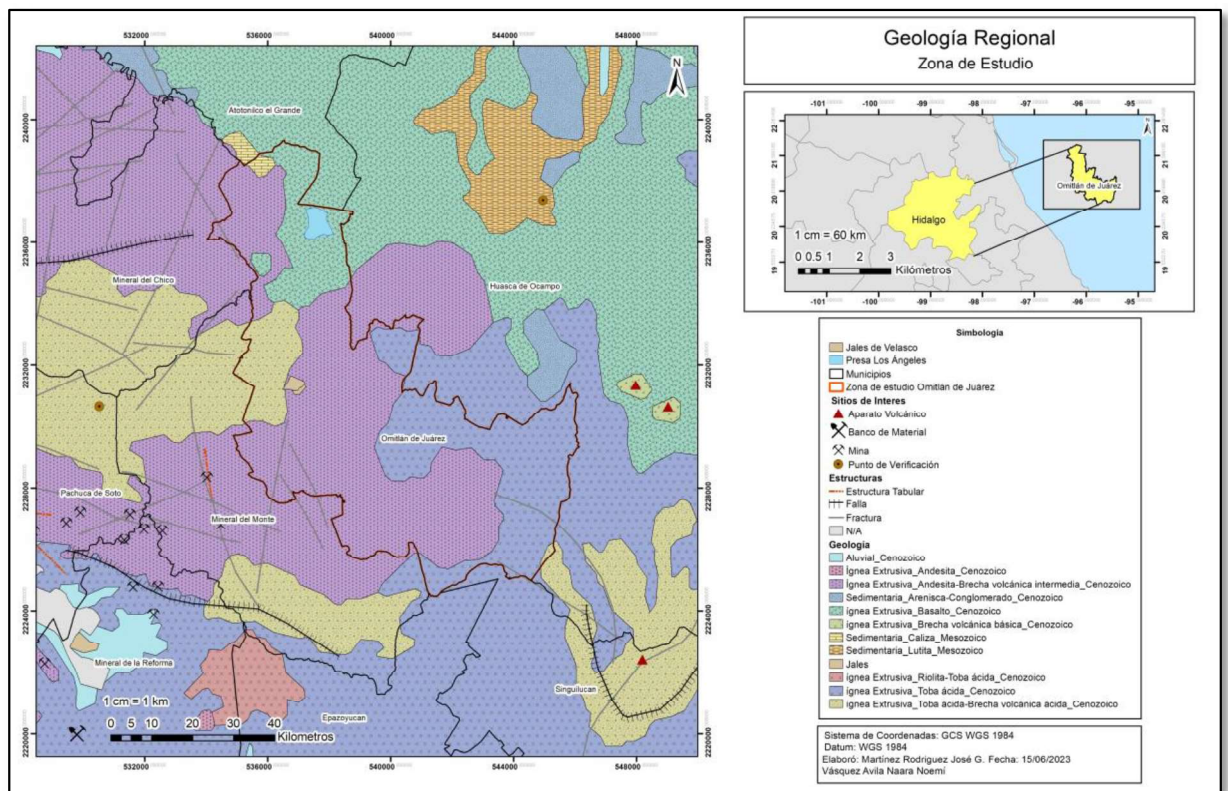


Figura 10. Mapa de geología regional. (Extracto de carta geológica F14-D82 SGM)

8.7 Formaciones

Omitlán se encuentra dentro del distrito minero Pachuca-Real del Monte, así como también de la formación San Cristóbal, la presa Los Ángeles se encuentra dentro de la formación Atotonilco el Grande que corresponde a una secuencia de depósito de actividad basáltica, rellenando amplios valles con gravas, arenas, limos y arcillas, formando conglomerados policimáticos y areniscas (Azpeitia, 2007).

De acuerdo a la descripción hecha por Geyne y colaboradores (1963), la Formación San Cristóbal está compuesta por derrames densos de andesita olivínica con cantidades pequeñas de capas tobáceas y clásticas. Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) mencionan que de manera general esta unidad se compone por intercalaciones de derrames de lava, brechas volcánicas y piroclastos.

La formación Atotonilco el Grande está constituida hacia su base por depósitos gruesos, que gradúan a arenisca en la parte media y cima de la unidad, con algunas intercalaciones limo-arenosas, así como stratos tabulares con laminación paralela, los cuales contienen frecuentemente fósiles. Salvador-Flores (2001) y Arellano-Gil et al. (2005) mencionan una variada litología como parte de esta formación, entre las que se encuentran conglomerados, *grauwacas* líticas, litarenitas, limolitas, lutitas limosas, margas y depósitos volcánicos (ceniza).

8.8 Edafología

Dentro del municipio se encuentran algunos suelos (Figura 11) como Feozem (71.47%), Luvisol (17.50%) y Regosol (8.73%) (INEGI, 2010), que se describen a continuación:

Feozem: Son suelos que tienen una capa superficial blanda de color oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes.

Luvisol: Asociados a vegetación generalmente de bosque o selva, con frecuencia son de color rojo o con tonos amarillos.

Regosol: Tienen una amplia gama de texturas, se encuentran en distintos climas y con cualquier vegetación (Gobierno del estado de Hidalgo, 2011).

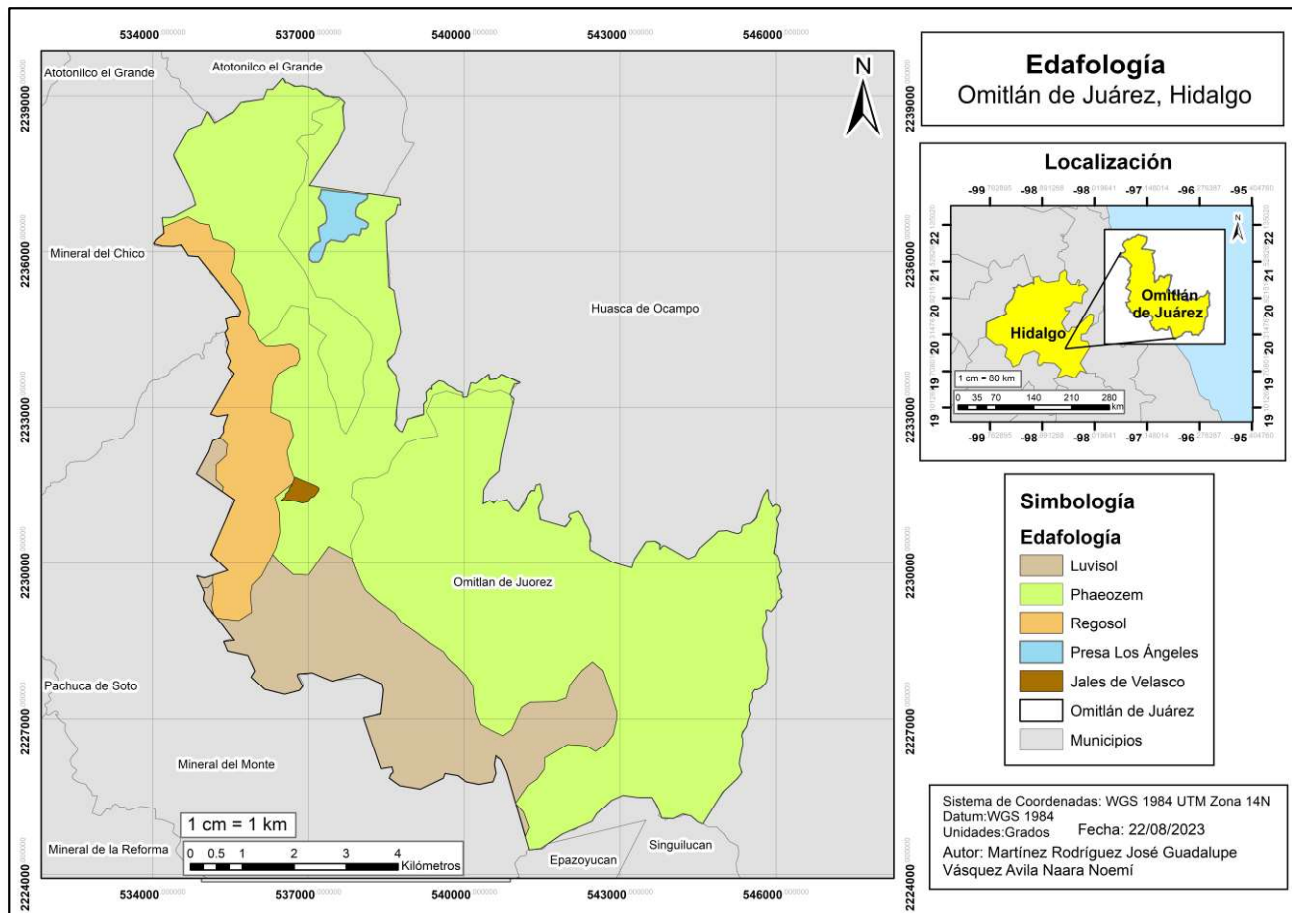


Figura 11. Mapa de edafología.

8.9 Uso de suelo

El uso principal que se le da a la tierra en el Municipio es agrícola (Figura 12), ya que se destina alrededor del 52.8% de la superficie, otro tipo de uso es el de bosque y pastos naturales; ya que la mayoría del suelo es de buena calidad, tiene una producción de maíz, avena forraje, frijol, trigo, grano y cebada forraje. En lo referente al uso pecuario, las áreas de praderas y de pastizales son destinadas para el ganado ovino, caprino, porcino y bovino principalmente (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2011).

Para la agricultura mecanizada continua (17.40%), para la agricultura con tracción animal continua (1.72%), para la agricultura manual continua (30.34%), no apta para la agricultura (50.54%).

Para el establecimiento de praderas cultivadas con maquinaria agrícola (17.40%), para el establecimiento de praderas cultivadas con tracción animal (1.72%), para el aprovechamiento de la vegetación natural diferente del pastizal (30.34%), para el aprovechamiento de la vegetación natural únicamente por el ganado caprino (2.65%), no apta para uso pecuario (47.89%) (INEGI, 2010).

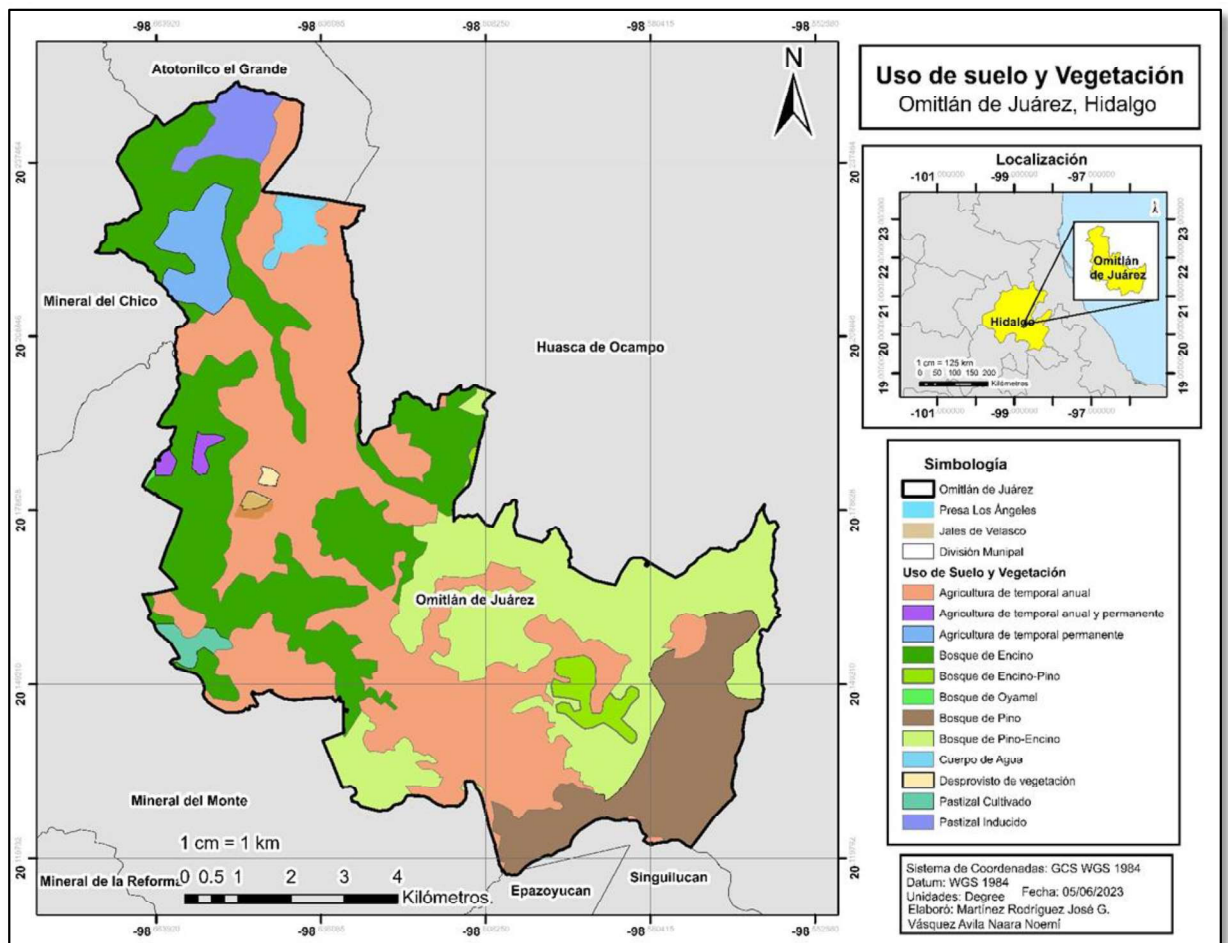


Figura 12. Mapa de uso de suelo y vegetación.

8.10 Geomorfología

El municipio de Omitlán de Juárez, Hidalgo se encuentra dentro de la Provincia del Eje Neovolcánico, la cual se caracteriza por el predominio de derrames basálticos, así como por numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugieren estar controlados por la presencia de fosas tectónicas. Así como también se caracteriza por el

afloramiento de rocas precámbricas, las diferentes sierras alcanzan alturas de hasta 2,700 metros sobre el nivel del mar, y cañadas profundas que alcanzan un desnivel de hasta 500 metros (INEGI, 2016).

9. MÉTODOLÓGÍA

El manejo de las muestras debe ser cuidadoso por efectos de contaminación que puedan ocurrir durante la colección, transporte y manipulación para los diferentes análisis. Para la preparación de las muestras de jales y sedimentos el secado debe ser a temperatura ambiente (de manera natural), en un cuarto cerrado y libre de corrientes de aire para evitar el contacto con el mismo y el polvo, así como la contaminación de partículas de una muestra a otra (Moreno *et al.*, 2012).

9.1 Muestreo de jales

Para recolección de muestras se realizó una caminata en la presa de jales de Velasco (Figura 13), se tomaron 4 muestras representativas a una profundidad aproximada de 20-30 cm de la superficie, con un peso aproximado por muestra de 1.5 kg, se les asignó una nomenclatura para su identificación, la cual corresponde al municipio, zona y coordenadas (Tabla 1). Se debe tomar lectura en coordenadas geográficas del punto de referencia por cada muestra mediante un GPS (Garmin xl 12). Los jales se muestrearon con el objetivo de analizar su composición geoquímica respecto al yacimiento de origen, además de conocer como el transporte de estos hacia la presa ha cambiado su composición y de qué manera ha influido en la contaminación del sedimento y agua de la presa Los Ángeles.

Tabla 1. Coordenadas de muestreo de sedimento de jales de Velasco

MUESTRA	Latitud (Y)	Longitud (X)
OJ1	20.178056N	98.649964W
OJ2	20.180352N	98.649687W
EJONW01	20.180012N	98.644822W
EJONW02	20.180352N	98.646548W

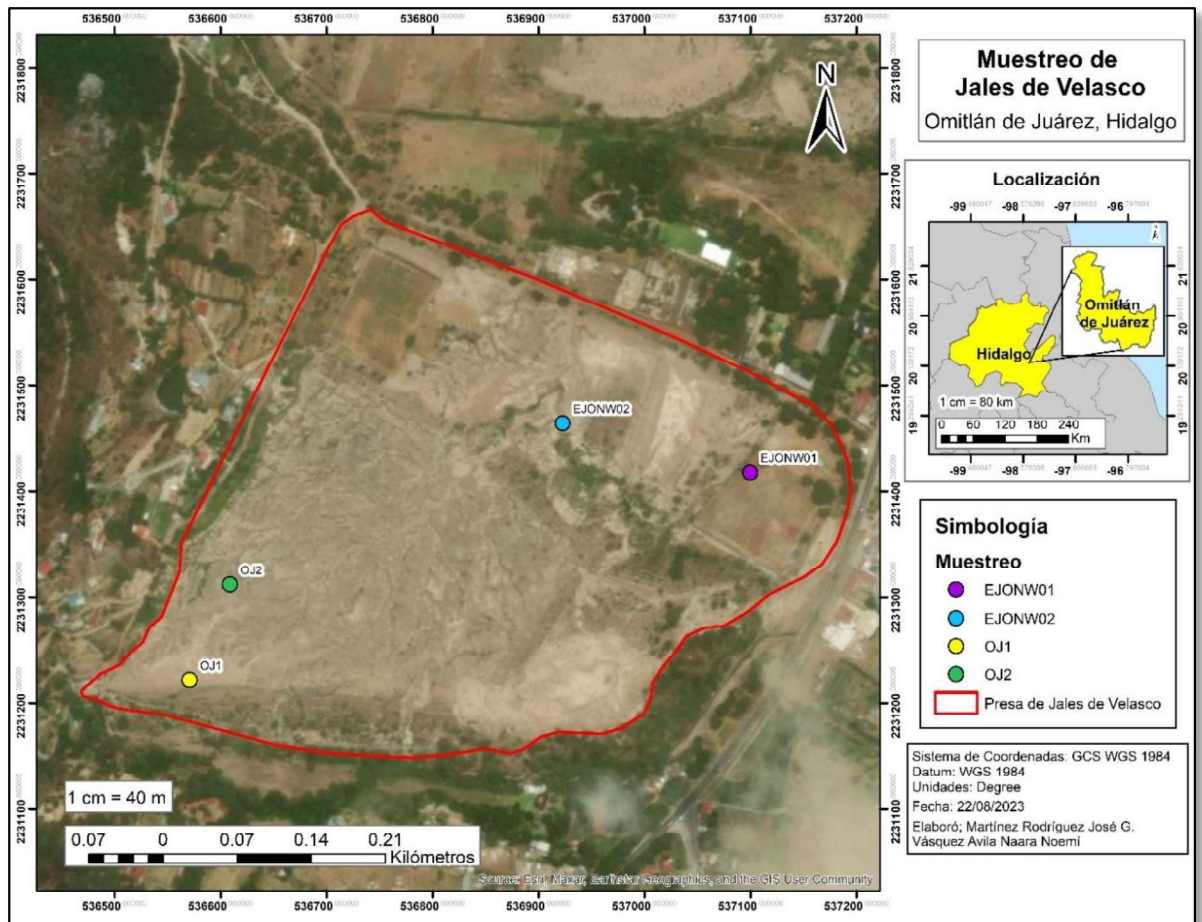


Figura 13. Mapa de muestreo de sedimento de jales de Velasco.



Figura 14. Jales de Velasco.



Figura 16. Grietas de desecación.

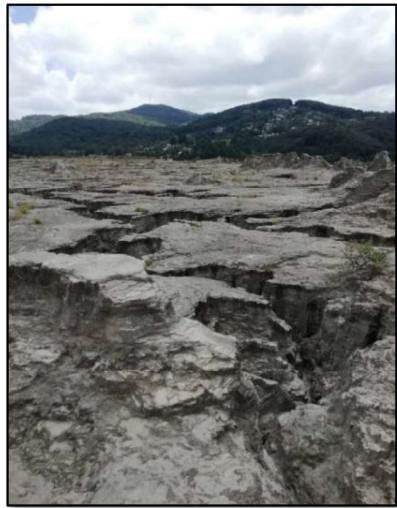


Figura 15. Cárcavas en jales de Velasco.



Figura 17. Sequía en presa Los Ángeles.

9.2 Muestreo de sedimento

Posteriormente se realizó un muestreo en la presa Los Ángeles considerando factores de acceso a la presa (Figura 18) como la viabilidad del terreno, presencia de flora o fauna y escurrimientos de agua doméstica. Se empleó el muestreo aleatorio, que cualquier toma de muestra es independiente de alguna previa, se tomaron 19 muestras de sedimento a una profundidad de 0-30 cm y de 30-60 cm, a cada muestra se le asignó una nomenclatura con base en el orden de toma de muestra y su profundidad (Tabla 2), se localizaron 4 muestras al NW de la presa, 3 al NE, al SW 5 y al SE 7 muestras (Figura 19); la finalidad de este muestreo fue conocer la cantidad de elementos transportados a la presa procedente de los aires de Velasco.



Figura 18. Sedimento de presa Los Ángeles.

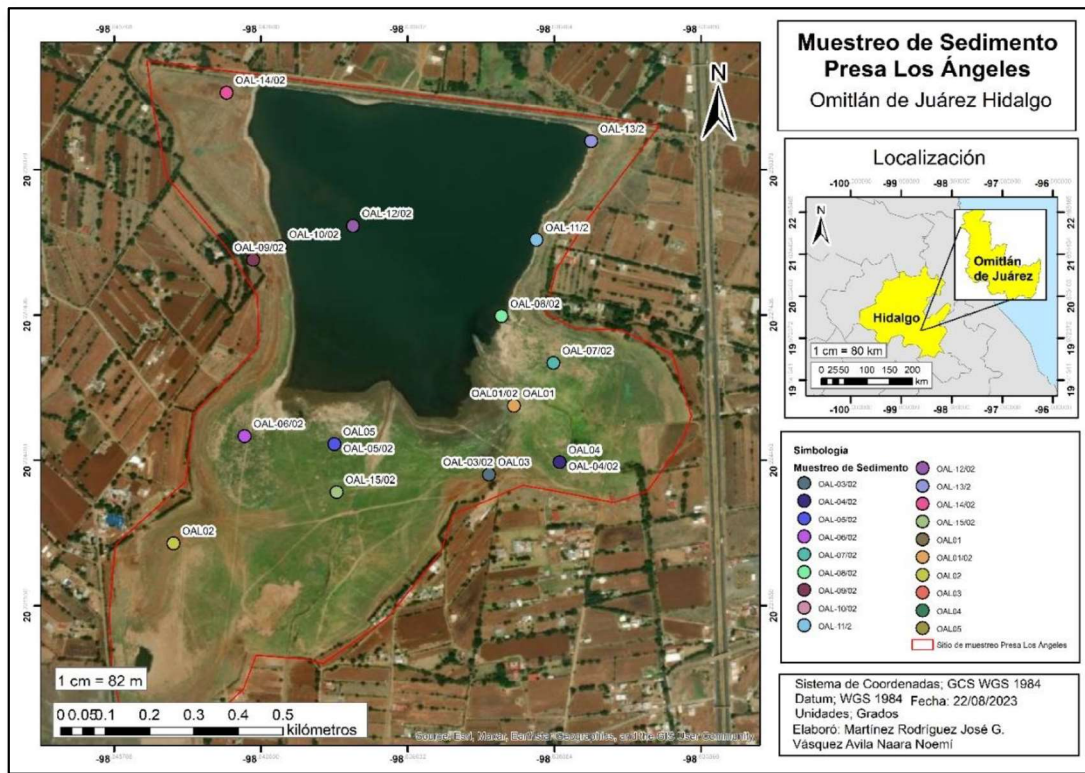


Figura 19. Mapa de muestreo de sedimento, presa Los Ángeles.

Tabla 2. Coordenadas de muestreo de sedimento de presa Los Ángeles

MUESTRA	Latitud (Y)	Longitud (X)
OAL01	20.225601	98.637681
OAL01/02	20.225601	98.637681
OAL02	20.222815	98.644569
OAL03	20.224208	98.638184
OAL04	20.224459	98.636756
OAL05	20.224825	98.641313
OAL-03/02	20.224208	98.638184
OAL-04/02	20.224459	98.636756
OAL-05/02	20.224825	98.641313
OAL-06/02	20.224985	98.643129
OAL-07/02	20.226469	98.636882
OAL-08/02	20.227417	98.637933
OAL-09/02	20.228556	98.642958
OAL-10/02	20.228822	98.64241
OAL-11/2	20.228959	98.637225
OAL-12/02	20.229245	98.640937

OAL-13/2	20.230958	98.636117
OAL-14/02	20.23194	98.643495
OAL-15/02	20.223854	98.641268

9.3 Muestreo de agua superficial

Para el muestreo de la presa Los Ángeles se consideraron sitios convenientes respecto a la accesibilidad, profundidad, presencia de vegetación y turbidez. Se tomaron 8 muestras por duplicado, 2 localizadas en el NW de la presa, 2 más en el NW, 2 al centro de la presa y 2 al sur donde se encuentra la entrada de agua (figura 20). Para la toma de muestra se ocuparon 16 frascos Nalgene de 1000 ml previamente lavados con jabón libre de fosfatos y enjuagados con agua desionizada. Durante la toma de muestra primero se calibró el potenciómetro (Hanna HI 98127) con soluciones Buffer HYCEL DE MÉXICO S.A. DE C.V. de 4.00 (± 0.02), 7.0 (± 0.02) y 10.08 (± 0.05) (figura 21). Posteriormente se recolectó un poco de agua, se acondicionó el frasco con agua de la presa, se agitó y se desechó, después de esto se tomaron dos muestras de 1000 ml del mismo sitio para caracterizar cationes, acidulando con HNO_3 para tener un pH de 3 (+/- 0.3) y conservar los posibles metales sin precipitar dentro de las muestras, se tomaron las coordenadas de cada punto (tabla 3), además de la temperatura de cada muestra.

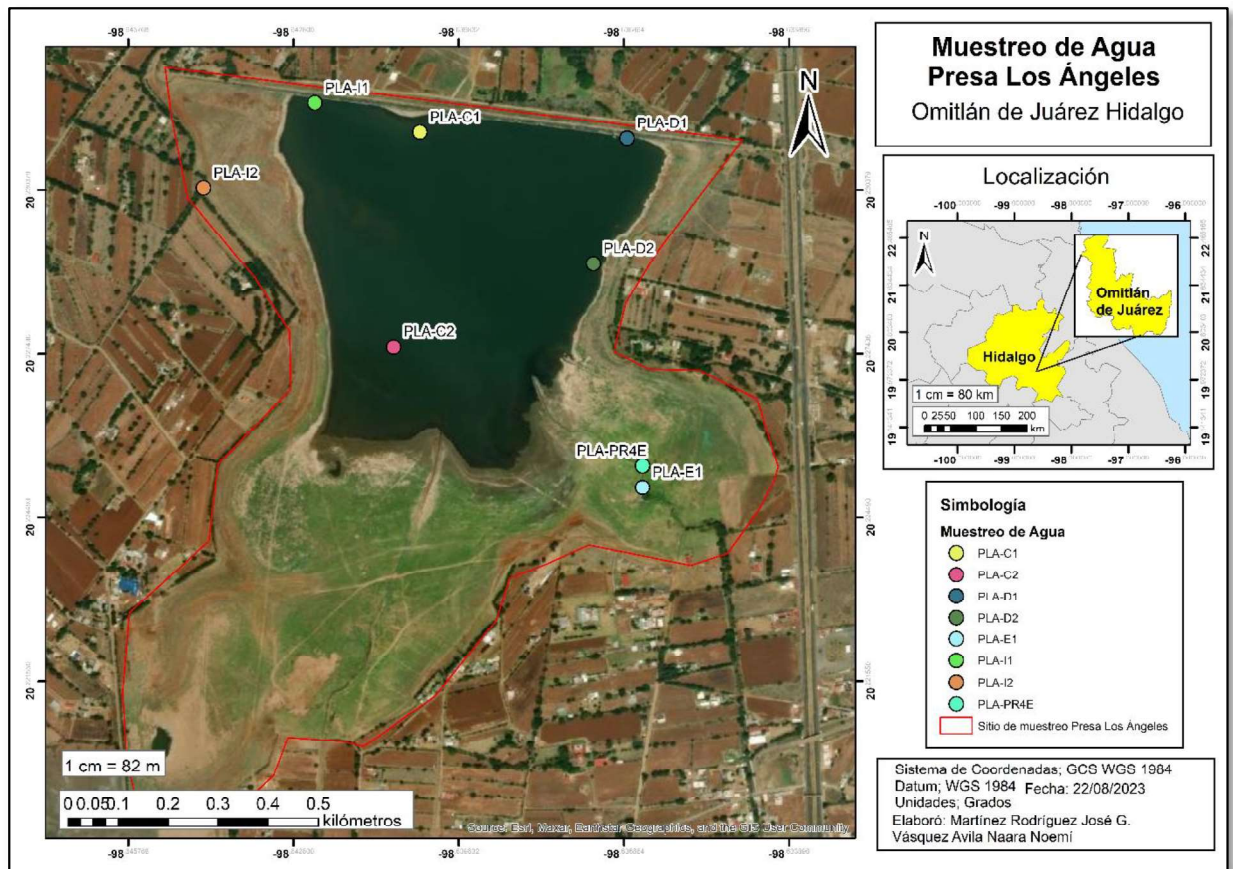


Figura 20. Mapa de muestreo de agua de la presa Los Angeles.



Figura 21. Calibración del potenciómetro.

Tabla 3. Coordenadas de muestreo de agua de la presa Los Ángeles

MUESTRA	Latitud (Y)	Longitud (X)
PLA-E1	20.225028N	98.636528W
PLA-C1	20.231417N	98.640528W
PLA-C2	20.227556N	98.641W
PLA-I1	20.231306N	98.636806W
PLA-I2	20.229056N	98.63741W
PLA-D1	20.231944N	98.642417W
PLA-D2	20.230417N	98.644417W
PLA-PR4E	20.225417N	98.636528W



Figura 22. Toma muestra lado NW de la presa.



Figura 23. Toma de muestra lado NE de la presa.



Figura 24. Acidulación con HNO_3 .



Figura 25. Medición de pH después de acidular muestra.

9.4 Difracción de Rayos X (DRX)

Para la preparación de muestras en polvo se separaron de 0.5-1 g de sedimento que fue molido en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino y homogéneo a textura de talco. Las muestras fueron almacenadas en tubos Eppendorf con ayuda de un trozo de papel (Figura 28). Posteriormente las muestras procesadas se extendieron sobre un porta muestras, usando una pequeña cantidad de aglomerante adhesivo. El resultado de la pulverización fue un número de pequeños cristales con la propiedad de reflexión de los rayos X, a través de un difractómetro de rayos x (DRX), marca Inel modelo Equinox 2000 en el laboratorio de Difracción de Rayos X en el área académica de ciencias de la tierra de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Los difractogramas obtenidos (Figura 29) permitieron determinar la intensidad, el ángulo 2θ para así conocer las distintas fases minerales en los sedimentos, el gráfico en abscisas indica el ángulo de difracción y en ordenadas la intensidad correspondiente, además los datos de la muestra analizada, la identificación consiste en hallar en la base de datos el mineral a cuyo difractograma corresponde. (SGM, 2017)



Figura 26. Difractómetro.



Figura 27. Datos de equipo de difracción de rayos x.



Figura 28. Procesamiento de las muestras de sedimento.

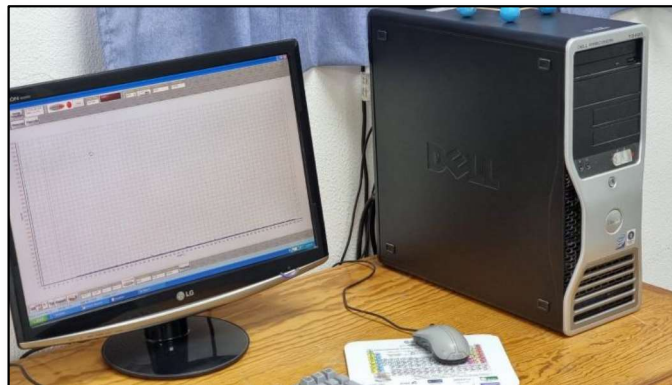


Figura 29. Obtención de los resultados del difractograma.

9.5 Determinación de parámetros fisicoquímicos de sedimento

9.5.1 Medición de pH

La medición de pH se realizó con base al método para suelos NMX-AA-008-SCFI-2000. Para la calibración del equipo, se utilizaron soluciones Buffer HYCEL DE MÉXICO S.A. DE C.V. de 4.00 (± 0.02), 7.0 (± 0.02) y 10.08 (± 0.05). Posteriormente se mezcló el jal con agua desionizada (relación 1:10) durante 10 min. La mezcla se dejó decantar durante 10 min, y se midió el pH por medio de un potenciómetro (Hanna HI 98127). La determinación en los lixiviados obtenidos se realizó de manera directa por inmersión del electrodo en la solución.

9.5.2 Concentraciones de metales solubles (Extracto PECT)

Los jales mineros fueron evaluados de acuerdo con la normatividad mexicana (NOM-052-SEMARNAT-1993). El procedimiento permite determinar la concentración de metales solubles en un residuo de acuerdo con la prueba de extracción PECT (Procedimiento de Extracción de Constituyentes Tóxicos), establecida en la NOM-053-SEMARNAT-1993. A continuación, se describe la metodología empleada:

Las muestras se colocaron en una mesa de agitación a 30 rpm (Figura 30) con la solución de extracción (relación 1:20) durante un periodo de 16- 18 h a temperatura ambiente. La metodología propone dos soluciones de extracción, dependiendo del pH de la muestra: (1) solución pH 4.9 ± 0.1 ; (2) solución pH 2.9 ± 0.1 .

Reactivo de extracción 1: Añada 5.7 ml de ácido acético glacial a 500 ml de agua desionizada o desmineralizada, añada 64.3 ml de NaOH 1N y afore a un litro. Cuando se prepara en forma correcta, el pH de este reactivo es de 4.93 ± 0.05 .

Reactivo de Extracción 2: Diluir 5.7 ml de ácido acético glacial con agua desionizada o desmineralizada a un volumen de 1 litro. Cuando se prepara en forma correcta, el pH es de 2.88 ± 0.05 .

La utilización de las soluciones se decide con base a: si $\text{pH} > 5$, se utiliza la solución 2; si $\text{pH} < 5$, se utiliza la solución 1 (Figura 31).

En este caso, todas las muestras tuvieron un pH mayor a 5, y se usó la solución 2, que corresponde a ácido acético glacial. Finalmente, el extracto obtenido es analizado mediante ICP para la cuantificación de la concentración EPT solubles.



Figura 30. Agitación de muestras de sedimento para determinación por el método de extracto PECT.



Figura 31. Medición de pH de sedimento.

9.5.3 Digestión ácida asistida por microondas de sedimentos, y suelos (Método EPA 3051) con adecuación.

Este método de extracción por microondas está diseñado para imitar la extracción usando calentamiento convencional con ácido nítrico (HNO_3), o alternativamente, ácido nítrico y ácido clorhídrico (HCl), de acuerdo con el método 200.2 y el método 3050 de la EPA. El método

pretende lograr la descomposición total o parcial de la muestra es aplicable a la disolución de ácido asistida por microondas de sedimentos, lodos, suelos y aceites.

Se disolvió una muestra representativa en HNO_3 concentrado, o alternativamente, HNO_3 concentrado y HCl concentrado usando calentamiento por microondas con una unidad de microondas de laboratorio adecuada. La muestra y los ácidos se colocaron en un polímero de fluorocarbono (PFA o TFM), el recipiente se selló y se calentó en la unidad de microondas durante un período de tiempo específico. Después de enfriar, los contenidos del recipiente se filtraron, y luego se diluyeron a un volumen de 100 ml y se analizaron mediante el método de ICP.

Las muestras de sedimento fueron digeridas en un microondas (MARSXpress marca CEM) con una matriz inicial de 0.15 g. de muestra, más una mezcla de ácidos con 10 ml de HF, 7 ml de HNO_3 y 5 ml de HCl (Figura 32), durante un periodo de 30 minutos, después de este lapso se dejó enfriar el vaso, se adicionó una matriz secundaria que contiene 25 ml de H_3BO_3 y se ingresó nuevamente al microondas (Figura 33) con un periodo de 30 minutos, al término del procedimiento se dejó enfriar la mezcla, se filtró con un papel filtro de poro medio y se aforó en un matraz de polipropileno a un volumen de 100 ml para realizar las determinaciones por la técnica de ICP.

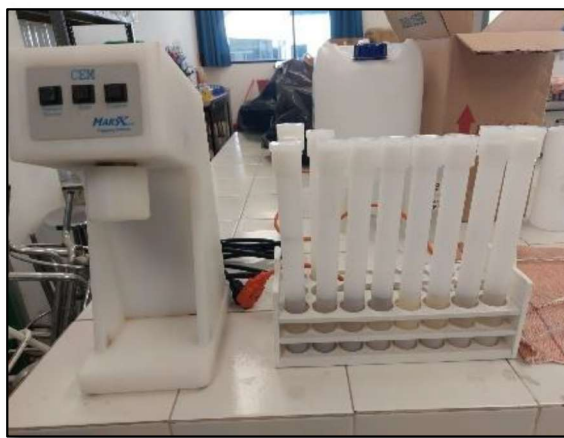


Figura 32. Sedimento con mezcla de ácidos.



Figura 33. Digestión ácida por método EPA 3051.

9.6 Determinación de parámetros fisicoquímicos de agua.

9.6.1 Digestión ácida asistida por microondas de muestras acuosas y extractos (Método EPA 3015) con adecuación.

Este método de microondas está diseñado para realizar la extracción usando calentamiento por microondas con ácido nítrico (HNO_3), o alternativamente, ácido nítrico y ácido clorhídrico (HCl). Este método es aplicable a la extracción/disolución ácida asistida por microondas de metales disponibles en muestras acuosas, agua potable, extractos de procedimientos de movilidad y desechos que contienen sólidos en suspensión.

Las muestras de agua se digitaron en un microondas (MARSXpress marca CEM) con una matriz inicial que contiene 45 ml de muestra y 5 ml de HNO_3 , durante un periodo de 30 minutos, después de este lapso se dejó enfriar el vaso, se adicionó una matriz secundaria con 25 ml de H_3BO_3 (Figura 34), se ingresó nuevamente al microondas en un periodo de 30 minutos, al término del procedimiento se dejó enfriar la mezcla, se filtró con un papel filtro de poro medio y se aforó en un matraz de vidrio a un volumen de 100 ml (Figura 35) para realizar las determinaciones por la técnica de ICP.

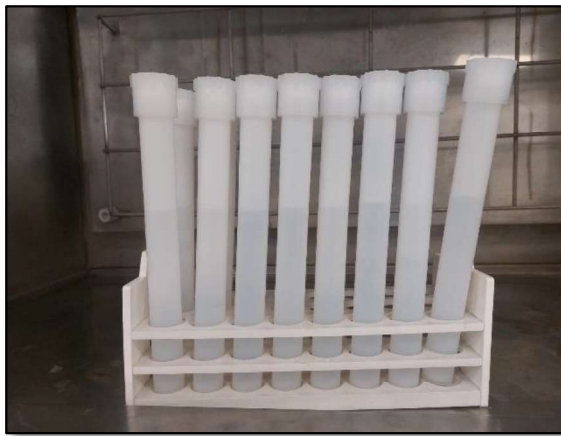


Figura 34. Adición de ácido bórico saturado.



Figura 35. Filtrado y aforado de muestras digeridas de agua.

9.7 Técnicas analíticas

9.7.1 Espectrometría con plasma acoplado por inducción (ICP)

Es una técnica multielemental caracterizada por su alta sensibilidad y exactitud, bajo límite de detección y por su amplio rango de linealidad. Además, permite una determinación simultánea de muchos elementos mayoritarios y minoritarios en muestras acuosas. Se desarrolla una estrategia simple para la determinación directa de elementos mayoritarios, minoritarios y trazas en muestras de aguas por ICP (Espectrometría ICP, 2019).

Las muestras se introdujeron dentro del plasma como un aerosol, para lo cual se usó un capilar que colectó 3 tomas de la muestra (Figura 36). En el plasma se evaporó el solvente de la muestra y los compuestos presentes se descompusieron en sus respectivos átomos, las concentraciones fueron determinadas mediante una curva de calibración que incluía los elementos de interés (Fe, Zn, Pb, Cu, Ag, Cd). La lectura de las muestras (Figura 37) se realizó con el equipo Optima 8300 marca Perkinelmer, en el laboratorio de análisis de inducción de plasma acoplado (ICP).



Figura 36. Procesamiento de muestras en ICP.

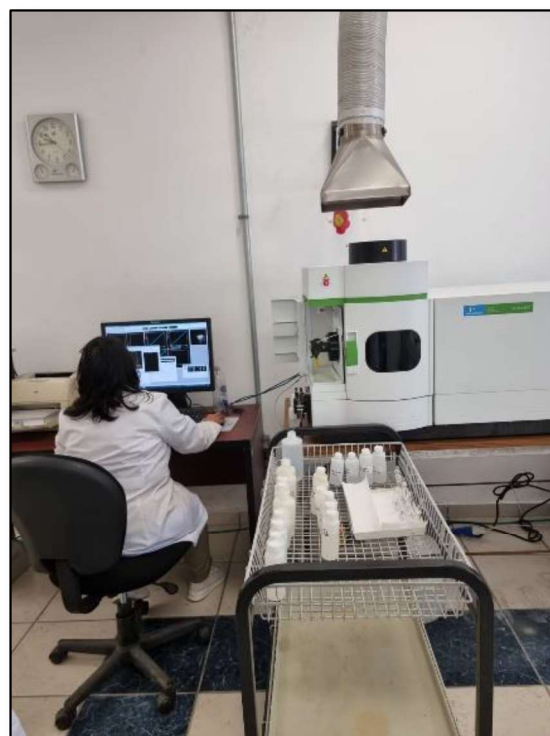


Figura 37. Lectura de muestras en ICP.

9.7.2 Fluorescencia de Rayos X (XRF)

Fluorescencia de Rayos X (XRF) es una técnica analítica instrumental no destructiva, que mide la composición elemental de una sustancia generalmente sólida al ser expuesta a una radiación de rayos x. Los analizadores de fluorescencia de rayos X (XRF) Thermo Scientific™ Niton™ se han diseñado para entornos difíciles de campo, del equipo se obtienen análisis cualitativos y cuantitativos de datos geoquímicos. El equipo viene calibrado con patrones internacionales de suelo para realizar análisis simultáneos de Ag, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mn, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ti, V, Zn y permite hacer correcciones de calibraciones empíricas. Esta técnica permite determinar la composición química de materiales, ofrece resultados instantáneos de espectrometría de aleaciones y metales, PMI, suelos, minera, etc.

Un espectrómetro de FRX consta de tres partes fundamentales: la fuente que genera los rayos-x, (o tubo o una fuente radiactiva); un detector que convierte los rayos x emitidos por una muestra en una señal electrónica susceptible de ser medida; y una unidad de procesamiento que registra la señal y calcula la concentración elemental en la muestra. El tiempo de exposición de la muestra a la radiación depende de la calidad requerida en el análisis siendo lo habitual entre 30 y 60 segundos (Gutiérrez-Ginés, M. & Ranz, I. 2010).

Dentro de este procedimiento se tomaron 200 g. de muestra de sedimento en una bolsa hermética, se colocó dentro del equipo (Thermo Scientific™ Niton™), cerrado el equipo debe permanecer un lapso de 60 segundos, tiempo en el cual el equipo bombardea la muestra con rayos X y da los resultados de los elementos analizados en ppm. Este método se realizó con el equipo de la Compañía de Real del Monte y Pachuca S.A de C.V.



Figura 38. Procesamiento de muestras en FRX.



Figura 39. Lectura de muestras en FRX.

9.8 Interpolación por técnica IDW

Los sistemas de información geográfica permitieron hacer un análisis detallado, a través del procesamiento de información obtenida de las técnicas analíticas empleadas. Por medio de la interpolación se predijeron los valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos (datos de las muestras).

Se obtuvieron mapas de isoconcentración realizando una interpolación por el método IDW, para conocer la concentración de cada EPT (Fe, Zn, Pb, Cu, Ag, Cd) en la presa Los Ángeles, ya que el valor de cada punto de entrada genera áreas clasificadas por los valores predichos.

El procedimiento consistió en utilizar una capa de puntos como base. La capa de entrada debe tener un campo numérico que sirva como base de la interpolación. La herramienta permite interpolar puntos, está designada para funcionar con datos que cambian lenta y gradualmente sobre la zona de estudio, en este caso, la concentración en ppm de los EPT obtenida tras el análisis de ICP.

El método que se utilizó fue la herramienta IDW (Ponderación de Distancia Inversa) donde se estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio.

Por medio de la gestión de datos obtenidos fue posible visualizar la concentración de los contaminantes en la presa y tener una mejor interpretación de resultados.

10. RESULTADOS

10.1 Difracción de Rayos X.

La presencia de fases minerales, de las muestras puras de jal EJONW01 y EJONW02; fueron sometidas a un análisis de Difracción de Rayos X (DRX). Las fases predominantes fueron Cuarzo (SiO_2), Pirita (FeS_2), Calcopirita (CuFeS_2), Galena (PbS) y en orden secundario los minerales de la roca encajonante son Sanidina (KAlSi_3O_8), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Esfalerita (ZnS) evidenciando la presencia de algunos elementos como Fe, Cu, Zn y Pb (Figura 40 y 41). Según Ángeles-Chávez et al. (2011), indica que el zinc (Zn), plomo (Pb) y hierro (Fe) se asocian a la esfalerita, galena y pirita, respectivamente. La presencia mayoritaria de cuarzo (SiO_2) coincide con las investigaciones de Quevedo-Castañón et al. (2019) y Medel Reyes (2009) donde se identifica que los residuos

mineros están constituidos principalmente por cuarzo en jales no oxidados, lo que indica que es poco probable la generación de acidez.

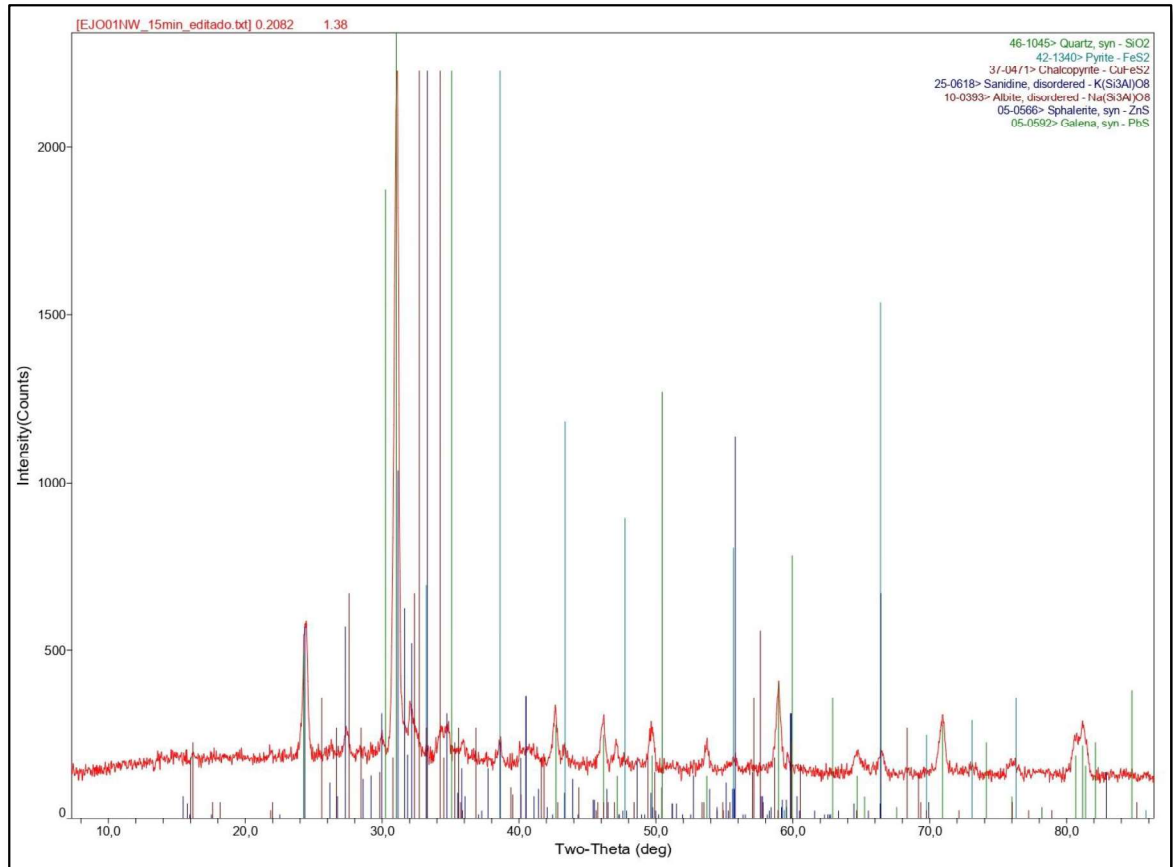


Figura 40. Espectro de difracción de rayos x de EJO01NW01 correspondiente a jales Velasco.

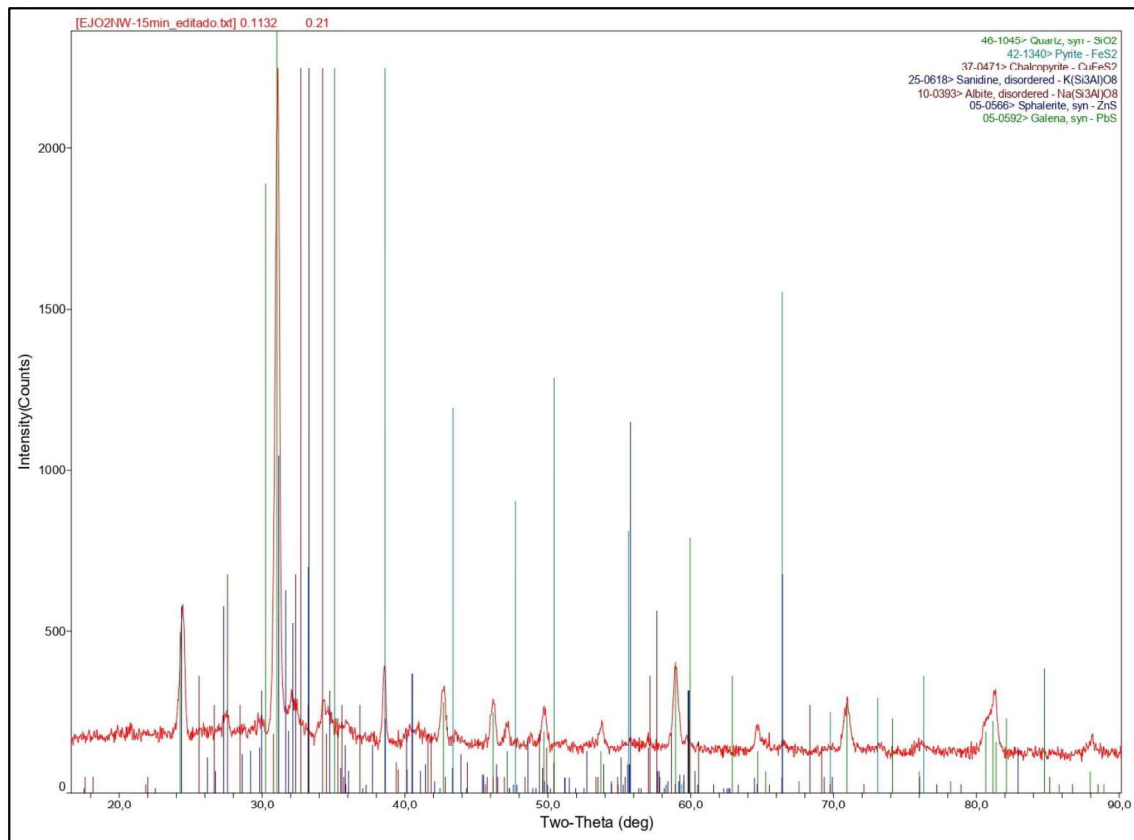


Figura 41. Espectro de difracción de rayos x de EJO2NW02 correspondiente a jales Velasco.

10.2 Geoquímica del Sedimento

El comportamiento del pH en las muestras de sedimento tiene un promedio de 7.06, un máximo de 8.64 y un mínimo de 5.39 (Tabla 4). De acuerdo a la clasificación de la NOM-021-RECNAT se ubicaron 7 muestras dentro del rango moderadamente ácidas (30.43%), 9 neutras (39.13%), 5 moderadamente alcalinas (21.73%) y 2 fuertemente alcalinas (8.69%). La muestra que presenta el valor máximo se localiza en jales de Velasco correspondiente al punto OJ1; en el sedimento del cuerpo de agua el punto que presenta el valor más alto corresponde a la muestra de sedimento OAL-14/02 ubicado al NW de la presa. El valor mínimo pertenece al punto OAL-15/02 localizado al sur de la presa (figura 42).

Tabla 4. Resultados de medición de pH sedimento de la presa Los Ángeles

MUESTRA	pH
OAL01	7.2

OAL01/02	7.01
OAL02	7.62
OAL03	6.43
OAL04	7.18
OAL05	7.06
OAL-03/02	7.1
OAL-04/02	7.2
OAL-05/02	6.69
OAL-06/02	6.64
OAL-07/02	6.84
OAL-08/02	7.46
OAL-09/02	6.41
OAL-10/02	6.32
OAL-11/2	6.38
OAL-12/02	6.28
OAL-13/2	7.58
OAL-14/02	7.81
OAL-15/02	5.39
OJ1	8.64
OJ2	6.41
EJO-NW01	8.54
EJO-NW02	8.4

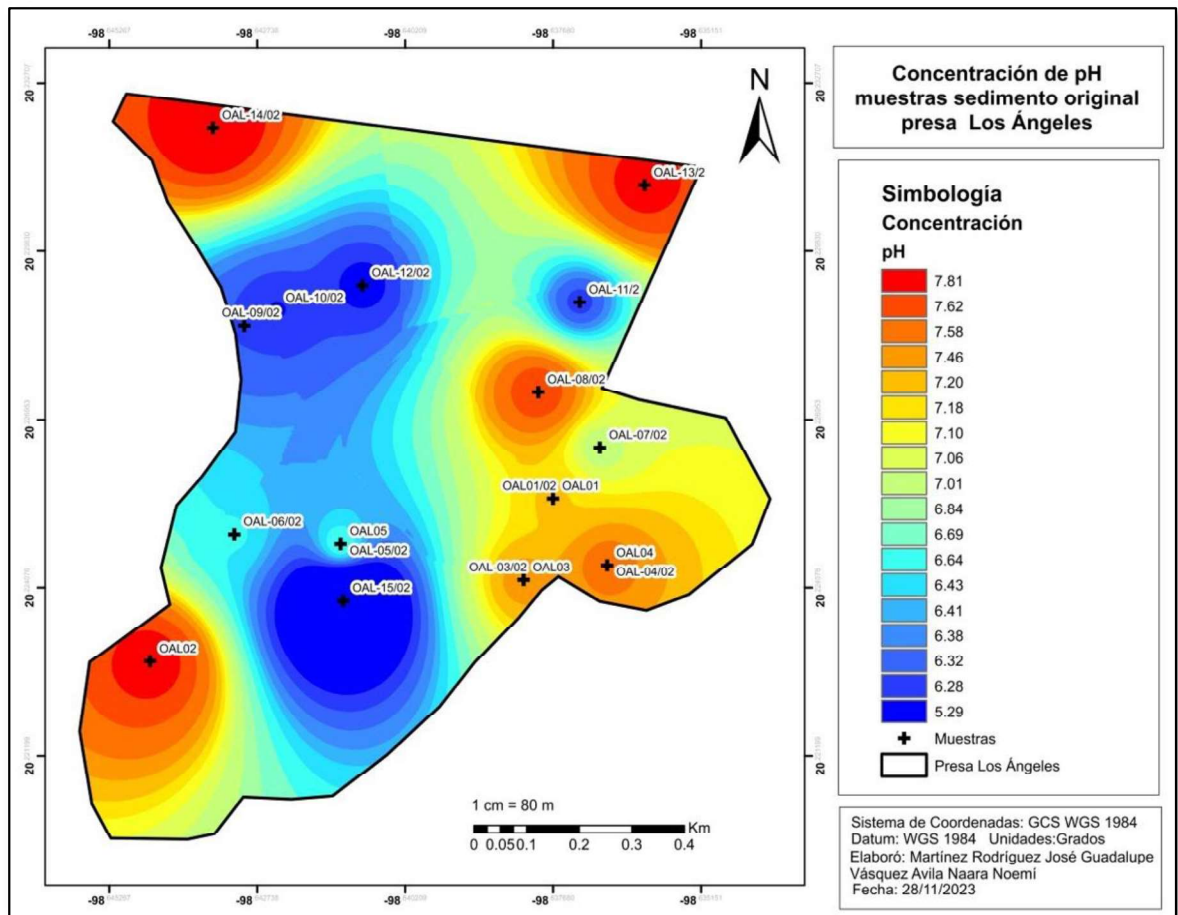


Figura 42. Concentración de pH, muestras de sedimento de la presa Los Ángeles.

El Fe fue el elemento de mayor concentración teniendo valores que oscilaron entre 3.587 y 25.390 (mg/L) con un promedio de 8.082 (mg/L). El valor máximo para Zn es de 15.100 y el mínimo de 0.278, teniendo un promedio de 3.549 (mg/L). Pb y Cu tienen valores menores, teniendo máximos de 11.680 y 1.326 respectivamente, Pb tiene 0.235 como valor mínimo y Cu 0.024, mientras que promedian 2.226 y 0.394 (mg/L). Aunque no todos los valores de Ag fueron detectados y aquellos detectados son números muy bajos, tiene un máximo de 0.086, un mínimo de 0.001 y un promedio de 0.029, mientras que los valores para Cd son nulos (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados ICP muestra total sedimento de presa Los Ángeles (ppm)

MUESTRA	Fe	Zn	Pb	Cu	Ag	Cd
OAL01	11.15	0.91	0.78	0.24	ND	ND
OAL01/02	11.87	2.40	1.69	0.28	ND	ND
OAL02	3.64	4.97	2.24	0.34	0.02	ND
OAL03	4.10	4.47	2.08	0.35	0.03	ND
OAL04	5.20	5.81	2.66	0.42	ND	ND
OAL05	5.59	5.12	2.33	0.38	0.02	ND
OAL-03/02	7.59	2.78	1.60	0.32	0.01	ND
OAL-04/02	12.46	0.28	0.24	0.22	0.04	ND
OAL-05/02	10.52	0.60	0.61	0.25	ND	ND
OAL-06/02	9.64	1.54	0.85	0.28	0.03	ND
OAL-07/02	8.34	2.74	1.58	0.32	0.00	ND
OAL-08/02	3.59	4.04	2.33	0.44	0.01	ND
OAL-09/02	6.69	4.08	2.48	0.35	0.01	ND
OAL-10/02	6.22	2.83	1.63	0.34	ND	ND
OAL-11/2	11.24	0.60	0.62	0.27	ND	ND
OAL-12/02	10.23	0.47	0.37	0.25	ND	ND
OAL-13/2	4.36	4.00	2.22	0.45	0.09	ND
OAL-14/02	25.39	4.36	2.48	0.43	0.04	ND
OAL-15/02	4.08	3.54	2.22	0.37	0.01	ND
OJ1	4.80	15.10	11.68	1.33	0.05	ND
OJ2	10.45	1.21	0.96	0.29	ND	ND
EJO-NW01	4.91	6.02	3.84	0.57	0.06	ND
EJO-NW02	3.85	3.76	3.71	0.56	0.07	ND

Se realizaron mapas con las concentraciones (ppm) correspondientes a los resultados de ICP de muestras de sedimento original, correspondientes a los EPT (Fe, Zn, Pb, Cu, Ag).

En las concentraciones de Fe, véase la figura 43, se presenta una acumulación de este elemento en el lado NW de la presa, en el punto OAL-14/02, debido a que el agua no fluye de manera directa, es decir, no hay una compuerta de salida como en el lado NE.

Respecto a Zn, véase la figura 44, el mapa de concentraciones muestra 4 puntos con valores altos los cuales son localizan al sureste y suroeste de la presa, OAL02 con 4.972 mg/L, OAL03 con 4.471 mg/L, OAL04 con 5.814 mg/L y OAL05 con 5.119 mg/L, sin embargo, las muestras que corresponden a una profundidad de 30-60 cm de los mismos puntos tienen concentraciones bajas

cómo son OAL-03/02 con 2.782 mg/L, OAL-04/02 con 0.278 mg/L y OAL-05/02 con 0.600 mg/L lo que significa que la presencia del elemento es mayor sólo a nivel superficial.

El mapa de concentraciones de Pb, véase figura 45, indica las zonas que presentan valores altos al sureste OAL04 con 2.655 mg/L y OAL-08/02 con 2.332 mg/L, al noreste OAL-13/2 con 2.224 mg/L y al noroeste OAL-14/02 con 2.478 mg/L, además del OAL-09/02 con 2.479 mg/L que corresponde al centro-oeste de la presa.

Las concentraciones de Cu son bajas con respecto a los demás elementos, véase figura 46, el mapa de concentraciones muestra los puntos más altos los cuales se ubican al sureste de la presa en OAL04 con 0.422 mg/L, en el centro-este OAL-08/02 con 0.443 mg/L, al noreste OAL-13/2 con 0.451 mg/L y al suroeste OAL-14/02 con 0.433 mg/L.

Los elementos Ag y Cd presentaron valores con tendencia muy baja a nula, tras ser analizados por la técnica de ICP; dentro del mapa de concentración de Ag figura 47 el único punto que presenta mayor concentración se encuentra al noreste de la presa, corresponde al punto OAL-13/2 con 0.086mg/L.

Las concentraciones de Zn son visiblemente las más altas en la digestión de sedimento, teniendo valores de 4.541 y 0.036 como máximo y mínimo respectivamente, mientras que sus valores promedian 2.198 (mg/L). Pb tiene valores más bajos, pero detectados, un máximo de 3.082, 0.051 como mínimo y un promedio de 0.872 (mg/L), para ambos elementos (Zn y Pb), los valores más altos se encuentran en toda la parte sur de la presa. Los valores para Cd siguen siendo no detectados.

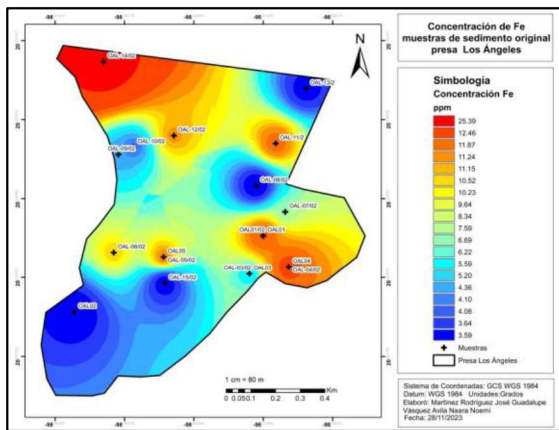


Figura 43. Concentración de Fe en muestras de sedimento original en la presa Los Angeles.

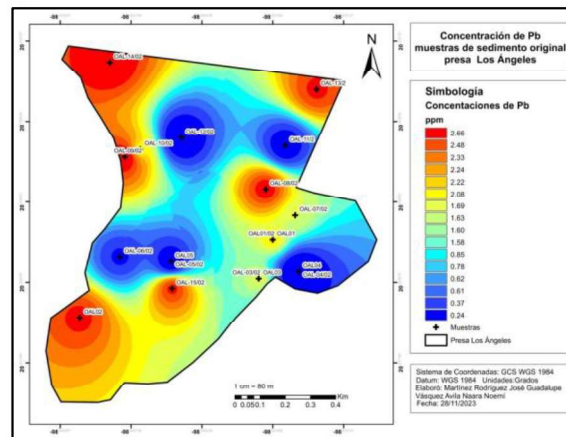


Figura 45. Concentración de Pb en muestras de sedimento original en la presa Los Angeles.

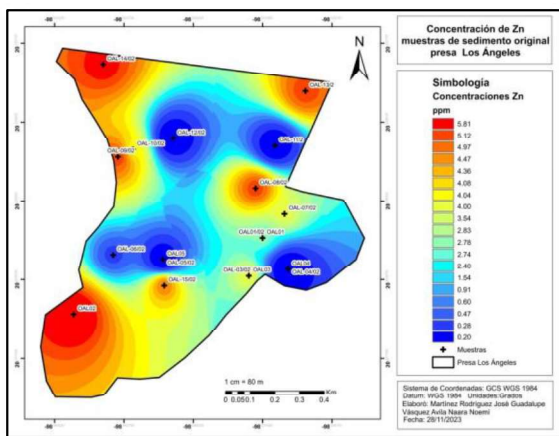


Figura 44. Concentración de Zn en muestras de sedimento original en la presa Los Angeles.

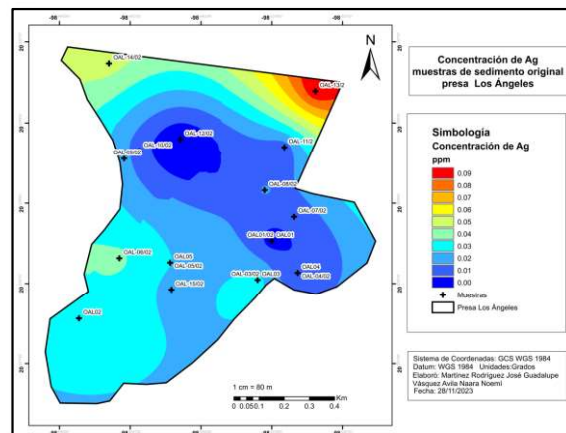


Figura 467. Concentración de Ag en muestras de sedimento original en la presa Los Angeles.

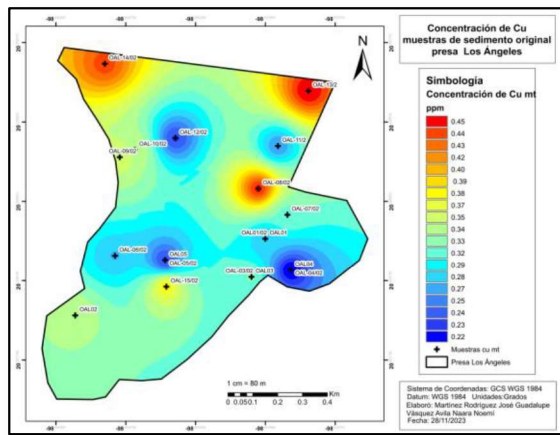


Figura 476. Concentración de Cu en muestras de sedimento original en la presa Los Angeles.

Los resultados obtenidos por el procedimiento de la NOM-053-SEMARNAT-1993 que se muestran en la Tabla 6, indican que la concentración soluble no excede el Límite Máximo Permissible (LMP).

Tabla 6. Resultados ICP digestión ácida muestras de sedimento presa Los Angeles.

MUESTRA	Zn	Pb	Cd
OAL01	4.00	1.38	ND
OAL01/02	1.77	0.68	ND
OAL02	4.54	1.44	ND
OAL03	3.66	1.14	ND
OAL04	3.87	1.22	ND
OAL05	3.68	1.15	ND
OAL-03/02	2.05	0.62	ND
OAL-04/02	0.04	0.05	ND
OAL-05/02	1.07	0.28	ND
OAL-06/02	0.34	0.10	ND
OAL-07/02	1.75	0.61	ND
OAL-08/02	2.33	1.32	ND
OAL-09/02	2.94	0.99	ND
OAL-10/02	1.96	0.61	ND
OAL-11/2	0.36	0.36	ND
OAL-12/02	0.28	0.12	ND
OAL-13/2	2.53	1.21	ND
OAL-14/02	2.49	0.95	ND

OAL-15/02	3.11	1.09	ND
OJ1	2.83	3.08	ND
OJ2	0.83	0.32	ND
EJO-NW01	0.60	0.23	ND
EJO-NW02	3.54	1.12	ND

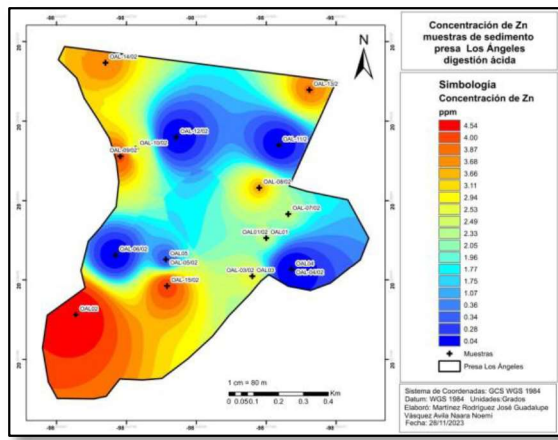


Figura 48. Concentración de Zn en muestras de sedimento de digestión ácida, de la presa Los Angeles.

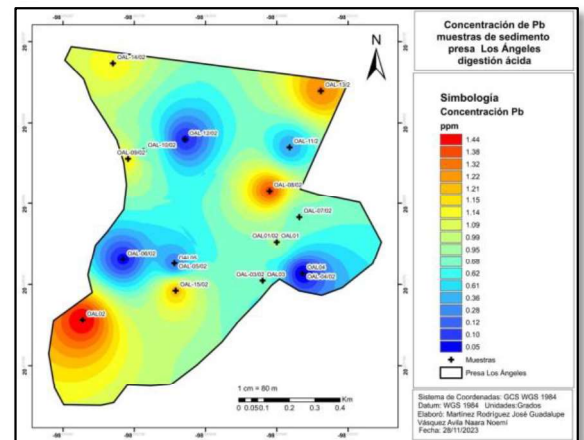


Figura 49. Concentración de Pb en muestras de sedimento de digestión ácida, de la presa Los Angeles.

Los resultados obtenidos en las muestras lavadas de sedimento se muestran en la Tabla 7, donde en esta ocasión el Zn tiene los valores más altos, un máximo de 26.510, 0.447 como mínimo y un promedio de 9.313 (mg/L). Pb tiene valores de 17.280 y 0.106 como valor máximo y mínimo respectivamente, presentando un promedio de 2.587. El Fe presenta valor máximo y mínimo de 5.549 y 0.107 (mg/L), promediando entre sus valores 0.699 (mg/L). Cu y Ag son visiblemente menos abundantes y con valores menores un valor máximo de 2.257 y 0.123 (mg/L) cada elemento, 0.167 y 0.030 como mínimo y un promedio de 0.536 y 0.054. En el caso de Cd () únicamente no se detectaron valores en 7 muestras, y aunque los valores de las muestras detectadas son muy bajas tienen un máximo de 0.776, un mínimo de 0.026 y un promedio de 0.298 (mg/L).

Tabla 7. Resultados ICP muestras lavadas de sedimento presa Los Angeles

MUESTRA	Fe	Zn	Pb	Cu	Ag	Cd
OAL01	0.189	3.546	1.070	0.331	0.044	0.095
OAL01/02	5.549	8.481	0.283	0.193	0.043	ND
OAL02	0.107	7.060	3.464	0.464	0.123	0.553

OAL03	0.327	7.430	4.890	0.895	0.051	0.442
OAL04	0.273	8.116	4.613	0.671	0.059	0.488
OAL05	0.434	6.420	3.538	0.362	0.083	0.371
OAL-03/02	0.137	22.670	1.076	0.282	0.036	0.026
OAL-04/02	1.720	0.447	0.106	0.168	0.032	ND
OAL-05/02	0.144	4.411	0.216	0.177	0.031	ND
OAL-06/02	0.300	12.280	0.339	0.221	0.035	ND
OAL-07/02	0.371	24.190	0.383	0.297	0.037	0.030
OAL-08/02	0.267	8.286	1.924	0.761	0.060	0.371
OAL-09/02	0.274	3.390	1.332	0.377	0.062	0.189
OAL-10/02	0.230	24.950	0.631	0.344	0.034	0.076
OAL-11/2	1.594	6.597	0.230	0.234	0.030	ND
OAL-12/02	0.243	3.934	0.183	0.167	0.032	ND
OAL-13/2	0.162	7.163	1.530	0.923	0.052	0.343
OAL-14/02	0.231	5.310	8.351	0.541	0.092	0.260
OAL-15/02	0.220	4.443	2.345	0.841	0.033	0.207
OJ1	0.134	26.510	2.853	2.257	0.052	0.776
OJ2	1.746	9.760	0.255	0.229	0.036	ND
EJO-NW01	1.116	4.473	2.604	0.780	0.093	0.254
EJO-NW02	0.311	4.342	17.280	0.803	0.099	0.287

Se realizó la prueba de extracción PECT (Procedimiento de Extracción de Constituyentes Tóxicos) al sedimento de la presa Los Ángeles y a los jales de Velasco, el residuo del lavado se sometió a un proceso de digestión ácida para posteriormente ser analizado por ICP, los resultados de EPT (Fe, Zn, Pb, Cu, Ag, Cd) están concentrados de la siguiente manera:

En el caso de Fe, véase figura 50, los puntos con el valor más alto se localizan al sureste de la presa en OAL01/02 con 5.549 mg/L y OAL-04/02 con 1.720 mg/L y la muestra OAL-11/2 con 1.594 mg/L al noreste de la presa.

La concentración del Zn, véase la figura 51, presenta valores altos en OAL-10/02 con 24.950 mg/L y OAL-07/02 con 24.190 mg/L ambos puntos se localizan en la parte céntrica de la presa.

El Pb presenta valores menores a los elementos anteriores, véase la figura 52, la muestra OAL-14/02 presenta el valor más alto con 8.351 mg/L, se ubica al noroeste de la presa.

La concentración de Cu presenta valores bajos, sin embargo, el mapa muestra los puntos altos, véase la figura 53, la muestra localizada al noreste OAL-13/2 con 0.923 mg/L, al sureste de la

presa se encuentra OAL-15/02 con 0.841 mg/L, OAL03 0.895 mg/L y la OAL-08/02 con 0.761 mg/L.

La concentración de Ag es mínima, véase la figura 54, el valor más alto con 0.123 mg/L corresponde a OAL01, localizado al sureste de la presa; mientras que, para Cd, los valores siguen siendo mínimos, pero significativos en la parte sur de la presa (figura 55).

En la tabla 8 se reportan los valores en concentración mínima, máxima, promedio y desviación estándar de la concentración (mg/L) de la Muestra Total (MT) en las 23 muestras de sedimento.

Tabla 8. Valores de muestra total de sedimento

ELEMENTO	Fe	Zn	Pb	Cu	Ag	Cd
PROMEDIO	8.08	3.55	2.23	0.39	0.03	ND
MÁXIMO	25.39	15.10	11.68	1.33	0.09	ND
MÍNIMO	3.59	0.28	0.24	0.22	ND	ND
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	4.84	3.08	2.28	0.22	0.03	ND

En la tabla 9 se reportan los valores en concentración mínima, máxima, promedio y desviación estándar de la concentración (mg/L) de la Muestra Digestión Ácida Sólido (DA) en las 23 muestras de sedimento.

Tabla 9. Valores de digestión ácida de sedimento

ELEMENTO	Cd	Pb	Zn
PROMEDIO	ND	0.87	2.20
MÁXIMO	ND	3.08	4.54
MÍNIMO	ND	0.05	0.04
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	ND	0.66	1.37

En la tabla 10 se reportan los valores en concentración mínima, máxima, promedio y desviación estándar de la concentración (mg/L) de la Muestras Lavadas (ML) en las 23 muestras de sedimento.

Tabla 10. Valores de muestras lavadas de sedimento

ELEMENTO	Fe	Zn	Pb	Cu	Ag	Cd
PROMEDIO	0.70	9.31	2.59	0.54	0.05	0.30
MÁXIMO	5.55	26.51	17.28	2.26	0.12	0.78
MÍNIMO	0.11	0.45	0.11	0.17	0.03	0.03

DESVIACIÓN ESTÁNDAR 1.18 7.59 3.79 0.46 0.03 0.20

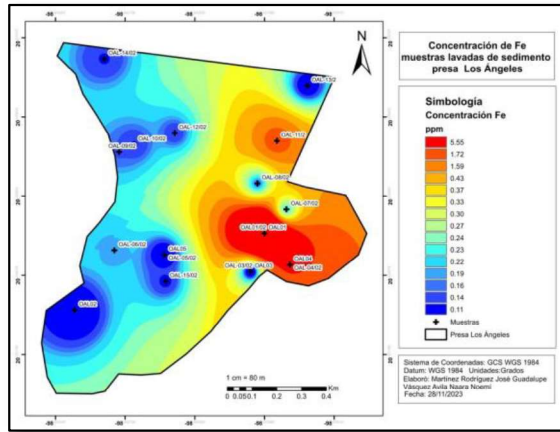


Figura 50. Concentración de Fe en muestras lavadas de la presa Los Angeles.

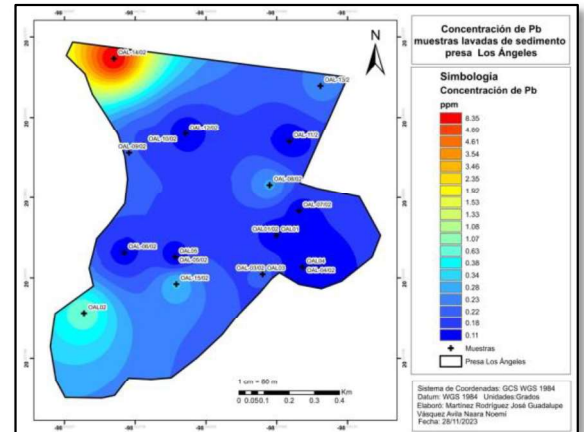


Figura 52. Concentración de Pb en muestras lavadas de la presa Los Angeles.

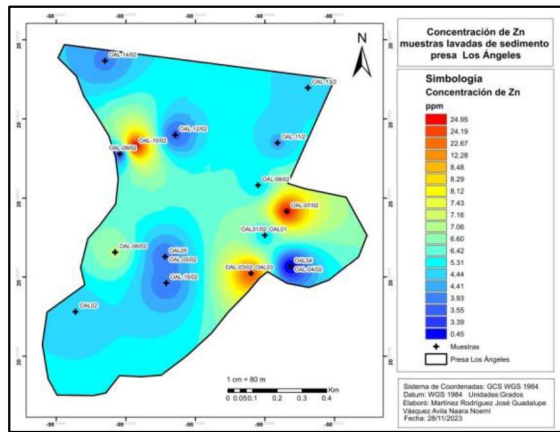


Figura 51. Concentración de Zn en muestras lavadas de la presa Los Angeles.

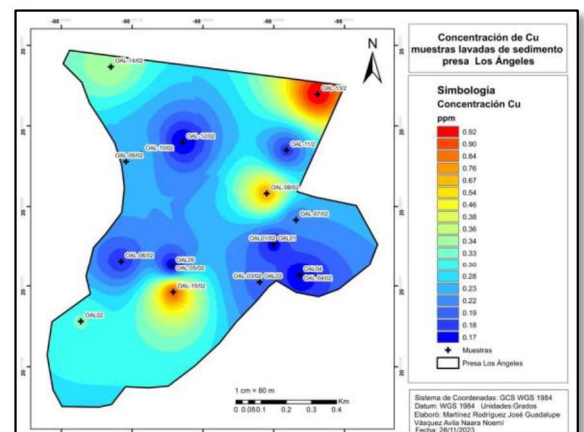


Figura 53. Concentración de Cu en muestras lavadas de la presa Los Angeles.

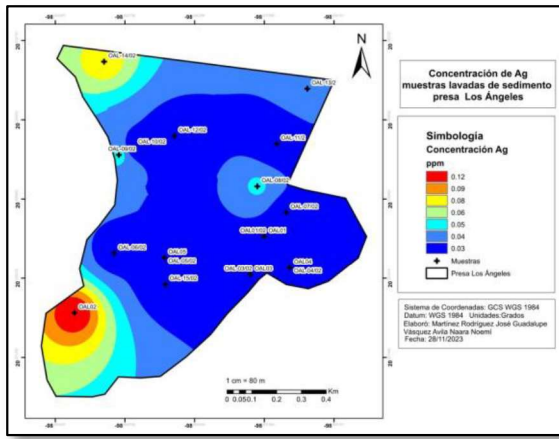


Figura 54. Concentración de Ag en muestras lavadas de la presa Los Angeles.

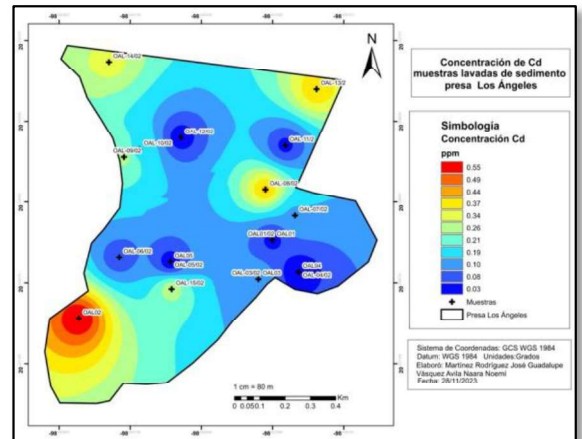


Figura 55. Concentración de Cd en muestras lavadas de la presa Los Angeles.

10.3 Hidrogeoquímica

El comportamiento del pH en las muestras de agua (Figura 56 y Tabla 11), de un total de 8, tuvo valores promedio de 8.85, un máximo de 9.69 y un mínimo de 8.07, véase la tabla 10. Respecto a la Ley Federal de Derechos: Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2019 (CONAGUA), el 75% de las muestras están dentro del rango de pH 6-9, mientras que el resto excede los LMP.

Tabla 11. Resultados de medición de pH agua de la presa Los Ángeles.

MUESTRA	pH
PLA-E1	8.07
PLA-C1	8.62
PLA-C2	8.96
PLA-I1	8.27
PLA-I2	8.81
PLA-D1	8.90
PLA-D2	9.69
PLA-PR4E	9.50

En la medición de pH del agua de la presa los Ángeles, se evidencia valores altos en los puntos PLA-PR4E con 9.5 de pH y PLA-D2 con 9.69, que corresponden respectivamente a la entrada y salida de la presa. Se puede inferir que, debido al alto flujo de agua en estas zonas, existe una mayor disolución de partículas que propician valores altos en ambos puntos.

En el caso del agua recolectada en la presa, los EPT de mayor interés no fueron detectados en las muestras originales ni en las muestras sometidas a digestión.

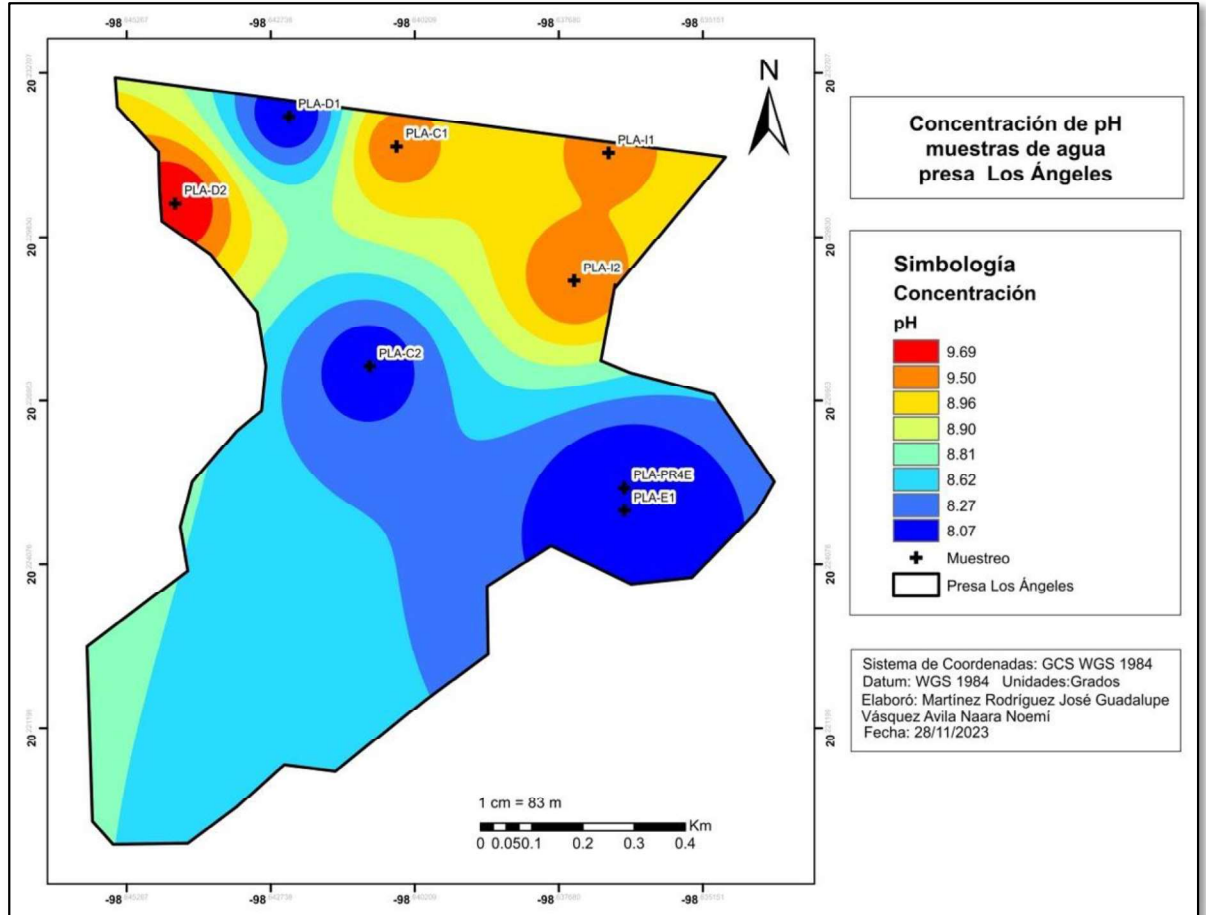


Figura 56. Concentración de pH, muestras de agua de la presa Los Ángeles.

Las concentraciones totales de Fe, Zn y Pb fueron variables, pero generalmente altas, mientras que las concentraciones de Cu, Ag y Cd son visiblemente menores (Véase tabla 12). El Fe fue el elemento con mayor concentración respecto a la lectura del Thermo Scientific™ Niton™. Los resultados de esta técnica coinciden con la mineralogía obtenida en la difracción de rayos x.

Tabla 12. Resultados de fluorescencia de rayos x (FRX) de sedimento.

MUESTRA	Fe	Zn	Pb	Cu	Ag	Cd
OAL02	339	22.98	55.44	127	27	21
OAL03	0.376	19.72	43.25	171	28	19
OAL04	0.364	20.7	48.73	139	24	19
OAL05	387	18.25	42.58	108	22	18
OAL-03/02	489	11.88	24.74	81	15	10
OAL-04/02	828	0.56	1.8	0	0	0
OAL-05/02	688	2.98	6.56	43	8	0
OAL-06/02	605	6.25	13.26	54	0	0
OAL-07/02	537	11.56	24.45	87	15	13
OAL-08/02	235	17.88	33.36	155	40	7
OAL-09/02	477	19.5	35.48	109	21	15
OAL-10/02	394	11.8	23.59	114	16	12
OAL-11/2	758	3.74	6.34	51	8	0
OAL-12/02	674	1.76	4.25	41	0	8
OAL-13/2	279	18.62	33.06	136	34	16
OAL-14/02	205	21.14	36.8	118	56	15
OAL-15/02	346	21.38	37.72	177	27	13
OJ1	177	65.39	97.11	385	44	29
OJ2	666	5.55	9.9	49	14	0
EJO-NW01	176	22.55	53.51	130	109	22
EJO-NW02	201	21.51	45.34	141	74	18
OAL-02/02-01	621	11.1	20.86	65	0	11
OAL-02/02-02	731	4.27	8.59	0	0	9

En la tabla 9 se reportan los valores en concentración mínima, máxima, promedio y desviación estándar de la concentración (mg/L) de EPT por FRX en las 23 muestras de sedimento.

Tabla 13. Valores de fluorescencia de rayos x (FRX) de sedimento.

ELEMENTO	Fe	Zn	Pb	Cu	Ag	Cd
PROMEDIO	426.68	30.72	15.69	112.77	32.33	15.28
MÁXIMO	828	97.11	65.39	385	109	29
MÍNIMO	0.364	1.80	0.56	41	8	7
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	243.31	22.01	13.24	74.40	25.60	5.62

11. DISCUSIONES

11.1 Difracción de Rayos (X)

La neutralidad observada puede ser atribuida a la presencia de feldespatos, como lo menciona Medel-Reyes (2009) donde asevera que los silicatos (ya sea de aluminio, calcio, sodio, potasio o mezcla de estos) permiten la formación de carbonatos, que ayudan a neutralizar la acidez de los jales.

11.2 Geoquímica del sedimento

Los jales pertenecientes a la presa de jales de Velasco presentaron valores de pH neutros a ligeramente alcalino, que coincide con un estudio realizado dentro del distrito minero Real del Monte – Pachuca por Hernández-Acosta (2009) en los residuos mineros de mina Dos Carlos donde determinó que estos jales localizados en Pachuca presentan un pH de neutro a medianamente alcalino.

Los resultados de muestra total del sedimento de la presa arrojan que Fe y Zn son elementos con mayor concentración dentro del sedimento, y que según Segura y colaboradores (2016), la presencia de elementos como Al, Zn, Fe y Cr liberados en el medio ambiente pueden inducir genotoxicidad, tal es el caso de la zona de estudio, en la cual el agua de la presa es ocupada en riegos de cultivo y ganadería.

La concentración de los elementos analizados presenta mayor concurrencia en los sitios de entrada y salida de la presa, ya que son zonas que tienen constate flujo de agua, lo que repercute en el transporte y disolución de partículas lábiles. Algunos de estos elementos coinciden con los trabajos de Lizárraga-Mendiola et al. 2018, dónde mencionan que la liberación de Zn y Pb se debe a la presencia de minerales como esfalerita y galena en los relaves, y estos elemenyos se vuelven más reactivos en presencia de pirita; aseveran que la remoción natural de Zn, Pb, Cu y otros metales se puede alcanzar dependiendo del pH en solución, la presencia de otros minerales que favorezcan la neutralización de los minerales oxidados y la mineralogía de los relaves.

Los resultados obtenidos por de la NOM-053-SEMARNAT-1993 indican que la concentración soluble no excede el Límite Máximo Permisible (LMP) y de acuerdo con la NOM-052-

SEMARNAT-2005, ninguna de las muestras de sedimento se considera residuo peligroso con base a este criterio, sin embargo, no deja de ser un riesgo ambiental a largo plazo.

Los resultados obtenidos en las muestras lavadas de sedimento tuvieron un comportamiento diferente a las muestras totales debido al proceso de extracto PECT, las muestras fueron sometidas de tal manera que, al agitarse se liberaran los EPT oxidados y se solubilizaran. En este caso hubo detección de Cd en más del 60% de las muestras. En este caso, existe una concordancia con el trabajo de Quevedo-Castañón y colaboradores (2019) donde explican que la mineralogía de los jales oxidados cambia debido a los procesos de oxidación y neutralización. Respecto a la liberación de EPT, realizaron observaciones muy puntuales en jales oxidados y no oxidados, describen que cuando los depósitos oxidados no contienen carbonatos o silicatos, existe una incapacidad de neutralización de los jales, el cual no es el caso en nuestra zona de estudio; ya que, por el origen del yacimiento los jales de Velasco presentan cuarzo (SiO_2) en su composición geoquímica y por obviedad, también los sedimentos de la presa Los Ángeles.

11.3 Hidrogeoquímica

De acuerdo a Ley Federal de Derechos: Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2019 (CONAGUA), 2 de las muestras se encuentran fuera del rango de pH para agua de uso agrícola que es de 6 – 9, es decir que las muestras se encuentran en un rango de neutras a medianamente alcalinas. En el análisis hidrogeoquímico no fueron detectados EPT, al igual que en el sedimento, se asume una neutralidad debido a los minerales como cuarzo y feldespatos que se encuentran solubles en al agua. Otro factor que puede influir en los resultados es la presencia de materia orgánica en la periferia de la presa, como consecuencia puede haber un proceso de peletización, es decir, que los metales se encuentran encapsulados dentro de heces fecales.

11.4 Interacción Sedimento-Agua

Los sedimentos actúan directamente con el agua, debido a su localización dentro de la presa, su contenido mineralógico está expuesto a procesos de óxido-reducción, los cuales coadyuvan a que el contenido sea mayormente soluble en agua; los procesos de óxido-reducción se debe a los periodos de estiaje y sequía que sufre la presa, se puede inferir que, a consecuencia del cambio climático, aunque no se descarta que sea consecuencia de la demanda de agua para riego agrícola.

12. CONCLUSIONES

Las muestras de sedimento evaluadas, provenientes de los jales de Velasco pertenecen a un yacimiento epitermal de baja sulfuración, en donde las fases predominantes fueron SiO_2 , FeS_2 , CuFeS_2 , PbS y secundariamente KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ y ZnS , evidenciando la presencia de EPT.

La identificación de las fases minerales primarias y secundarias identificadas en los jales estudiados aporta información acerca de los procesos de movilidad, transporte y liberación de EPT al ambiente.

El sedimento evaluado de la presa Los Ángeles, a pesar de ser reciente, está expuesto a factores generadores de acidez como: oxígeno, humedad, composición física, química y mineralógica, los resultados corroboran que estos factores no influyen para convertirse en un contaminante a corto plazo debido a la presencia de cuarzo y feldespatos asociados a los metales, lo cual genera estabilidad en el pH de estas, sin embargo, no deja de considerarse un riesgo ambiental.

La liberación de EPT no afecta directamente a la concentración de agua de la presa Los Ángeles, por lo que actualmente no es un problema sino un medio afectado, sin embargo, se considera un riesgo ambiental a largo plazo; bajo condiciones fisicoquímicas extremas que propicien procesos de óxido-reducción, así como una acumulación excesiva de sedimentos, es decir, el problema se encuentra en los sedimentos y no en el agua.

La presa tiene una antigüedad de 60 años, ha presentado períodos de estiaje y sequía consecuencia del cambio climático y demanda de agua para uso agrícola y ganadero, que han coadyuvado a que el contenido mineralógico del sedimento tenga reacciones de óxido-reducción, al estar en contacto con el agua las partículas se solubilizan lo que puede inferir presencia de acidez en sedimento y agua; sin embargo, la tendencia alcalina de las muestras se debe a la interacción que existe entre ambos, solubilizando silicatos que se asocian a elementos como Al, Na, K o Ca, o una mezcla entre ellos.

Existe una similitud entre los valores de DRX e ICP ya que mostraron coincidencia entre los EPT evaluados; para corroborar dicha información las muestras de sedimento se sometieron a un análisis de FRX obteniendo valores concordantes, es decir, existe una tendencia en los resultados de las 3 técnicas: Fe, Zn y Pb son elementos que tienen valores altos a comparación de Cu, Ag y Cd que presentan valores bajos o nulos.

13. REFERENCIAS

Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2016. (2017) SECTUR. Portal del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica de Turismo - SNIEGT: http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/HGO_ANUARIO_PDF16.pdf

Ángeles-Chávez, D. Lizárraga-Mendiola, L., Blanco-Piñón, A. (2011). Caracterización química y mineralógica de un depósito de jales en el distrito minero Pachuca-Real del Monte, estado de Hidalgo. IV Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales. ISBN: 978-607-482-173-4. 22-30

Ángeles, O. (1989). Omitlán de Juárez. Universidad Autónoma del Estado del Hidalgo. 43 pp

Armienta M., Villaseñor G., y Romero F. (2005). Propuesta de estrategia metodológica para la evaluación de la peligrosidad de jales mineros en México. AIMMGM XXVI Convención Internacional de Minería. 12-15

Arellano-Gil, J., Velasco-de León, P., Silva-Pineda, A., Salvador-Flores, R., Beltrán-Romero, F. (2005). Origen y características geológicas del paleo-Lago Amajac, Hidalgo: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22(2), 199-211.

Azpeitia, A. (2007). Minerales de los distritos mineros metálicos Zimapán, Pachuca-Real del Monte, Molango y su aplicación didáctica. Tesis de Licenciatura. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. UAEH. Pachuca, Hidalgo. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/325>

BIONATUR. (2015) Metales Pesados. (s/f). Soluciones para el tratamiento de gases contaminantes. [En línea]. <http://bionaturbiotech.com/depuracion-gases/metales-pesados> 12/02/2023

Brousett-Minaya, M., Rondan-Sanabria, G., Chirinos-Marroquín, M., & Biamont-Rojas, I. (2021). Impacto de la Minería en Aguas Superficiales de la Región Puno - Perú. Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia,

21(21), 187-208. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2021000100011&lng=es&tlng=es.

Bolaños, V., Ortega, F., & Reyes, D. (2015). Medio ambiente, ciencia y sociedad. *Andamios*, 12(29), 7-14. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-00632015000300007&lng=es&tlng=es.

Cahuana, L., & Aduvive, O. (2018). Bioaccumulation of heavy metals in aquatic and terrestrial vegetation tissues evaluated in areas where there are mining environmental liabilities in Peru. 2^o International Congress on Planning for Closure of Mining Operations , 1-15.

Camargo T. (1997). *Inventario de Aguas Superficiales del Estado de Hidalgo*. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México. 43 pp.

Camprubí, A. (2018). Una excepcional acumulación de plata. Los yacimientos epitermales de Pachuca-Real del Monte, Hidalgo. *Guía de campo del Geoparque de la Comarca Minera*. (pp.65-80)

https://www.researchgate.net/publication/328967974_Una_excepcional_acumulacion_de_plata_Los_yacimientos_epitermales_de_Pachuca-Real_del_Monte_Hidalgo

Camarillo-Ravelo, D., Barajas-Aceves, M., & Rodríguez-Vázquez, R. (2015). Evaluación de la fitotoxicidad de jales mineros en cuatro especies empleadas como bioindicadoras de metales pesados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 31(2), 133-143. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000200003&lng=es&tlng=es.

Camprubí, A., Partida, E. G., Levresse, G., Tritlla, J., & Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 10–18. <https://doi.org/10.18268/bsgm2003v56n1a2>

Candeias, C., Ávila, P. F., da Silva, E. F., Ferreira, A., Durães, N., & Teixeira, J. P. (2015). Water–rock interaction and geochemical processes in surface waters influenced by tailings

impoundments: Impact and threats to the ecosystems and human health in rural communities (panasqueira mine, central Portugal). *Water, Air, and Soil Pollution*, 226(2). <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2255-8>

Chappuis, M. (2019). Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú. *Serie Medio Ambiente y Desarrollo*, N° 168 (LC/TS.2019/126), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 50 pp.

CIENCIA (2007). Los efectos de la contaminación ambiental sobre nuestra salud. [En línea]. <https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/index.php/ediciones-antiores/ediciones-antiores/35-vol-58-num-1-enero-marzo-2007/ambiente-y-salud/73-la-contaminacion-ambiental-y-nuestra-salud> 14/02/2023

CICESE (2023). Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE. <http://clicom-mex.cicese.mx/>

CONAGUA (2013). Ley Federal de Derechos. Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2013, Comisión Nacional del Agua. Ley. Tlalpan, Ciudad de México, México, 94 pp.

CONAGUA (2017). Las propiedades del #Agua. Comisión Nacional del Agua. [En línea]. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/las-propiedades-del-agua?idiom=es#:~:text=El%20%23Agua%20en%20su%20forma,y%20siempre%20est%C3%A1%20en%20movimiento>. 14/02/2023

Corona-Chávez, P., Maldonado, R., Ramos-Arroyo, Y., Robles-Camacho, J., Lozano-Santa Cruz, R., & Martínez-Medina, M. (2017). Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahua-El Oro, México, y sus implicaciones de impacto ambiental. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 34(3), 250-273. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.540>

DOF. (2013). PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-257-SSA1-2013, Autorización de medicamentos, registro, renovación y modificaciones.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5298031&fecha=06/05/2013#gsc.tab=0

Escamilla-Casas, J. C., Mondragón-Mondragón, O., Ortiz-Hernández, L. E., & Uribe-Alcántara, E. M. (2020). Geología Superficial de la Zona Mineralizada Dos Carlos, Pachuca, Hidalgo. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 8(15), 92-98. <https://doi.org/10.29057/icbi.v8i15.5754>

Escobar, G. (2020) Manual de Geología para Ingenieros. Universidad Nacional de Colombia. 157-176 pp.

EPA. (2007) Method 3051A: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3051a.pdf>
05/07/2023

EPA. (2007) Method 3015A: Microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3015a.pdf>
05/07/2023

Espectrometría ICP. (2019). Argentina.gob.ar.
<https://www.argentina.gob.ar/cnea/cab/laboratorios-e-instalaciones/quimica/espectrometria-icp#:~:text=La%20Espectrometr%C3%ADa%20de%20Masa%20con,peri%C3%B3dica%20a%20nivel%20de%20traza>

FAO (2023). Portal de Suelos de la FAO, ¿Qué es el Suelo? Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [En línea]. <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>

Gamiño, S. (2012). Evaluación de la genotoxicidad en poblaciones infantiles expuestas a contaminación por As, Pb y Cd en zonas mineras. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina. Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales. San Luis Potosí, México. 304 pp.
<http://ninive.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3711>

Geyne, A.R., Fries, C., Jr., Segerstrom, K., Black, R.F., Wilson, I.F. (1963). Geología y Yacimientos Minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, estado de Hidalgo, México: Consejo de Recursos Naturales no Renovables, 222 pp.

Gobierno del Estado de Hidalgo. (2011). Secretaría de Planeación, Desarrollo Regional y Metropolitano: Enciclopedia de los municipios del estado de Hidalgo: Omitlán de Juárez. <http://docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Omitlan-De-Juarez-Enciclopedia-De-Los-Municipios.pdf>

González, O. (2010). Características principales de los depósitos epitermales en el noroeste de México, un análisis y comparación. Tesis de Licenciatura. Departamento de Geología. Universidad de Sonora, México. 77 pp.

González-Flores, E., Tornero-Campante, M.A., Ángeles-Cruz, Y., Bonilla-Y- Fernández, N. (2009). Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. Rev. Int. Contam. Ambient. 25 (1) 15-22. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000100002#:~:text=La%20especiaci%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20ha%20sido,de%20extracci%C3%B3n%20simple%20o%20secuencial

Gutiérrez-Ginés, M. & Ranz, I. (2010). Utilización de un equipo portátil de fluorescencia de Rayos X para el estudio de metales pesados en suelos: punto a punto y aplicación a vertederos. En: Estudio multidisciplinar de vertederos sellados. Caracterización y pautas de recuperación. (A. J. Hernández, C. Bartolomé). Universidad de Alcalá, España. Pp 109-120. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/73106/1/VRTEDEROS2010109190.pdf>

Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J. E., Robledo-Santoyo, E. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 15(2): 109-114. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182009000200004

- Hoover, J., Gonzales, M., Shuey, C., Barney, Y., & Lewis, J. (2017). Elevated arsenic and uranium concentrations in unregulated water sources on the Navajo Nation, USA. *Exposure and Health*, 9(2), 113–124. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0226-6>
- Huang, X., Luo, D., Zhao, D., Li, N., Xiao, T., Liu, J., Wei, L., Liu, Y., Liu, L., & Liu, G. (2019). Distribution, source and risk assessment of heavy metal(oid)s in water, sediments, and *Corbicula fluminea* of Xijiang River, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(10), 1823. <https://doi.org/10.3390/ijerph16101823>
- Ibañez, A. (2017) Agua. *Nihon Kasetu*. <https://nihonkasetu.com/es/la-turbidez-en-las-aguas-residuales/#:~:text=La%20turbidez%20impacta%20en%20los,y%20muchos%20otros%20compuestos%20t%C3%B3xicos>.
- INEGI. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010. Omitlán de Juárez, Hidalgo. Clave Geoestadística 13045. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825293017>
- INEGI. (2015). Guía para la interpretación de cartografía Edafología Escala 1:250 000 Serie III. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Electrónico. México, 69 pp https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825076221.pdf
- INEGI. (2016). Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2016. 683 pp. <https://cambioclimatico.semarnath.gob.mx/webFiles/pagesFiles/00AnuarioEGH.pdf>
- Ley de Minería. (1992). Ley de Minería. Diario Oficial de la Federación, México. 26 de junio de 1992. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LMin.pdf>
- LGEEPA. (1988) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Al Ambiente. Diario Oficial de la Federación, México. 28 de enero de 1988. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>

Lizárraga-Mendiola, L., González-Sandoval, M. R., Durán-Domínguez, M., & Márquez-Herrera, C. (2008). Geochemical behavior of heavy metals in a Zn–Pb–Cu mining area in the State of Mexico (central Mexico). *Environmental Monitoring and Assessment*, 155(1–4), 355–372. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0440-1>

Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., & Reyes-Ortigoza, A. L. (2012). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 39–48. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000100004

Medel-Reyes, A. (2009) Caracterización fisicoquímica de jales mineros y Evaluación de biosólidos como propuesta de Remediación. Tesis de Maestría. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C. Santiago de Querétaro, Qro., México, 95 pp.

Mendoza, A. (2023). Evaluación del Potencial de Riesgo Genotóxico de jales mineros en Pachuca de Soto, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México. 83 pp.

Moreno-Tovar, R., Téllez-Hernández, J., Monroy-Fernández, M. (2012). Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 203-218. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300003&lng=es&tlng=es

Navia-Paz, M. (2019). Suelos y Edafología. MANP Edafología y Conservación de Suelos. <https://cdsuelos.wixsite.com/cd-suelos/post/suelos-y-edafolog%C3%ADa>

Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. (n.d.). Gob.Mx. Retrieved February 14, 2023,

<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Normas/Oficiales/NOM-141-SEMARNAT-2003.pdf>

Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Gob.mx <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>

Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

(n.d). Gob.Mx. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>

La Salle (2021). *Geoparque Comarca Minera, la maravilla natural que debes visitar*. <https://www.lasallep.edu.mx/ulsap/comunidad/geoparque.html>

Peña, S., & Araya, P., (2021). Aguas de contacto, efectos en la minería y el medioambiente. *Revista de la Facultad de Derecho*, (50), e106. Epub 01 de enero de 2021. <https://doi.org/10.22187/rfd2020n50a6>

Pérez-Martínez, I., & Martín, F. (2015). Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1), 01-12. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222015000100001&lng=es&tlng=es.

Quevedo-Castañón, N. M., Talavera-Mendoza, O., Ramírez-Guzmán, A. H., Dótor-Almazán, A. Chávez-González, J. D., Sampedro-Rosas, M. L. Rosas-Acevedo, J. L. (2019). Fraccionamiento geoquímico de elementos potencialmente tóxicos en los jales mineros del Depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero, México. *Tlamati*, 10(2), 5-21.

Ramírez-Bautista, A., A. Sánchez-González, G. Sánchez-Rojas y C. Cuevas-Cardona (Eds.). (2017). *Biodiversidad del estado de Hidalgo*. Tomo I. Universidad Autónoma del

Estado de Hidalgo/Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Pachuca de Soto, Hidalgo, México, 304 pp.

Ramos-Arroyo, Y. R., & Siebe-Grabach, C. D. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 23(1), 54–74. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742006000100004

Rivera, H., Chira, J., Chacón, I., Campian, M., Cotrina, J., & Rosales, ;. (2010). Geodisponibilidad de metales pesados en sedimentos de los ríos Chancay y Huaura. Depto. De Lima-Peru. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v13_n26/pdf2/a03v13n26.pdf

Romero, F.M., Armienta, M.A., Gutiérrez, M. G., Villaseñor, G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de Jales Mineros. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 24 (2) 43-54. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992008000200001

Schlumberger (2023). Sedimento. [En línea]. <https://glossary.slb.com/es/terms/s/sediment#:~:text=1.%20S.%20%5BGeolog%C3%A4a%5D,viento%2C%20para%20luego%20ser%20depositados> 31/05/2023

SEMARNAT (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 13 de septiembre de 2004. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Normas/Oficiales/NOM-141-SEMARNAT-2003.pdf>

SEMARNAT (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 23 de junio del 2006.
<https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>

SEMARNAT (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 02 de marzo de 2007.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4964569&fecha=02/03/2007#gsc.tab=0

SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 31 de diciembre de 2002.
<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>

SEMARNAT (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007, Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 15 de enero del 2010.
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5128126&fecha=15/01/2010#gsc.tab=0

SEMARNAT (2009). Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 30 de agosto de 2011.
<https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6665/1/nom-157-semarnat-2009.pdf>

SEMARNAT (2011). Norma Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011, Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 13 de febrero de 2012.
<https://dof.gob.mx/normasOficiales/4644/semarnat/semarnat.htm>

SEMARNAT (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 11 de febrero de 2022.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

SEMARNAT (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 21 de septiembre de 1998.
<https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3297/1/nom-003-semarnat-1997.pdf>

SSA (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud. <http://www.agrola.b.com.mx/sitev002/sitev001/assets/nom-127-ssa1-1994.pdf>

SMN (2023) Monitor de Sequía en México (MSM). Servicio Meteorológico Nacional.
<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

SSA (2002). NORMA Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Secretaría de Salud. 12 de julio de 2005
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2081772&fecha=12/07/2005#gsc.tab=0

Segura, F. R., Nunes, E. A., Paniz, F. P., Paulelli, A. C. C., Rodrigues, G. B., Braga, G. Ú. L., Dos Reis Pedreira Filho, W., Barbosa, F., Jr, Cerchiaro, G., Silva, F. F., & Batista, B. L. (2016). Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environmental Pollution* (Barking, Essex: 1987), 218, 813–825. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>

SGM (2017). Difracción de rayos X. Servicio Geológico Mexicano. [En línea]. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Difraccion-de-rayos-X.html> 14/02/2023

SGM (2017). Geoquímica. Servicio Geológico Mexicano. [En línea]. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Geoquimica/Introduccion-geoquimica.html> 14/02/2023

SGM (2019). Información ciudadana sobre jales. Servicio Geológico Mexicano. [En línea]. <https://www.gob.mx/sgm/articulos/informacion-ciudadana-sobre-jales?idiom=es#:~:text=Los%20jales%20son%20los%20apilamientos,las%20rocas%20que%20los%20contienen> 12/02/2023

SGM (2021). Panorama Minero del Estado de Hidalgo. Servicio Geológico Mexicano. [En línea]. <https://www.sgm.gob.mx/pdfs/HIDALGO.pdf> 14/02/2023

T.L., R., & Henry, J. (2012). El muestreo de suelos: los beneficios de un buen trabajo. *Informaciones agronómicas* No. 42, 1-5. [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/97F3E059E43811A0852579A300790776/\\$FILE/EI%20muestreo%20de%20suelos.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/97F3E059E43811A0852579A300790776/$FILE/EI%20muestreo%20de%20suelos.pdf)

US EPA, O. (2015). SW-846 test method 1312: Synthetic precipitation leaching procedure. <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-1312-synthetic-precipitation-leaching-procedure>

Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989, Geología de la Cuenca de México: *Geofísica Internacional*, 28(2), 133-190.

