



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS PELIGROSOS.

VALORIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES UTILIZÁNDOLAS COMO AGLUTINANTES EN EL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE RESIDUOS MINEROS.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

MARIO ALBERTO MINOR VARELA

TUTOR PRINCIPAL

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ,
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

COMITÉ TUTORAL

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRIA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO, UNAM

M.A.I LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., OCTUBRE DE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Sosa Echeverría Rodolfo

Secretario: M. A. I. Ramírez Burgos Landy Irene

1^{er}. Vocal: M. I. Mendoza Escobedo Carlos Javier

2^{do}. Vocal: Dra. González Sandoval María Del Refugio

3^{er}. Vocal: Dra. Fernández Villagómez Georgina

Lugar o lugares donde se realizó la tesis

Facultad de Ingeniería UNAM, Instituto de Geología UNAM.

Tutora de la tesis:

Fernández Villagómez Georgina

Firma

Dedicatoria.

A mi familia, por ser un gran pilar en esta etapa de mi vida, por ayudarme en los momentos más difíciles; por su amor incondicional y siempre apoyarme en ser una mejor versión de mí y finalmente por todos sus consejos. Todas las metas que cumpla también serán suyas...

Los amo

Gracias a las grandes amistades que hice en la maestría y a viejos amigos, agradezco mucho su confianza, risas y el apoyo brindado. Andrea, Amelia, Samanta, Mitzi, Maribel, Ana, Fidel, Carlos, Estrella, Guillermo y Sandra.

Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de seguir creciendo académicamente y de estudiar el posgrado

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

A mi tutora principal, la doctora Georgina Fernández Villagómez, por toda la confianza, paciencia y apoyo incondicional. Le agradezco infinitamente por permitirme estar bajo su tutoría, asimismo por enseñarme a ser mejor persona y soñar en grande.

Al Dr. Jesús Fidel González Sánchez por su invaluable apoyo en laboratorio y sus valiosas aportaciones para este trabajo.

Al comité tutorial y jurado ampliado por sus correcciones y valiosas aportaciones para este escrito.

A la Facultad de Ingeniería, laboratoristas y técnicos por brindarme apoyo para los análisis y pruebas, especialmente al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; Laboratorio de Paleontología y Sedimentología; Laboratorio de Microscopía Electrónica; Laboratorio de Materiales; Laboratorio de Pruebas Mecánicas y al Laboratorio de Rocas Fracturadas.

Al Instituto de Geología de la UNAM, especialmente al Laboratorio de Geoquímica Ambiental Molecular y al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía.

Al equipo de trabajo, especialmente a Ana, Sandra, Estrella y Carlos

Índice

Resumen	1
Abstract	2
Capítulo 1 Introducción	3
1.1 Justificación	3
1.2 Hipótesis	5
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Alcances y limitaciones.....	6
Capítulo 2 Marco teórico	7
2.1 Residuos peligrosos	7
2.2 Jales mineros	9
2.3 Carbón y cenizas volantes	12
2.4 Tratamientos de residuos.....	18
2.5 Estabilización/Solidificación (E/S).....	20
2.6 Estudios previos.....	22
2.7 Legislación Ambiental.....	28
2.8 Zona de estudio.	31
Capítulo 3 Metodología	36
3.1 Muestreo	38
3.2 Caracterización de las muestras de jal	39
3.2.1 Caracterización física	40
3.2.1.1 Determinación de Humedad	40
3.2.1.2 Granulometría	40
3.2.1.3 Espectroscopía Infrarroja (FTIR, por sus siglas en inglés).	41
3.2.1.4 Microscopía electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés).	41
3.2.2 Caracterización Química.....	42
3.2.2.1 Fluorescencia de Rayos X	42
3.2.2.2 Absorción atómica.....	42
3.3 Caracterización de las cenizas volantes.....	45

3.4 Diseño del experimento	45
3.4.1 Definición de la unidad experimental	45
3.4.2 Definición de las variables de respuesta	46
3.4.3 Definición de factores y niveles.....	46
3.4.4 Diseño experimental.....	47
3.5 Elaboración de mezclas	48
3.6 Elaboración de especímenes	49
3.7. Prueba de compresión simple.....	50
3.8 Prueba de tanque.....	52
3.9 Prueba de porosimetría.....	53
Capítulo 4. Resultados y su evaluación.....	54
4.1 Caracterización de los jales	54
4.1.1 Determinación de humedad y pH	54
4.1.2 Granulometría y SEM	56
4.1.3 Espectroscopía Infrarroja (FTIR, por sus siglas en inglés).....	58
4.1.4 Determinación de As y Pb	58
4.2 Caracterización de las cenizas volantes.....	60
4.3 Prueba de compresión simple	61
4.4 Prueba de tanque.....	65
4.5 Porosidad	68
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	71
5.1 Conclusiones.....	71
5.2 Recomendaciones.....	72
Referencias	74
Anexos	80

Indice de tablas.

Tabla.2.1 Intervalo normal de composición química de las cenizas volantes producidas a partir de distintos tipos de carbón (Ahmaruzzaman, 2010).....	15
Tabla 2.2 -Especificaciones para las cenizas según la Norma ASTM C 618	16
Tabla 2.3 Tratamientos disponibles para los residuos peligrosos (Martínez, 2005).....	19
Tabla 2.4 Trabajos citados en estudios previos y el país donde se realizó la investigación	26
Tabla 2.5 Normas Oficiales Mexicanas referentes a residuos peligrosos	30
Tabla 3.1 Puntos de muestreo y altitud.	38
Tabla 3.2 Equipos y métodos utilizados para la caracterización de los jales utilizados en esta investigación	44
Tabla 3.3 tratamientos y factores.	46
Tabla 3.4 Cantidad en gramos utilizada en cada tratamiento	48
Tabla 3.5 Normas de metodologías utilizadas	53
Tabla 4.1 Resultados de la determinación de humedad y pH para cada una de las diez muestras (Datos obtenido de -González et al., 2022).....	55
Tabla 4.2 Resultados obtenidos por los análisis del FTIR (por sus siglas en inglés) (Datos obtenido de -González et al., 2022).	58
Tabla 4.3 Concentraciones de arsénico y plomo.....	59
Tabla 4.4 Comparación de la ceniza analizada vs la composición química de las cenizas volantes producidas a partir de distintos tipos de carbón (Ahmaruzzaman, 2010).	60
Tabla 4.5-Especificaciones para las cenizas según la Norma ASTM C 618.....	61
Tabla 4.6 Resultados de ANOVA de interacción entre Jal, Mezcla y ceniza para la prueba de compresión simple	62
Tabla 4.7 Prueba de Tukey entre el factor Mezcla y Ceniza.....	62
Tabla 4.8 Prueba de Tukey para el factor Jal.....	64
Tabla 4.9 Prueba de Tukey para el factor Mezcla.	64
Tabla 4.10 Resultados de ANOVA de interacción entre Jal, Mezcla y ceniza para la prueba de Porosidad.....	68
Tabla 4.11 Prueba de Tukey para los factores Jal, Mezcla y Ceniza.....	69

Índice de figuras .

Figura 1.1 Proceso de generación de jales (Tomada de CCM, S.F)	3
Figura 1.2 Producción de ceniza volante (Tomado de Muñoz et al., 2018)	4
.. Figura 2.1. Generación de RP según PGRP por entidad federativa,2004-2017(SEMARNAT, 2019).....	8
Figura 2.2 generación de RP por tipo reportada al PGRP, 2004-2016. (Datos graficados de SEMARNAT,2019).	8
Figura 2.3. Distribución de las franjas mineralizadas en México (Clark et al., 1982. Mapa modificado por Rivera, 2018)	9
Figura 2.4. Movilización natural de elementos potencialmente tóxicos por acción de agua y del viento (Solano, 2005).....	10
Figura 2.5. Los tres tipos de transporte eólico de partículas (Buschiazzo y Aimar, 2003)...	11
Figura 2.6. Mapa de localización de los principales yacimientos de carbón en el mundo (Corona et al., 2007).	12
Figura 2.7. Localización de los principales yacimientos de carbón en México (Modificado de Corona et al., 2007)..	13
Figura 2.8 Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de Molina, 2018).	32
Figura 2.9. Columna estratigráfica de la zona de Zimapán (Saldaña, E., 2016)	34
Figura 3.1 Diagrama de metodología general del proyecto de investigación.	37
Figura 3.2 La ubicación geográfica de los puntos muestreados.	39
Figura 3.3 Tamizadora Tyler modelo RX-29 y tamices.	41
Figura 3.4 Microscopio Phillips modelo XL20.....	42
Figura 3.5 Espectrofotómetro de absorción atómica marca GBS modelo Avanta.	43
Figura 3.6. Presa de jales muestreada.....	48
Figura 3.7 a) Mezcladora marca Hobart; b) Mesa de fluidez con platillo de bronce y cono trunco.	49
Figura 3.8 Cámara de curado.....	50
Figura 3.9 a) Prensa mecánica marca Shimadzu; b) puesta del espécimen bajo el cabezal.	51
Figura 3.10 especímenes en prueba de tanque	52
Figura 3.11. a) Especímen dentro de vaso de precipitado con agua destilada; b) Especímenes sometido a cámara de vacío.....	53

Figura 4.1 Granulometría de diferentes puntos de muestreo (Datos obtenido de -González et al., 2022).....	56
Figura 4.2 Imagen por microscopio electrónico de barrido de la muestra 10.....	57
Figura 4.3 a) Grafica de concentración de arsénico; b) Grafica de concentración de plomo.	59
Figura 4.4 Resistencia a la compresión de los tratamientos.....	63
Figura 4.5 pH y conductividad de los lixiviados de la prueba de tanque	66
Figura 4.6 Porcentaje de eficiencia.	67
Figura 4.7. Porcentaje de aumento de porosidad.....	70

Resumen

La industria minera y energética son actividades económicas fundamentales a nivel nacional, estas mismas causan problemáticas ambientales y de salud. Sus acciones por si mismas generan grandes cantidades de residuos, en el caso de las mineras principalmente jales y por otro lado las carboeléctricas que producen cenizas volantes por la quema de enormes volúmenes de carbón mineral.

Este trabajo tiene como objetivo la valorización de cenizas volantes utilizándolas como aglutinantes en el proceso de estabilización/solidificación de residuos mineros para la elaboración de especímenes de alta resistencia, experimentando con diferentes proporciones de cal, jal y ceniza volante. Para esta investigación se ejecutó un diseño estadístico de experimentos mediante un diseño factorial 2x2x3. Aunado a esto se realizó una caracterización química y física, así como la identificación de EPT (As y Pb) en diez muestras provenientes de una presa de jales ubicada en la zona minera de Zimapán, Hidalgo. Por otro lado, se hizo la caracterización química de las cenizas volantes. Posteriormente caracterizados ambos residuos se experimentó con diferentes proporciones, se elaboraron especímenes y estos se sometieron a diferentes pruebas mecánicas, de lixiviación (de tanque) y porosidad.

Las pruebas mostraron que la adición de ceniza volante es de gran ayuda para incrementar la resistencia a la compresión, además la prueba de tanque evidenció que los tratamientos fueron eficientes para el encapsulamiento de EPT y por último la prueba de porosidad muestra que hay una relación inversa entre ésta y la resistencia a la compresión.

Abstract

The mining and energy industry are fundamental economic activities at the national level and cause environmental and health problems. Their actions generate large amounts of waste, mainly tailings in the case of mining and coal-fired power plants that produce fly ash from the burning of huge volumes of coal.

The objective of this work is the valorization of fly ash by using it as a binder in the process of stabilization/solidification of mining wastes for the production of high strength specimens, experimenting with different proportions of lime, tailings and fly ash.

For this research, a statistical design of experiments was carried out using a 2x2x3 factorial design. In addition, a chemical and physical characterization was carried out, as well as the identification of Potentially Toxic Elements (PTEs; As and Pb) in ten samples from a tailings dam located in the mining area of Zimapán, Hidalgo. On the other hand, a chemical characterization of fly ash was performed.

After characterizing both residues, experiments were carried out with different proportions, specimens were elaborated and subjected to different mechanical, leaching (tank test) and porosity tests

The tests showed that the addition of fly ash is of great help to increase the compressive strength, also the tank test showed that the treatments were efficient for the encapsulation of PTEs and finally the porosity test shows that there is an inverse relationship between the porosity and the compressive strength

Capítulo 1 Introducción

1.1 Justificación

El agotamiento global de los recursos naturales y el medio ambiente, así como el aumento de la cantidad de residuos peligrosos generados por industrias como la minería y el petróleo, son algunas de las fuerzas impulsoras que impulsan a los investigadores y al mundo industrial hacia soluciones sostenibles de ingeniería civil. (Bignozzi, 2011; Parra, 2017).

Los residuos mineros o jales se generan en los procesos de obtención de minerales, estos se producen a partir de la trituración y molienda del mineral. Como resultado de este proceso, las grandes rocas que contienen los metales se convierten en pequeñas partículas (contienen materiales tóxicos), éstas son fácilmente suspendidas y transportadas por el viento provocando daño a los ecosistemas y a las personas, por ende, los jales por su naturaleza, representan un riesgo para el ambiente y la salud de la población en general (Alvarado y Volke, 2004; Parra, 2017; Alieh *et al.*, 2020) (Figura 1.1).

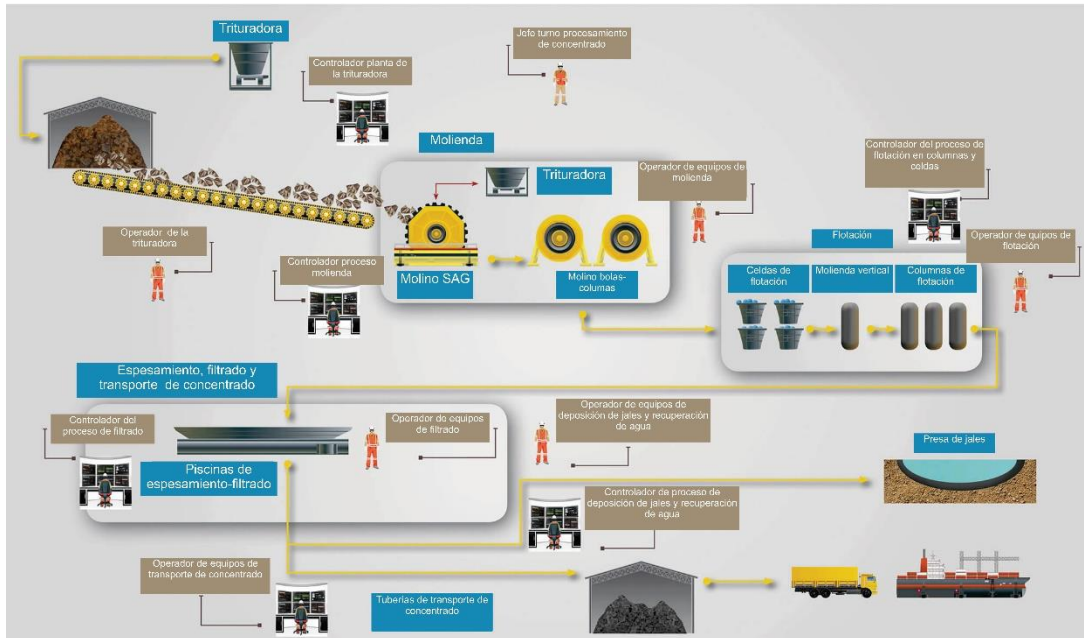


Figura 1.1 Proceso de generación de jales (Tomada de CCM, S.F)

Las cenizas volantes son un subproducto de la quema de carbón pulverizado en las centrales eléctricas. El carbón se tritura y se sopla con aire hacia la cámara de combustión de la caldera, donde se enciende instantáneamente, liberando calor. Los tubos de la caldera reciben calor, enfrían los gases de escape y convierten el carbón fundido en cenizas. Las partículas grandes de ceniza se denominan cenizas o escorias, mientras que las partículas más pequeñas se denominan cenizas volantes y permanecen suspendidas en los gases de escape. (Rivva, 2008; Ahmaruzzaman, 2010). Estas últimas son consideradas un subproducto industrial que se reconoce como un contaminante ambiental, ya que este material, si se deposita de forma inadecuada, puede producir la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por lixiviación. Así mismo por el tamaño de sus partículas estas pueden ser un contaminante atmosférico y repercutir en la salud de la población (Polic *et al.*, 2005; Medina *et al.*, 2010; Dwivedi *et al.*, 2014) (Figura 1.2).

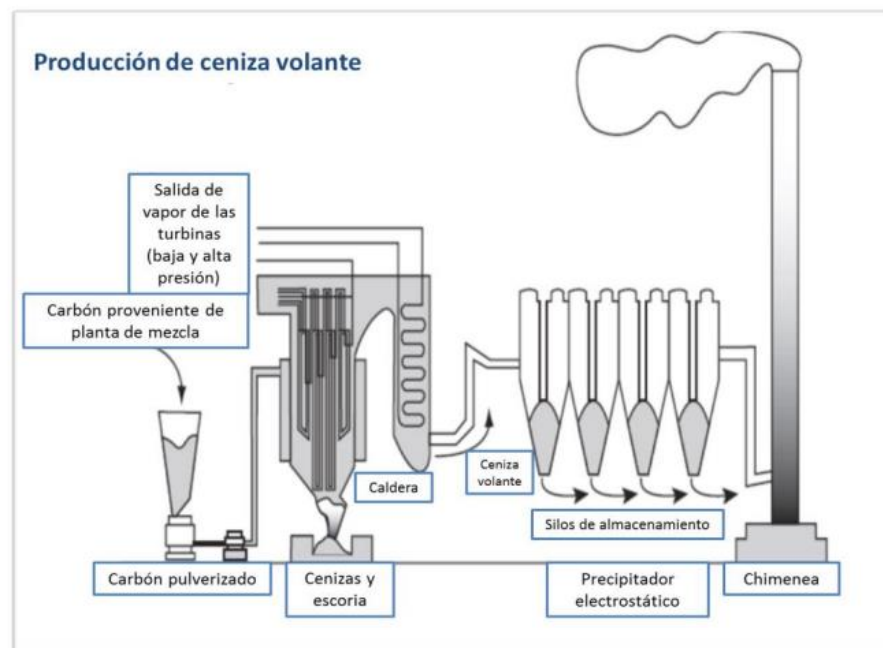


Figura 1.2 Producción de ceniza volante (Tomado de Muñoz *et al.*, 2018)

Las cenizas volantes se han estudiado en diferentes países como aglutinantes en la fabricación del cemento por su alta composición de sílice y de otros óxidos (Faguan *et al.*, 2000; Bhattacharjee y Kandpal, 2002; Zhenguó Shi *et al.*, 2018). Además, tienen un gran

potencial para aplicaciones de alto volumen y se puede utilizar para pavimentación de carreteras, construcción de terraplenes y rellenos de minas (Patil *et al.*, 2013; Elbaz *et al.*, 2019; Ahmaruzzaman, 2010).

La literatura reporta que también son útiles para inertizar residuos peligrosos como los radiactivos. Adicionalmente, por estudios previos, se ha encontrado que los materiales puzolánicos, son excelente aglutinantes para la estabilización/solidificación (E/S) de residuos peligrosos (Gutiérrez, 2018; Huasquisto y Belizario, 2018; Guadarrama, 2019).

La popularidad de la E/S entre los profesionales de remediación se debe a su capacidad para lograr los objetivos de remediación rápidamente y a un costo relativamente bajo. También es versátil, se puede aplicar in situ o ex situ, y es eficaz para una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos comunes (Shen *et al.*, 2019).

Por lo tanto, el uso beneficioso de ambos subproductos industriales tiene el potencial de proporcionar beneficios económicos tales como preservar las materias primas y evitar los impactos ambientales negativos asociados con la adquisición y el procesamiento de materias primas (Elbaz *et al.*, 2019).

1.2 Hipótesis

Las propiedades puzolánicas de las cenizas volantes, combinadas con la cal, aislarán y encapsularán elementos peligrosos contenidos en los jales mineros, por medio del tratamiento de estabilización/solidificación y con ello se valorizarán ambos residuos.

1.3 Objetivos

- Objetivo general

Determinar la valorización de cenizas volantes utilizándolas como aglutinantes en el proceso de estabilización/solidificación de residuos mineros para la elaboración de especímenes de alta resistencia, experimentando con diferentes proporciones de cal, jal y ceniza volante.

- **Objetivos específicos**
- Establecer el estado del arte sobre el uso de los jales mineros y cenizas volantes para la elaboración de especímenes, consultando bibliografía principalmente de las últimas dos décadas.
- Investigar el aprovechamiento de las cenizas volantes y los residuos mineros a partir de la realización de unidades experimentales para la E/S considerando un diseño estadístico de experimento.
- Determinar la eficiencia del tratamiento de E/S sometiendo las unidades experimentales elaboradas a pruebas mecánicas, de porosidad y de lixiviación.

1.4 Alcances y limitaciones

- El muestreo se realizó estratigráficamente en una sola presa de jales reciente del Distrito Minero de Zimapán en el estado de Hidalgo.
- El modelo estadístico que se utilizó para la evaluación del tratamiento de E/S fue un factorial 2x2x3 de efectos fijos completamente al azar.
- La ceniza que se valorizó corresponde a material procedente de una carboeléctrica de México proporcionada por la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Los elementos que se seleccionaron de los jales mineros después de los análisis de espectrofotometría y de fluorescencia de rayos x (FRX), fueron arsénico y plomo, debido a las concentraciones que se encontraron en las muestras.
- Las unidades experimentales elaboradas, fueron especímenes con dimensiones de 2.5 cm de diámetro y 5 cm de altura.

Capítulo 2 Marco teórico

2.1 Residuos peligrosos

Residuos peligrosos

La LGEEPA en su artículo 3 párrafo XXXIII definió como residuo peligroso a aquellos residuos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contengan agentes infecciosos que le confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio y, por tanto, representan un peligro al equilibrio ecológico al ambiente.

Generación de residuos peligrosos en México

En México, la generación de residuos peligrosos se origina de una gama variada de actividades de agricultura, industriales y domésticas. (PROFEPA, 2013)

Los riesgos para la salud y el ambiente de esta clase de residuos son un punto de gran importancia, esto ha llevado a que se generen leyes, reglamentos y normas, que establecen los límites de exposición y disposición final para reducir su volumen y peligrosidad (PROFEPA, 2013).

La cantidad de estos residuos generados en México, así como el número de empresas que los generan provienen de los registros e información proporcionada a la SEMARNAT por las empresas registradas en el Padrón de Generadores de Residuos Peligrosos PGRP. Según este registro, las empresas fueron registradas en 2001 y 2017. (115, 158 en total) Se produjeron 2,45 millones de toneladas, lo que no corresponde a la cantidad total de PR producida en el país, ya que no todas las empresas del país están inscritas en el padrón anterior. (SEMANAT, 2019).



Figura 2.1. Generación de RP según PGRP por entidad federativa, 2004-2017 (SEMARNAT, 2019).

Para el periodo 2004-2017 los estados que produjeron mayor cantidad de RP son la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Chihuahua, Campeche, Nuevo León y Tamaulipas. Por otro lado, las entidades con menor generación de RP fueron Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tlaxcala y Nayarit. (Figura 2.1; SEMARNAT, 2019).

En el periodo 2004-2016 los volúmenes de RP en mayor cantidad correspondieron a los residuos sólidos (residuos de mantenimiento automotriz, asbesto, telas, pieles, metales pesados, tortas de filtrado y otros sólidos), luego están los aceites gastados, los conjuntos denominados “otros residuos”, lodos y los residuos biológico-infecciosos. Los RP menos generados fueron breas, sustancias corrosivas y solventes (Figura 2.2; SEMARNAT, 2019).

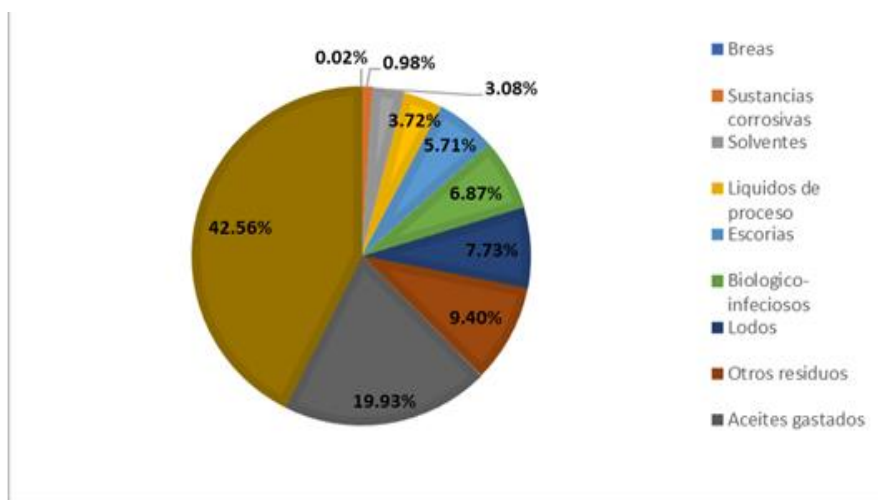


Figura 2.2 generación de RP por tipo reportada al PGRP, 2004-2016. (Datos graficados de SEMARNAT, 2019).

2.2 Jales mineros

La minería es una de las actividades económicas más importantes de México y ha contribuido al desarrollo del país desde la época prehispánica hasta la actualidad (Hernández *et al.*, 2009). La minería en México se concentra en 13 regiones: Chihuahua, Jalisco, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Guerrero. (Carillo, 2005). México es un país con grandes recursos minerales pero se limita a áreas mineras y metalúrgicas. Los sedimentos extraídos (Figura 2.3) son de naturaleza epitermal (Camprubi y Albinson, 2006; Clark *et al.*, 1982).

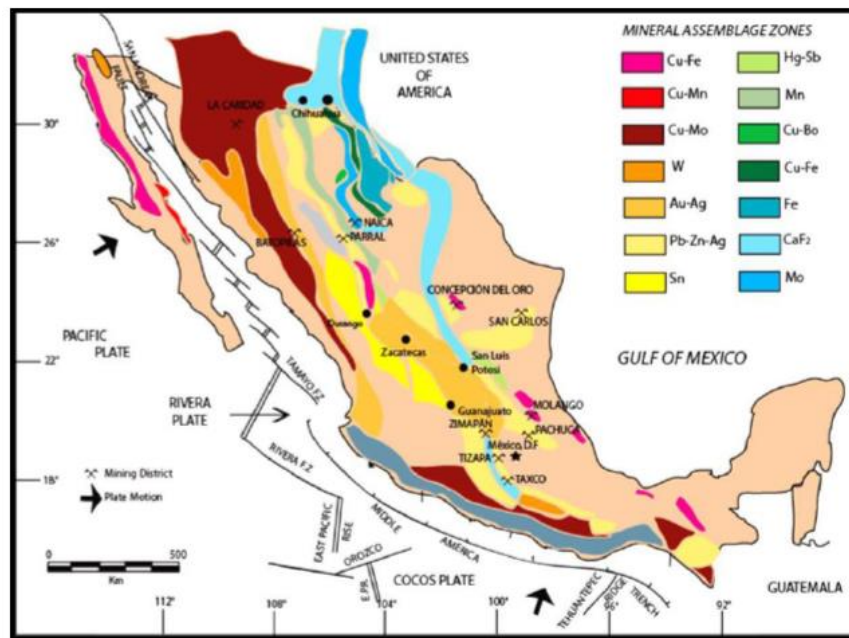


Figura 2.3. Distribución de las franjas mineralizadas en México (Clark *et al.*, 1982. Mapa modificado por Rivera, 2018)

México tiene una producción minera importante, por ende, también tiene una generación de residuos debida a esta actividad económica. Los jales mineros son materiales no consolidados de granulometría fina que se forman durante la extracción del mineral de interés. Los jales contienen sulfuros metálicos residuales y otros minerales que por su

origen pueden contener elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, etc. (Romero, 2004; Talavera *et al.*, 2006).

Los jales ricos en EPT tienden a tener tamaños de partículas muy finos, que pueden oscilar entre 2 micrómetros y 2 mm (Parbhakar y Lottermoser, 2015). Tal tamaño de partículas facilita el movimiento por acción del viento y el agua, provocando que se dispersen en el medio ambiente, representando una amenaza para el medio ambiente por su capacidad de filtrarse e ingresar a reservorios de agua, así como a otros ecosistemas por el viento o el agua. distribuido (Medel *et al.*, 2008)

Cuando el agente de movilización de los metales es el agua, sufren diferentes procesos en forma soluble o lavado y en forma particulada, como el ascendente (incluso precipitada), descendente (alcanza el nivel freático y llega a agua subterráneas), lateral de zonas más altas hacia zonas más bajas topográficamente; arrastre disuelto por las aguas de escorrentía y arrastre particulado de elevaciones topográficas a las más bajas (Solano, 2005; Figura 2.4.).

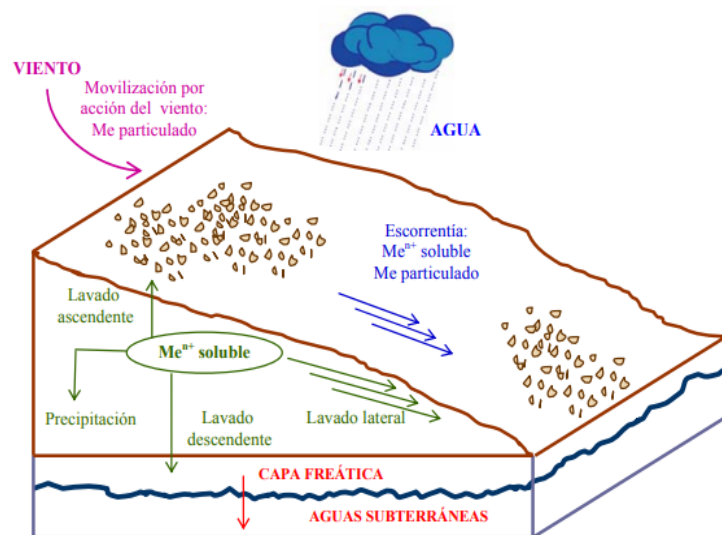


Figura 2.4. Movilización natural de elementos potencialmente tóxicos por acción de agua y del viento (Solano, 2005).

Al mismo tiempo si los metales pesados son de granulometría fina y están sobre la superficie del suelo, estos pueden ser fácilmente movilizados por agentes eólicos. En este caso los factores que rigen la migración de las partículas son la dirección y la velocidad de los vientos predominantes de la zona (Buschiazzo y Aimar; Figura 2.5.).

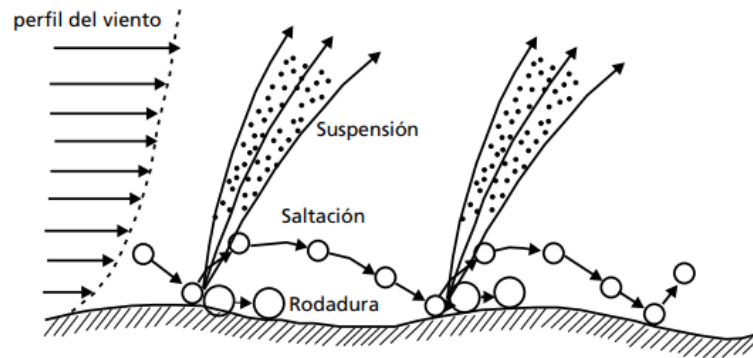


Figura 2.5. Los tres tipos de transporte eólico de partículas (Buschiazzo y Aimar, 2003).

2.3 Carbón y cenizas volantes

El carbón mineral es el resultado de la acumulación en un ambiente muy especial de depósito. Los grandes depósitos de carbón son pertenecientes al Paleozoico tardío en los periodos del Carbonífero y Pérmico y es en estos que hubo una gran explosión de especies que produjeron grandes acumulaciones de turba (Corona *et al.*, 2007).

A través del tiempo geológicos se formaron numerosos depósitos de carbón, en que destacan tres periodos los cuales son el Carbonífero, Jurásico-Cretácico y el Terciario (Figura 2.6.). Los depósitos de importancia económica están en el Carbonífero tardío-Pérmico temprano, estos depósitos son los más explotados por su buena calidad y constituyen un 40 % de la reserva de carbón (black coal) a nivel mundial. Durante el Jurásico-Cretácico, los yacimientos principales de este periodo se encuentran en el 31% de las reservas mundiales de carbón. Los yacimientos de México pertenecen a este periodo y la mayoría se localizan en el estado de Coahuila. En el periodo Terciario, se formaron depósitos más jóvenes que dieron lugar al carbón conocido como (lignito). Éste se encuentra alrededor del mundo, el cual constituye la mayor parte de reservas de lignito a nivel mundial (Corona *et al.*, 2007).

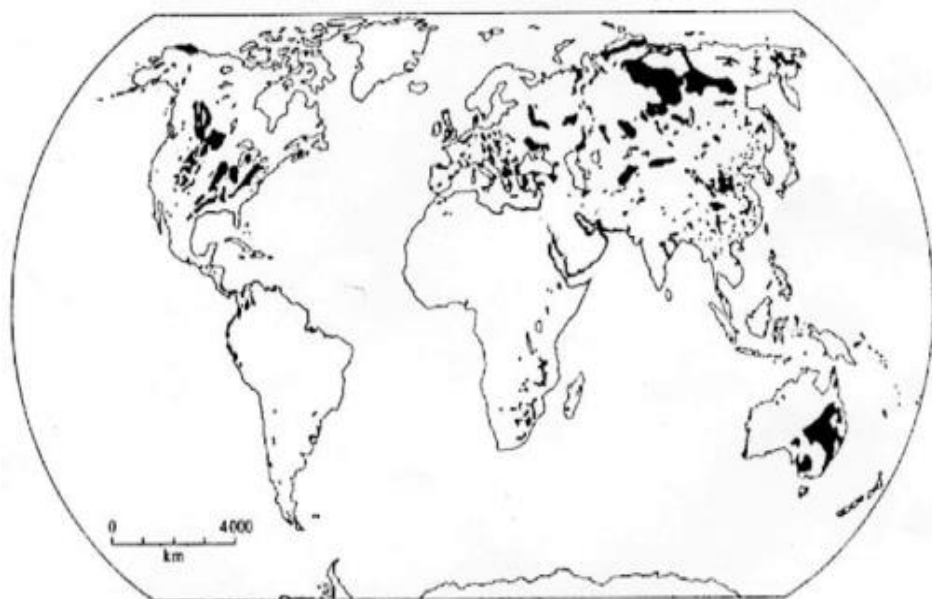


Figura 2.6. Mapa de localización de los principales yacimientos de carbón en el mundo (Corona *et al.*, 2007).

Carbón en México.

Hay varios estados de la República Mexicana que tienen yacimientos de carbón, pero a nivel nacional hay tres zonas carboníferas importantes (Figura 2.7). La de mayor importancia es la cuenca de Sabinas y Fuentes-Río Escondido en los estados de Coahuila y Nuevo León, esta zona produce más del 90% del carbón mexicano (Bruce, 2009). La segunda zona es la región carbonífera de Tezoatlan-Mixtepec en Oaxaca, toda esta región queda dentro de la provincia fisio geográfica de la Sierra Madre del Sur (Salas y Benavides, 1976). La tercera región carbonífera está en San Marcial- Santa Clara en Sonora, en este lugar contiene al carbón en su forma metamorfoseada, la cual es grafito (King, 1939). Las regiones carboníferas de Oaxaca como los de Sonora, están en litofacies fuertemente plegados y con fallamiento geológico, lo que hace que su explotación sea difícil y por ende costosa (Corona *et al.*, 2007).

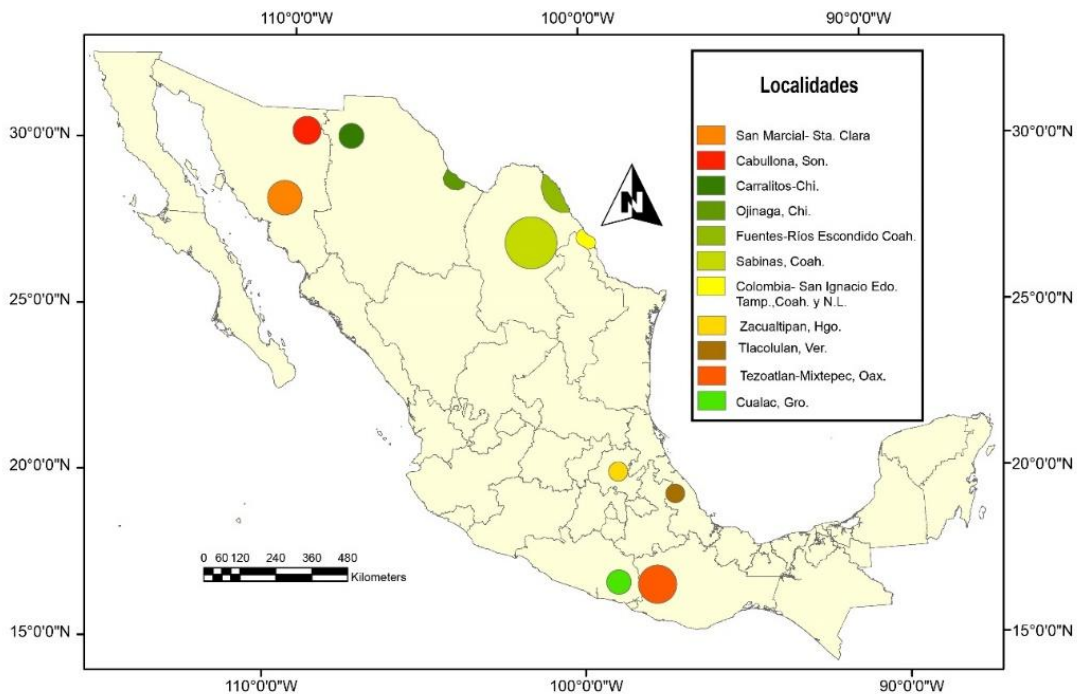


Figura 2.7. Localización de los principales yacimientos de carbón en México (Modificado de Corona *et al.*, 2007)..

Cenizas volantes

Es un residuo finamente disperso resultante de la combustión del polvo de carbón, que se elimina de la cámara de combustión mediante los gases de escape. Las cenizas volantes se producen en centrales eléctricas de carbón y de vapor. El carbón se tritura y se sopla con aire hacia la cámara de combustión de la caldera, donde se enciende instantáneamente, genera calor y forma depósitos de minerales fundidos. Los tubos de la caldera reciben calor de la caldera, enfrían los gases de combustión y solidifican los depósitos de minerales fundidos y forman cenizas. Las cenizas crudas, llamadas cenizas residuales o escorias, se encuentran en el fondo de la cámara de combustión. Las partículas más pequeñas se denominan cenizas finas o cenizas volantes (tamaño de 10 a 100 μm) y se suspenden en los gases de escape y se eliminan mediante dispositivos de control de emisiones de partículas (Ahmaruzzaman, 2010).

Composición química de las cenizas volantes

Las propiedades químicas de las cenizas volantes se ven afectadas principalmente por las propiedades del carbón, quemado y las técnicas utilizadas para la operación y el almacenamiento. Hay cuatro tipos de carbón: antracita, bituminoso, sub-bituminoso y lignito (Ahmaruzzaman, 2010; Santaella *et al.*, 2001; Mathapati *et al.*, 2021).

Los componentes principales de las cenizas volantes de carbón bituminoso son el silicio, la alúmina, el óxido de hierro y el calcio con diferentes concentraciones de carbono. Las cenizas volantes del lignito y del carbón semibituminoso se caracterizan por un mayor contenido de óxido de calcio y magnesio, un menor contenido de sílice y óxido de hierro y un menor contenido de hierro, como se muestra en la Tabla 2.1 (Ahmaruzzaman, 2010; Santaella *et al.*, 2001; Harjito *et al.*, 2004).

Tabla.2.1 Intervalo normal de composición química de las cenizas volantes producidas a partir de distintos tipos de carbón (Ahmaruzzaman, 2010).

Componente (%)	Bituminosos	Sub-bituminoso	Lignito
SiO ₂	20-60	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-10
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

Las cenizas volantes se categorizan con respecto al tipo de carbón del que derivan éstas. Cuando se usan como una mezcla mineral en el concreto, se clasifican como clase C o Clase F (tabla 2.2), esta especificación se hace con respecto a La Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) especificación C 618 (ASTM-C618e8a, 2009; Ahmaruzzaman, 2010; Hemalatha, *et al.*, 2017; Santaella *et al.*, 2001; Mathapati *et al.*, 2021; Hardjito *et al.*, 2004)

- Clase F: Cenizas volantes producidas por la combustión de antracita y carbón bituminoso, con un contenido de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ del 70% en peso y presentan propiedades puzolánicas
- Clase C: Estas cenizas derivan de carbonos sub-bituminosos, este grupo presenta propiedades cementicias y puzolánicas, y deben tener un contenido mínimo de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ del 50 % y un máximo en cal del 20% para poder ser empleadas en hormigones.

Tabla 2.2 -Especificaciones para las cenizas según la Norma ASTM C 618

Componente	Clase C	Clase F
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	>50	>70
CaO	>10	<10
SO ₃	<5	<5
álcalis (NaO ₂)	<1.5	<1.5
Pérdida a la incineración (LOI)	<6	<6
Humedad	<6	<6

Uso de las cenizas volantes

En cuanto a las cenizas volantes, se trata de un residuo ambientalmente problemático que necesita ser tratado en las centrales térmicas, evitando que se acumule en vertederos y sedimentos externos. Esta actividad se vuelve ambientalmente peligrosa cuando entra en contacto con el agua, el suelo y el aire, provocando graves problemas de contaminación (Cifuentes *et al.*, 2006; Ahmaruzzaman, 2010; Mathapati *et al.*, 2021).

Además, se ha informado que aproximadamente el 40% de la energía mundial total se produce a partir del carbón. Este uso continuo de carbón genera cenizas volantes a aproximadamente 750 millones de toneladas en 2015 de 500 millones de toneladas en 2005 (Gollakota *et al.*, 2019). La eliminación segura de las cenizas volantes generadas por las carboeléctricas es un desafío importante. Además, la aceptación de los productos de cenizas volantes ha comenzado a aumentar y están emergiendo como un importante material de recursos para este milenio (Celik *et al.*, 2008).

La utilización de cenizas volantes parece ser técnicamente factible en la industria del cemento. Hay esencialmente tres aplicaciones para las cenizas volantes. (1) sustitución de cemento en concreto Portland (2) material puzolánico en la producción de puzolánica

cementos, y (3) fijar ingrediente retardante con cemento como un reemplazo de yeso. El cemento es el componente más costoso y de mayor consumo de energía de concreto. El costo unitario del concreto se reduce mediante el reemplazo parcial de cemento con cenizas volantes. La utilización de cenizas volantes se basa en parte por motivos económicos como puzolana para la sustitución parcial de cemento (Ahmaruzzaman, 2010; Celik *et al.*, 2008; Cifuentes *et al.*, 2006.).

El uso de cenizas volantes en el concreto mejora la trabajabilidad y es ampliamente recomendado como reemplazo parcial de cemento. Esto también reduce el costo de la construcción. El concreto de cenizas volantes proporciona cubierta protectora muy fuerte y estable al acero contra la natural acción de intemperie. Debido a la presencia de compuestos cementicios de calcio y un vidrio reactivo, la ceniza volante con alto contenido de calcio es bastante adecuada en productos de cemento Portland (Xargay *et al.*, 2019).

La adición de cenizas volantes a mezclas de cemento aumenta la edad temprana, resistencia a la compresión y características de resistencia a la corrosión a largo plazo (Maslehuddin, 1989). Se ha demostrado que la resistencia a la abrasión es mejor cuando se añade cenizas volantes de clase C a comparación de si se agrega con cenizas de clase F. Además. la combinación de cenizas volantes de clase C y F se pueden utilizar para producir cenizas volantes de alta calidad y utilizarse en pavimentos de concreto (Tikalsky *et al.*, 1988; Naik *et al.*, 1994; Ahmaruzzaman, 2010)

2.4 Tratamientos de residuos

El objetivo del tratamiento de residuos es un proceso de conversión destinado a reducir el volumen y minimizar los peligros. (Martínez, 2005). Cada proceso de tratamiento generará otros desechos, emisiones, aguas residuales y residuos sólidos que requieren de un tratamiento especial, tomando en cuenta sus características, la ubicación de la infraestructura de servicios en relación con la fuente de emisión, y áreas sensibles, así como el costo de estos servicios. (Martínez, 2005). La disposición final de residuos es su lugar, minimizando las emisiones contaminantes. En el caso de residuos peligrosos, lo más común es un vertedero seguro. Esta tecnología implica la colocación en el suelo mediante estructuras de construcción especialmente diseñadas (Martínez, 2005). Dentro de los procesos de tratamiento, están:

- *Fisicoquímicos*
- *Estabilización/solidificación*
- *Biológicos*
- *Térmicos*

Fisicoquímico: incluye métodos tanto físicos como químicos para cambiar las propiedades fisicoquímicas de los residuos. Estos procesos pueden realizar varias funciones en un sistema de gestión de residuos, por ejemplo (Martínez, 2005, Tabla 2.3):

- Permite recuperar un compuesto para su posterior uso como materia prima para otro proceso.
- Separar los componentes peligrosos del peso total de los residuos.
- Reducir el riesgo de residuos cambiando sus componentes, convirtiéndolos en compuestos menos tóxicos o limitando su capacidad de moverse en el medio ambiente.
- Convertir los residuos en material apto para su ingreso a sistemas de tratamiento u otra disposición final.

Estabilización: De forma muy general, esta técnica tiene como objetivo mejorar las características físicas y disminuir el área superficial. De esta forma se reduce la transferencia de masa y solubilidad de los contaminantes presentes, este método esta

descrito a detalle en su apartado correspondiente dentro de este trabajo (Martínez, 2005; Tabla 2.3).

Biológico: El tratamiento biológico implica la descomposición de contaminantes bajo la influencia de un grupo de microorganismos. En el caso de los residuos tóxicos, este método de tratamiento rara vez se utiliza porque los microorganismos suelen ser muy sensibles a las sustancias tóxicas (Martínez, 2005; Cuadro 2.3).

Tratamiento térmico: La quema es el método de tratamiento térmico más utilizado y se puede realizar en hornos especialmente diseñados, así como en instalaciones industriales, si se cumplen las especificaciones de la instalación y la composición de los residuos (Martínez, 2005; Cuadro 2.3).

Tabla 2.3 Tratamientos disponibles para los residuos peligrosos (Martínez, 2005)

Tratamientos físicos	Tratamientos químicos	Tratamientos Biológicos	Tratamientos térmicos
Filtración	Neutralización.	Lodos activados	Pirolisis
Separación por gravedad (sedimentación, centrifugación, floculación y flotación)	Precipitación	Digestión anaerobia	Tecnologías de arco de plasma
Evaporación	Oxidación-reducción	Compostaje	Oxidación en sal fundida
Destilación	Descomposición por oxidación		
Arrastre con aire	Decloración con metales alcalinos		
Adsorción en carbón			
Intercambio iónico			Incineración

2.5 Estabilización/Solidificación (E/S)

La E/S es un proceso de encapsulación y sellado de residuos utilizando un aglutinante, con el único objetivo de evitar la lixiviación de los residuos al medio y poder convertir los productos en materiales de construcción ecológicos o residuos no peligrosos en el lugar de disposición final (Johson & Affam, 2018).

La solidificación es un proceso que une mecánicamente los contaminantes en una matriz sólida para formar un monolito de alta integridad estructural que consiste en una mezcla de contaminantes, suelo y agentes puzolánicos. Este método atrapa (retiene físicamente) contaminantes en el suelo (Volke *et al.*, 2005).

La estabilización incluye la adición de materiales o sustancias que reducen la reactividad, volatilidad y/o solubilidad del contaminante. Esto se debe a la reacción del contaminante con el aditivo, dando como resultado compuestos menos solubles y móviles (Volke *et al.*, 2005).

La USEPA (1997) define las tecnologías de E/S con propiedades puzolánicas, como aquellas que usan "reactivos inorgánicos para reaccionar con ciertos componentes de desecho; también reaccionan entre sí para formar sólidos química y mecánicamente estables". Este es un método convencional utilizado para E/S. Los reactivos comunes incluyen cementos Portland, cenizas volantes y cal y ceniza de horno. Estos reactivos generalmente reaccionan para formar una matriz sólida, que a menudo es estable y tiene una estructura rígida como muchos suelos y rocas). Los reactivos cementosos para la E/S, a menudo se denominan "polímeros inorgánicos". Normalmente, el proceso E/S se realiza mediante la hidratación del cemento Portland.

La E/S se puede realizar tanto in situ como ex situ. Los residuos ex situ destinados al tratamiento en campo deberán valorizarse para poder eliminar el residuo resultante. Se pueden utilizar muchos sistemas in situ para cubrir suelo contaminado sin necesidad de excavación, asegurando que el material permanezca en su lugar (Volke *et al.*, 2005). El uso de este método tiene muchas aplicaciones, entre ellas: limpieza de suelos contaminados,

ya que pueden usarse como materiales base para la producción de vidrio; También se puede utilizar para producir un producto útil (material de relleno para caminos); el contaminante se estabiliza y aísla, y es una tecnología completamente desarrollada y disponible comercialmente. Sin embargo, este proceso tiene algunas limitaciones: el volumen inicial de material aumenta, otra es que los materiales endurecidos que no se pueden reutilizar como suelo, y esto puede dificultar el uso futuro del lugar; para aplicar el aditivo se debe drenar el suelo y realizar la operación a altas temperaturas, limitando el uso de suelo contaminado con sustancias o elementos no volátiles; y su costo es muy alto porque se debe eliminar el suelo estabilizado/solidificado (excepto en la vitrificación in situ; Volke *et al.*, 2005).

En los últimos años este método, E/S ha ido perdiendo terreno y uso en el mercado occidental, ya que preocupa sobre su eficacia a largo plazo, junto con una disminución general de la remediación en América del norte y Europa, han afectado gravemente esta tecnología. Sumado a esto su uso en países como Corea del Sur y Dinamarca está prohibido debido a los requisitos para eliminar los contaminantes de los suelos (Shen, Z. *et al.*, 2019).

Sin embargo, hay un país donde la E/S está floreciendo, China, en donde este método lidera masivamente el mercado de remediación chino. Esto se debe a que el método tiene la capacidad para lograr los objetivos de remediación rápidamente, también es muy versátil ya que puede ser aplicable tanto in situ o ex situ para una amplia gama de sustancias inorgánicas y orgánicas (Wang *et al.*, 2018).

Recientemente, los aglutinantes de cementos son más ecológicos para fines de E/S. Estos cementos están compuestos por materiales de bajo costo y bajo contenido de carbono. Los cementos a base de magnesia (MgO), no solo ofrecen estos beneficios, sino que también son resistentes a la corrosión ácida por sulfatos. Además, en la actualidad se desarrollan materiales cementosos autorreparables, lo que sugiere que estos serán duraderos y resilientes (Shen, Z. *et al.*, 2019).

Los aglutinantes de cemento que incorporan aditivos de desecho, como escorias, cenizas volantes o yeso fosforado, se alinean con el concepto de economía circular, ya que se

utilizan residuos para tratar residuos. El uso de escorias también es beneficioso para la generación de geles insolubles durante la hidratación del cemento, disminuyendo los aumentos de pH y simultáneamente mejoran la estabilización y resistencia del material (Shen, Z. *et al.*, 2019).

2.6 Estudios previos.

Existen varios estudios y trabajos sobre la utilización de la E/S con la combinación de cemento portland para una aplicación viable en el tratamiento de residuos tóxicos, producidos por la industria minera. A continuación, se refieren algunos trabajos de elaborados en la Facultad de ingeniería y artículos internacionales recientes.

Inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales (González, 2012).

Este estudio propone una técnica de desarrollo de bloques para buscar características que permitan la reutilización de residuos mineros y lodos., transformándolos en un material aprovechable y sustentables, esto se hizo a través de solidificaciones monolíticas con zeolitas así como con diferentes materiales y mediante pruebas en laboratorio, se probó su capacidad estructural, para ello se realizó una prueba de compresión mecánica con el fin de cuantificar su resistencia, también se llevaron a cabo pruebas hídricas, de lixiviación y de intemperismo acelerado, esta última, con el propósito de saber el comportamiento de los especímenes a través del tiempo y bajo condiciones ambientales pocos favorables

Propuesta para el aprovechamiento de residuos metalúrgicos no ferrosos (González, 2016)

En este trabajo, los residuos peligrosos son metales no ferrosos presentes en jales mineros tratados de la mina la "La Prieta" en el municipio de Hidalgo del Parral en el estado de Chihuahua. Con el fin de utilizar dichos residuos, se caracterizaron las muestras obtenidas de la mina a partir de pruebas analíticas en laboratorio.

Asimismo, se realizaron ensayos de estabilización/solidificación utilizando diferentes mezclas: cemento compuesto - zeolita y cemento Portland ordinario - arena. Las muestras de E/S fueron sometidas a pruebas de intemperismo acelerado, mecánicas, de lixiviación,.

Se reconoce que el tratamiento de E/S puede utilizarse para tratar este tipo de residuos y utilizar el material resultante en la construcción.

Propuesta para la disposición de jales agotados, previamente caracterizados y estabilizados, en cavidades mineras, (Gutiérrez, 2018).

En este estudio se determinó la composición física y química de jales de Zimapán-Hidalgo mediante diversos métodos analíticos, lo que ayuda a conocer las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) que se pueden detectar, así como evaluar su comportamiento como material de relleno de mina y estabilización de terrenos.

Para el tratamiento de los residuos de la mina se utilizó el método E/S, probando diferentes variantes y composiciones de mezcla, la cuales fueron 3 (jal y cemento; jal, cal y cemento; y jal, cemento y zeolita) para formar especímenes, a lo que se sometieron a pruebas de intemperismo acelerado y lixiviación. Se observa que, sin importar las proporciones entre los tratamientos, no se disminuyeron las concentraciones de plomo y que en el lixiviado todavía había arsénico presente.

Caracterización y análisis de riesgo de los jales de una zona minera del estado de Durango, México (Guadarrama, 2019).

Realizó la caracterización y análisis de riesgo de los jales en la mina Cerro de Mercado del estado de Durango, en el que los niveles de cromo y antimonio sobrepasaban los límites máximos permisibles. Por eso el trabajo de investigación se enfocó en aplicar la técnica de estabilización/solidificación para encapsular los contaminantes presentes en los jales, y darles un uso en la fabricación de ladrillos para la construcción de muros divisionales. Para la fabricación de estos, se realizó una mezcla de jales, cemento, vidrios molidos y toba volcánica del Popocatepetl. A las unidades experimentales (ladrillos) se les aplicó la prueba de comprensión mecánica, intemperismo acelerado y pruebas de lixiviación.

La técnica de E/S demostró que la mayoría de los tratamientos con mezclas de jal, cemento y vidrio fueron las óptimas para el encapsulamiento de contaminantes igual que superaron los valores de resistencia a la compresión.

Aplicaciones de cemento Portland mezclado con cenizas volantes y lodos de tratamiento de drenaje ácido de mina para controlar la generación de drenaje ácido de mina a partir de rocas de desecho (Sephton *et al.*, 2019).

Este estudio realizó aplicaciones de cementos mezclados con cenizas volantes y lodos. Para probar estos dos aditivos afectan el rendimiento del cemento en la reducción de la generación de drenaje ácido de mina, se aplicaron lechadas de cemento mezclado a rocas de desecho sulfídicas de Brukungu, Australia del Sur, en columnas de lixiviación monitoreadas durante aproximadamente un año. Las cargas de acidez, metal y sulfato disminuyeron considerablemente para todas las aplicaciones de cemento. Los cementos mezclados con cenizas volantes penetraron más en las columnas que los cementos mezclados con lodos, lo que provocó una mayor disminución de las cargas de acidez de lixiviados y oxidación de sulfuros debido a una mejor cobertura de las rocas de desecho y una mayor neutralización de la acidez por disolución del cemento.

Reutilización de residuos mineros como agregados a base de cenizas volantes (Capasso *et al.*, 2019).

En esta investigación se efectuaron diferentes mezclas para la realización de un geopolímero a partir de cenizas volantes y la utilización de rocas provenientes de actividades mineras, como unidad de estudio se fabricaron especímenes a los que se les realizaron pruebas de compresión mecánica, y de lixiviación para analizar en detalle la interacción entre el ligante geopolímero y los agregados de desechos de roca. Todas las muestras probaron que los elementos tóxicos potenciales estuvieron inactivos, cumpliendo con normas europeas para residuos inertes. Además, con respecto a las pruebas mecánicas, la resistencia de los especímenes es homologada a la de cementos normales.

Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento (Bautista, *et al.*, 2017).

El estudio presenta un análisis químico y morfológico de las cenizas volantes, en esta publicación señalan que se utilizaron cenizas tipo F para la elaboración de cementos para uso industrial. La morfología y química revelan inquemados de carbón y esferas de diferente

tamaño en donde destacan que esto adiciona ventajas mecánicas y tiempo de curado al cemento portland cuando son mezcladas con él. Con respecto a estas consideraciones, este material es un muy buen aditivo en la fabricación industrial.

Durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada (Belmonte, *et al.*, 2019)

En este trabajo se han descrito las características de durabilidad de 5 mezclas de concreto con diferentes contenidos de cenizas volantes activadas y cemento Portland CPC 40.. Las pruebas realizadas fueron pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, permeabilidad rápida al ion cloruro y resistencia mecánica a la compresión. El escrito mencionó que las mezclas con ceniza volante mantienen una gran durabilidad. Además, la resistencia mecánica de las diferentes mezclas demuestra que son viables para la fabricación de concretos.

Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. (Huasquisto y Belizario, 2018).

El escrito menciona como fue la dosificación y utilización de diferentes mezclas de cemento con cenizas volantes para la creación de concretos. Diversas mezclas de concreto se les adicionaron diferentes proporciones de ceniza volante tipo F, variando en 2.5%, 5.0% 10% y 15%. Las muestras creadas a partir de las diferentes proporciones de ceniza y cemento se sometieron a pruebas mecánicas de resistencias. El estudio determinó que las muestras alcanzaron resistencias por encima del concreto convencional, siempre y cuando la proporción de cenizas volantes en las mezclas de concreto sean menores al 10%. Al contrario, si se llega a rebasar esta proporción, el concreto disminuye su resistencia y será necesario utilizar aditivos. En la tabla 2.4 se resumen los trabajos recientes antes mencionados.

Tabla 2.4 Trabajos citados en estudios previos y el país donde se realizó la investigación

Título del trabajo	Referencia	País donde se realizó el estudio
Inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales	González, 2012	México
Propuesta para el aprovechamiento de residuos metalúrgicos no ferrosos	González, 2016	México
Propuesta para la disposición de jales agotados, previamente caracterizados y estabilizados, en cavidades mineras	Gutiérrez, 2018	México
Caracterización y análisis de riesgo de los jales de una zona minera del estado de Durango, México	Guadarrama, 2019	México
Aplicaciones de cemento Portland mezclado con cenizas volantes y lodos de tratamiento de drenaje ácido de mina para controlar la generación de drenaje ácido de mina a partir de rocas de desecho	Sephton <i>et al.</i> , 2019	Australia
Reutilización de residuos mineros como agregados a base de cenizas volantes	Capasso <i>et al.</i> , 2019	Italia
Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento.	Bautista, <i>et al.</i> , 2017	Colombia

Durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada	Belmonte, et al., 2019	México
Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento	Huasquisto y Belizario, 2018	Perú

2.7 Legislación Ambiental

Con respecto al sistema jurídico de México, la jerarquía está constituida por: la Constitución Políticas de los Estados Unidos Mexicanos; tratados internacionales; leyes federales, leyes ordinarias, reglamento de leyes; y normas.

Las bases constitucionales de la legislación mexicana se encuentran plasmadas principalmente en los artículos 4, 27, 73, 25 y 115 (en orden de importancia). Por tanto, la Constitución Política para la protección del medio ambiente, se considera en conjunto con tres enfoques principales: la primera es proteger los recursos naturales capaces de ser apropiados, el segundo es se debe evitar y controlar la contaminación nociva y por último se debe considerar el cuidado por el medio ambiente. Algunos ordenamientos jurídicos se han estructurado en torno a estos enfoques (Soberanes y Treviño, 1997).

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

Con la publicación de la LGEEPA el 28 de enero de 1988, se inicia en México con la atención a los residuos peligrosos, esta ley regula el manejo de los materiales y residuos peligrosos para el medio ambiente, desde su generación hasta su disposición final.

Los objetivos principales de esta ley son:

- Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos y los instrumentos para su aplicación.
- La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente.
- La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas.
- El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas.
- La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).

La publicación de la LGPPGIR el 8 de octubre de 2003, de forma general plantea conceptos básicos para la sustentabilidad del manejo de residuos, por lo que dicha gestión sea lo efectiva lo más ambiental posible, económicamente viables y socialmente aceptable (Calva, 2007).

Esta ley tiene como objetivos principales:

- Proteger al ambiente.
- Prevenir la contaminación de suelos, agua y aire por el manejo de materiales y residuos, así como definir los criterios a los que se sujetara su remediación.
- Manejar los residuos peligrosos.
- Conocer la responsabilidad que tienen los productores, importadores, exportadores, comerciantes, consumidores y autoridades de los diferentes niveles de gobierno.
- Lograr una gestión integral de los residuos ambientalmente adecuada.
- Crear un sistema de información relativa a la generación y gestión integral de los residuos peligrosos.
- Prevenir la contaminación de sitios por el manejo de materiales y residuos, así como definir los criterios a los que se sujetar su remediación

Reglamento de La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RGLPGIR)

Con la publicación del reglamento de la ley general, que entró en vigor el 30 de diciembre de 2006. Este precisa los criterios para la identificación de residuos peligrosos en el artículo 35. Estos son:

- Son aquellos residuos clasificados en normas oficiales y que deriven de diferentes fuentes, procesos o productos
- Criterios de caracterización y umbrales que impliquen un riesgo al ambiente por propiedades CRETIB.

- Los derivados de la mezcla de residuos peligrosos con otros residuos; los provenientes de tratamiento, almacenamiento y disposición final, equipos y construcciones que hubiesen estado en contacto con residuos peligrosos.

Normas

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) se instrumentan con normas mexicanas como son:

Tabla 2.5 Normas Oficiales Mexicanas referentes a residuos peligrosos

CLAVE	TITULO
NOM-052-SEMARNAT-2005	Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
NOM-053-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-054-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos
NOM-055-SEMARNAT-2003	Establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados.
NOM-056-SEMARNAT-1993	Establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos
NOM-057-SEMARNAT-1993	Establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.

NOM-058-SEMARNAT-1993	Establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
NOM-141-SEMARNAT-2003	Establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales.
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.

2.8 Zona de estudio.

Ubicación

El estudio se realizó con jales provenientes de la mina La Esperanza del distrito minero de Zimapán en el estado de Hidalgo, el municipio se encuentra entre los paralelo 20°34' y 20°50' de latitud norte y los meridianos 99°11' y 99°33' de longitud oeste y tiene una altitud de 900 y 2900 msnm.

Marco Geológico.

El área de estudio (Figura 2.8) se encuentra al occidente del Cinturón de Pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental. Esta estructura continental fue formada por un evento compresivo llamado orógeno mexicano (Cretácico-Paleógeno). Este evento tectónico dio pie a grandes pliegues, cabalgaduras, fracturas y fallas como respuesta de esfuerzo compresivos y distensivos con una orientación de rumbo NW-SE. Las principales estructuras geológicas son el sinclinal El aguacate, Anticlinorio El Piñon, Anticlinal Bonanza y la Cabalgadura el Doctor (Fitz *et al.*, 2017).

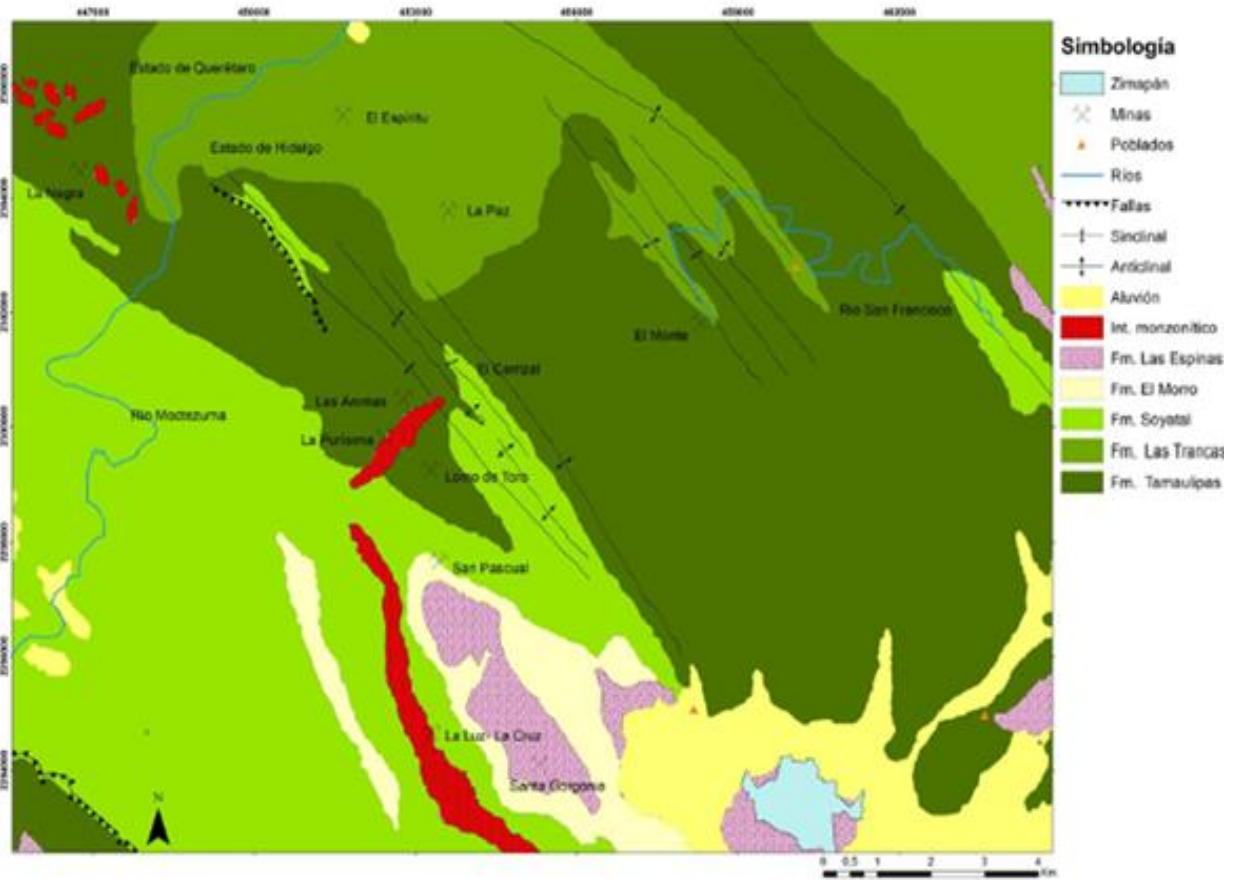


Figura 2.8 Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de Molina, 2018).

Estratigrafía

Las rocas más antiguas expuestas en esta zona pertenecen a la formación las Trancas del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, la cual está constituida principalmente por lutitas calcáreas, limolitas, calizas micríticas piritíferas (Carrasco-Velázquez *et al.*, 2009). En aparente concordancia, se superpone claramente la Formación el Doctor (Cretácico Inferior) caracterizada por facies de plataforma y la Formación Tamaulipas (Cretácico Superior) por facies de cuenca. Estas formaciones se caracterizan por capas, lentes y nódulos de pedernal negro, que en las inmediaciones de los cambios mineralizados cambia a gris claro y en ella están emplazados los yacimientos minerales y niveles de caliza masiva de grano grueso recristalizada (Carrillo *et al.*, 1982; Carrillo-Martínez, 2000; Aguilar-Ramírez *et al.*, 2017).

A la unidad anterior le sobreyace concordantemente la Formación Soyatal del Cretácico superior, esta es constituida por lutitas de color amarillo alternadas con margas y calizas micríticas negras (Carrillo *et al.*, 1982).

Las rocas del cretácico están cubiertas discordantemente por el conglomerado rojo del Grupo El Morro del Paleógeno el cual está constituido por un conglomerado fluvio-lacustre, constituido de rocas calizas, margas y rocas volcánicas de naturaleza acida a intermedias, que se encuentran dentro de una matriz de areniscas (Carrillo *et al.*, 1982). A su vez, en concordancia, le sobreyacen rocas volcánicas de La Formación las Espinas del Neógeno, esta formación alberga rocas sedimentarias y volcánicas siendo andesitas y basaltos, mientras que las tobas y aglomerados están en la base de la formación.

Toda la secuencia del mesozoico y parte del Grupo El Morro, están intrusionados por troncos y diques de composición monzonítica con textura porfídica. La mayoría de los yacimientos minerales del distrito minero de Zimapán se localizan en los contactos entre los intrusivos y las calizas de la Formación Tamaulipas (Carrillo *et al.*, 1982). La figura 2.9 muestra todas las sucesiones litológicas del área.

Era	Período	Época	Formación	Columna	Descripción		
Cenozoico	Q	Holoceno	Aluvión		Depósito de terrazas		
		Pleistoceno	Conglomerado Daxi		Depósitos de abanicos aluviales y material gresoso		
		Plioceno	Fanglomerado Zimapán		Lavas, tobas y aglomerados de andesita y basalto		
	Terciario	Neógeno	Mioceno		Las Espinas	Abanicos aluviales con clastos de caliza y material Volcánico	
			Oligoceno		El Morro		
		Eoceno					
	Mesozoico	Cretácico	Superior		Maestrichtiano	Soyatal	Margas y Lutitas calcáreas
					Campaniano		
					Santoniano		
					Coniaciano		
Turoniano							
Inferior		J	Cenomaniano	El Doctor	Calizas con bandas de pedernal Calizas con nódulos de pedernal Calizas de aspecto brechado Caliza con miliolitos Lodos calcáreos Calizas con rudistas		
			Albiano	La Negra San Joaquín Socavón Cerro Ladrón			
			Aptiano				
			Neocomiano				
			Titoniano	Las Trancas	Calizas, lutitas, grauvacas interestratificadas con lutitas, grauvacas y arcosas		
Kimmeridgiano							

Figura 2.9. Columna estratigráfica de la zona de Zimapán (Saldaña, E., 2016)

Yacimientos Minerales

El Distrito Minero de Zimapán se encuentran divididos en cuatro áreas mineralizadas: El Carrizal, La Luz-La Cruz, El Monte, San Pascual-Santa Gorgonia. La mina la Purísima se encuentra en las cercanías del intrusivo Carrizal; en este se encuentra la chimenea Las Animas. Este intrusivo es un tronco monzonítico de textura porfídica emplazado en las calizas de La Formación Tamaulipas. Las estructuras consisten mayormente en vetas, mantos depósitos de skarn y chimeneas. Las vetas son cuerpos de reemplazamiento, así como de relleno de cavidades. Los mantos son generalmente de reemplazamiento y algunos pueden contener granates. Las chimeneas son estructuras mineralizadas cuya disposición en regida por diques y fallas. (Villaseñor *et al.*, 2000).

Los principales minerales de la mena en la región están formados por Pb, Zn, Ag, Cu. La galena (PbS), meneghinita ($Pb_{13}CuSb_7S_{24}$), jamesonita ($Pb_4FeSb_6S_{14}$), zinkenita ($Pb_9Sb_{22}S_{42}$), argentita (Ag_2S), pirargirita (Ag_3SbS_3), esfalerita (ZnS), bornita (Cu_5FeS_4), calcopirita ($CuFeS_2$), tenantita ($Cu_6[Cu_4(Fe,Zn)_2]Sb_4S_{13}$), tetraedrita ($Cu_6[Cu_4(Fe,Zn)_2]As_4S_{13}$), Anglesita ($PbSO_4$), cerusita ($PbCO_3$), plumbojarosita ($PbFe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$), vanadita ($Pb_5(VO_4)_3Cl$), wulfenita ($Pb(MoO_4)$), argentojarosita ($AgFe_3(SO_4)_2(OH)_6$), adamita ($ZnAsO_4$), auricalcita ($(Zn.Cu)_5(CO_3)_2(OH)_6$), smithsonita (Zn), azurita ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$), calcantita ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), calcocita (Cu_2S), malaquita ($Cu_2(CO_3)(OH)_2$) (de Cu), pirita (FeS_2), pirrotita ($Fe_{1-x}S$), arsenopirita ($FeAsS$), calcita ($CaCO_3$) y diversos silicatos entre ellos cuarzo (SiO_2) (Carrillo-Martínez, 2000; Villaseñor *et al.*, 1996).

Problemática ambiental en el valle de Zimapán.

Desde el siglo XVI, la minería ha jugado un papel económico importante en la zona de Zimapán, México. Ya que esta zona es abundante en minerales como el zinc, plata, vanadio, plomo y el fosfato, lo que convierte a la industria minera en una importante fuente de empleo para las personas. Por ende, esta actividad económica ha puesto en peligro a la población, ya que diversos estudios, mencionan altas concentraciones de As tanto en agua como en suelos. (Armienta *et al.*, 1997; Labastida *et al.*, 2013). Esto es causado principalmente por la oxidación y disolución de minerales que contienen arsénico y en menor medida también es propiciado por el lixiviado de los jales mineros. Además, se ha estudiado que durante la temporada de lluvias, el drenaje ácido de estos jales fluye a través de las laderas y desemboca en el río Tolimán (Espinosa *et al.*, 2009).

Como resultado de este proceso, los pozos cercanos poco profundos que los lugareños utilizan para riego se han contaminado con arsénico (Armienta *et al.*, 2003).

Para disminuir los efectos de los relaves, se deben desarrollar alternativas de mitigación a la luz de los efectos ambientales que se han observado (Labastida *et al.*, 2013).

Capítulo 3 Metodología

El desarrollo del presente trabajo se inició con la investigación de información específica para el establecimiento de la metodología, al no haber una normatividad nacional relacionado con las pruebas de laboratorio para la metodología, se optó por el uso de normas extranjeras, así como la búsqueda de tratamientos relacionados con jales mineros y cenizas volantes, siendo la E/S la más viable para este tipo de residuos; aunado a esto se procedió a la selección de un diseño estadístico de experimentos para la evaluación de resultados y obtención de las conclusiones con respecto a los objetivos planteados. Por otro lado, se realizaron las gestiones correspondientes para la obtención de ambos residuos a valorar.

En la figura 3.1 se describe gráficamente la metodología propuesta en este trabajo

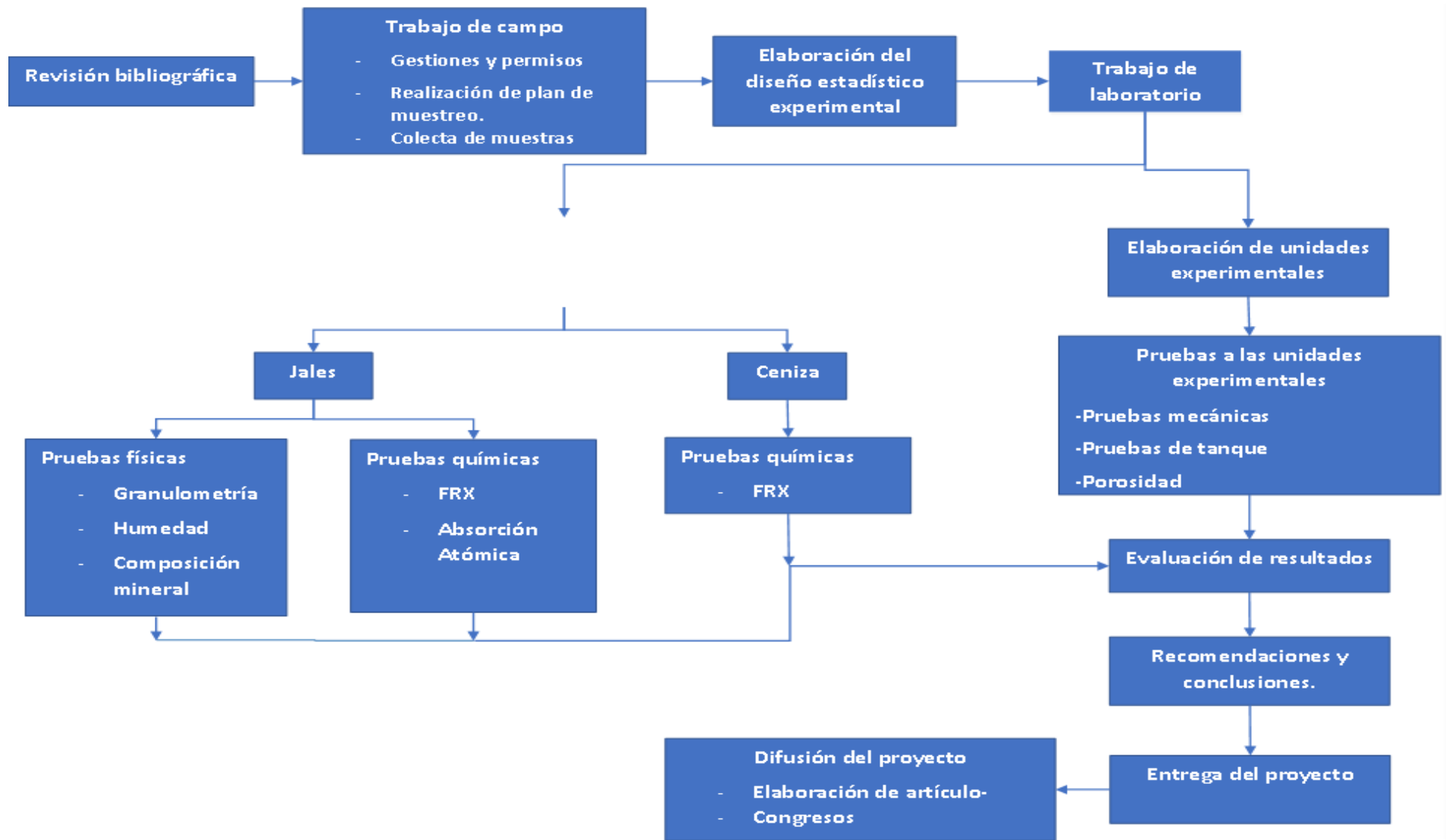


Figura 3.1 Diagrama de metodología general del proyecto de investigación.

3.1 Muestreo

Las muestras de los residuos mineros fueron tomadas de una presa de jales del distrito minero de Zimapán en el estado de Hidalgo, el 25 de enero del 2022. El método de muestreo se definió de una forma estratificada, con respecto a los diferentes niveles que tenía la presa, se identificaron tres niveles, mismos que fueron recomendados por los responsables de la mina.

Asimismo, la toma de muestras se hizo bajo los criterios de la **NMX-AA-132-SCFI-2006**, “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides y manejo de la muestra”, debido a que no hay normas para el muestro de jales y estos se consideran como suelo por sus propiedades físicas (granulometría, color, humedad, etc.).

La ubicación de los puntos de muestreo se registró con un GPS de marca Garmin. Para cada punto, se recolectaron un peso promedio de 4 kilogramos de jal que se colocaron dentro de bolsas de polietileno. Además, se consideró una profundidad de 10 cm con el fin de recolectar el material menos alterado, así mismo se le midió a cada muestra el pH in situ utilizando papel tornasol.

En la tabla 3.1 se observan los datos generales que se consideraron al momento de realizar el muestreo.

Tabla 3.1 Puntos de muestreo y altitud.

Número de Muestra	Metros Sobre el Nivel del Mar
1	1736
2	1736
3	1732
4	1723
5	1722
6	1723
7	1724
8	1748
9	1732
10	1764

En la figura 3.2 se presenta la ubicación geográfica de los puntos muestreados. Así mismo se aprecia que todas las muestras fueron recolectadas en la sección noroeste de la presa de jal, esto es debido al difícil acceso provocado por las características del terreno y de la humedad del material.

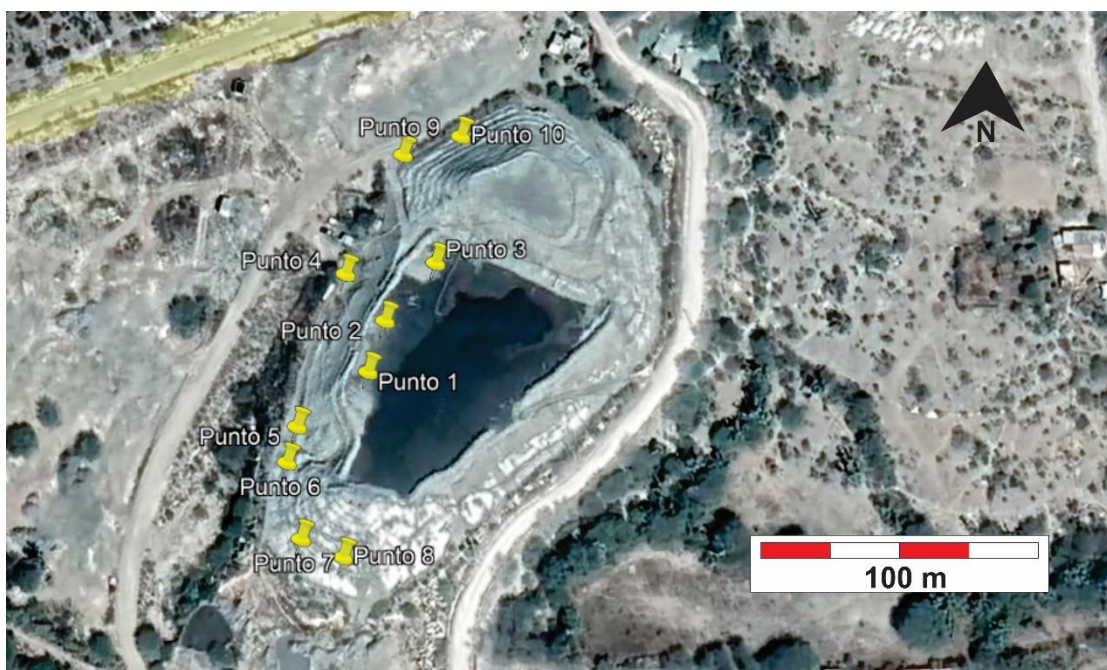


Figura 3.2 La ubicación geográfica de los puntos muestreados.

3.2 Caracterización de las muestras de jal

Para el caso de la caracterización de las muestras se procedió a la determinación de ciertos parámetros físicos apegándose a normas nacionales e internacionales, mientras que para los parámetros químicos únicamente se analizaron As y Pb, por ser los elementos tóxicos más abundantes en la zona, debido a su composición mineralógica.

3.2.1 Caracterización física

Para la caracterización física de las muestras se realizaron las determinaciones de: Humedad, granulometría (tamices y microscopio electrónico de barrido) y composición mineral (espectroscopia Infrarroja).

3.2.1.1 Determinación de Humedad

La determinación se hizo en laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de UNAM y con respecto a la norma europea **UNE-EN ISO 17892-1** 2015 Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Para esta prueba se pesaron 30 g de muestra de jal en un crisol de porcelana que fue previamente a peso constante. La muestra se secó en una estufa durante 24 horas y a una temperatura arriba de los 105 ° C y posteriormente se enfrió dentro de un desecador y por último se registró el nuevo peso.

3.2.1.2 Granulometría

Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Paleontología y Sedimentología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Para la granulometría se utilizó la norma europea **UNE-EN 933-1:2012** Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Para esto se pesaron 500 g de muestra que se hicieron pasar a través de diferentes tamices (malla no. 20, 30, 60, 70, 80, 120, 140, 200, 230, 270, 325). Esta fue tamizada durante 10 minutos por una tamizadora marca Tyler modelo RX-29 (Figura 3.3). Para determinar los porcentajes por intervalos de tamaño de partícula se registraron los pesos retenidos en cada uno de los tamices.



Figura 3.3 Tamizadora Tyler modelo RX-29 y tamices.

3.2.1.3 Espectroscopía Infrarroja (FTIR, por sus siglas en inglés).

El análisis se realizó en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental Molecular del Instituto de Geología de la UNAM con un espectrófotometro FTIR marca Thermo Scientific Nicolet iS10 utilizando un accesorio GladiATR con un cristal de diamante consiferenado todo el intervalo del infrarrojo medio ($400- 4000 \text{ cm}^{-1}$). La lectura de las muestras fue a 64 escaneos con una resolución de 4 cm^{-1} aplicando un fondo al inicio de cada análisis. Todas las muestras se analizaron en presencia de nitrógeno para asegurar la ausencia de humedad y CO_2 .

3.2.1.4 Microscopía electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés).

EL análisis se llevó acabo en el Laboratorio de Microscopia Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Con el propósito de observar el tamaño de partícula, se utilizó el microscopio electrónico de barrido marca Phillips modelo XL20 a 20 kV de potencia con un spot de 4 mm y detectores BSE (electrones electrodispersados)(Figura 3.4).

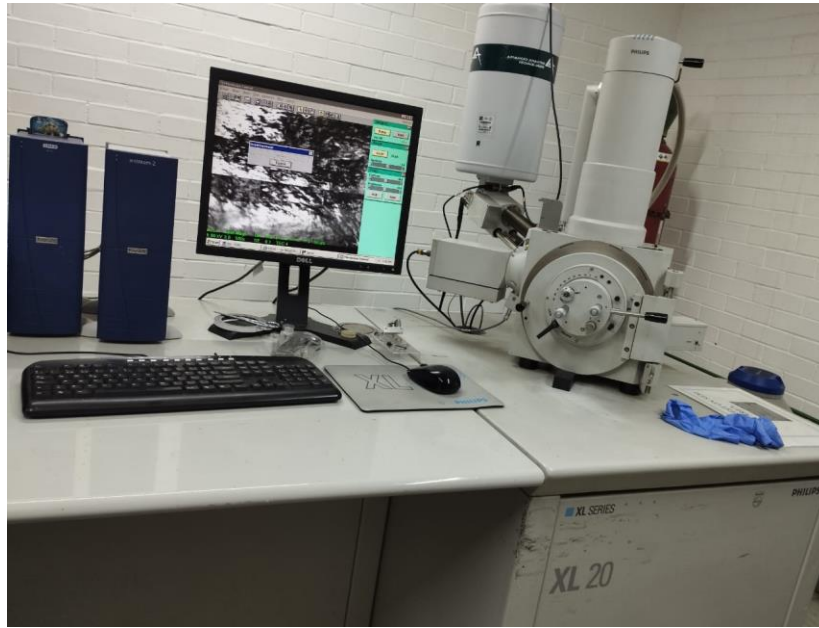


Figura 3.4 Microscopio Phillips modelo XL20

3.2.2 Caracterización Química.

Determinación de As y Pb.

3.2.2.1 Fluorescencia de Rayos X

La técnica de fluorescencia de rayos X es empleada en la cuantificación de elementos mayoritarios en muestras sólidas. Al ser los jales sólidos se aplica la técnica con facilidad y se pueden establecer diferentes rangos para medir elementos como el As y el Pb en las muestras de jal y con ello facilitar el análisis multielemental.

Con esta técnica se cuantificaron los elementos mayores dentro de las muestras de jales. Para esto se utilizó un espectrómetro Rigaku modelo ZSX Primus II para un análisis semicuantitativo con el software ezscan de Rigaku en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología de la UNAM.

3.2.2.2 Absorción atómica

La cuantificación de elementos potencialmente tóxicos (EPT) se llevó a cabo considerando la técnica de absorción atómica con el dispositivo de llama, ésta se realizó de acuerdo con

las normas **USEPA 700B** (Espectrofotometría de absorción atómica con llama) y **USEPA 7061** (As: Absorción Atómica, Hidruro Gaseoso), para la cuantificación de Pb y As respectivamente y haciendo uso de un espectrofotómetro de absorción atómica marca GBS modelo Avanta con dispositivo de flama para plomo y el generador de hidruros para el arsénico ubicado en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de UNAM (Figura 3.5).



Figura 3.5 Espectrofotómetro de absorción atómica marca GBS modelo Avanta.

En la tabla 3.2, se presenta un resumen de las determinaciones, equipos y métodos utilizados para la caracterización de los jales.

Tabla 3.2 Equipos y métodos utilizados para la caracterización de los jales utilizados en esta investigación

Determinaciones	Equipo	Métodos
Físicas		
Humedad	Horno	UNE-EN ISO 17892-1
Granulometría	-Tamizadora Tyler modelo RX-29 -Microscopio electrónico de barrido marca phillips modelo XL20.	UNE-EN 933-1 Manual del equipo
Mineralogía	-Microscopio electrónico de barrido marca Phillips modelo XL20. -Espectrómetro FTIR marca Thermo Scientific Nicolet iS10 utilizando un accesorio GladiATR con un cristal de diamante.	-Manual del equipo -Manual del equipo
Químicas		
Determinación de As y Pb	-Espectrofotómetro de absorción atómica marca GBS modelo Avanta. -Fluorescencia de rayos x con equipo Rigaku Primus II	USEPA 700B y USEPA 7061 -Manual del equipo.

3.3 Caracterización de las cenizas volantes

Con el fin de categorizar las cenizas con respecto a la norma **ASTM-C0618-08** –(Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural en Crudo o Calcinada para Uso en Concreto) y determinar la composición química de las cenizas volantes producidas a partir de distintos tipos de carbón (Ahmaruzzaman, 2010), se realizó un estudio de elementos mayores. Este se llevó a cabo por el método de análisis de elementos mayoritarios en muestra fundida por fluorescencia de rayos x con equipo Rigaku Primus II y análisis semicuantitativo con el software ezscan de Rigaku en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología de la UNAM.

3.4 Diseño del experimento

El diseño estadístico del experimento seleccionado para esta investigación fue un factorial 2x2x3 completamente al azar de factores fijos (proporción de jal y contenido de ceniza volante), ya que se busca evaluar el mejor tratamiento para aplicar a los jales y someterlos a pruebas de compresión así como también a análisis de elementos potencialmente tóxicos (EPT), específicamente Pb y As.

3.4.1 Definición de la unidad experimental

Una unidad experimental es la unidad mínima a la que se le aplica un tratamiento de forma independiente, en este caso la unidad experimental son especímenes compuestos de jal y ceniza volante que fueron solidificados para someterlos a diferentes pruebas. (Maxwell *et al.*, 2018).

El total de unidades se determinó a partir del número de repeticiones por cada variable de respuesta (Resistencia a la compresión, concentración de EPT (As y Pb) presentes en el lixiviado a partir de la prueba de tanque y porosidad). Al mismo tiempo se tomaron en cuenta 2 niveles para cada factor. El primer factor fue la proporción de cal-jal (1:1, 1:3 respectivamente, esta proporción se mantiene constante en las mezclas). El segundo factor

es el contenido de ceniza (con ceniza y sin ceniza), resultando cuatro tratamientos diferentes en total. Esto da lugar a que los cuatro tratamientos sean por triplicado y por las tres variables de respuesta da un total de 36 unidades. En la tabla 3.3 se aprecian los factores y niveles

3.4.2 Definición de las variables de respuesta

Las variables de respuesta establecidas para esta experimentación son:

- Resistencia a la compresión
- Concentración de EPT (As y Pb) en el lixiviado de la prueba de tanque.
- Porosidad

3.4.3 Definición de factores y niveles

En los factores y niveles del experimento, se definieron tres factores fijos: la proporción de jal con dos niveles, el contenido de ceniza con 2 niveles, la estratificación del jal con 3 niveles. En la tabla 3.3 se muestran los tratamientos y factores con sus niveles.

Tabla 3.3 tratamientos y factores.

Factor	Nombre del factor	Niveles
1	Proporción de jal	Misma cantidad de jal y cal (1:1)
		Una cantidad de cal y tres cantidades de jal (1:3)
2	Contenido de ceniza	Con ceniza
		Sin ceniza
3	Estratificación	Parte superior
		Parte intermedia
		Base

3.4.4 Diseño experimental.

En este apartado se explica el modelo seleccionado para este trabajo, el cual es un experimento 2x2x3 de efectos fijos completamente al azar y dos variables de respuesta.

El modelo estadístico es (Berger *et al.*, 2002):

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl}$$

Y_{ijk} : Es cualquier de las 2 variables de respuesta resultante para el espécimen

μ : Media general, común a todas las unidades experimentales

τ_i : Efecto del nivel i del factor masa de jal

β_j : Efecto del nivel j del factor ceniza

γ_k : Efecto del nivel k del factor tipo de jal

$(\tau\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción del nivel i del factor masa y del nivel j del factor ceniza

$(\tau\gamma)_{ik}$: Efecto de la interacción del nivel i del factor masa y del nivel k del factor posición de jal

$(\beta\gamma)_{jk}$: Efecto de la interacción del nivel j de factor ceniza y del nivel k del factor posición de jal

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$: Efecto de la interacción del nivel i del factor masa, nivel j del factor ceniza y de del nivel k del factor posición de jal

ϵ_{ijkl} : Error experimental

$i=1,2$

$j=1,2$

$k=1,2,3$

$l=1,2,3$

Las hipótesis por probar son:

$H_{01}: \tau_1 = \tau_2 = 0 \rightarrow$ No hay efecto del factor masa de jal

$H_{02}: \beta_1 = \beta_2 = 0 \rightarrow$ No hay efecto del factor ceniza

$H_{03}: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0 \rightarrow$ No hay efecto de factor posición del jal

$H_0: (\tau\beta\gamma)_{111} = \dots = (\tau\beta\gamma)_{223} = 0 \rightarrow$ No hay efecto entre los factores

3.5 Elaboración de mezclas

Para la elaboración de los especímenes, se propuso el uso de tres mezclas compuestas conformadas a partir de las diez muestras colectadas en campo. Las mezclas propuestas corresponden a la base (muestra 7,9 y 10), parte media (muestra 4, 5 y 6) y superior (muestra 1, 2 y 3) de la presa de jales (figura 3.6).

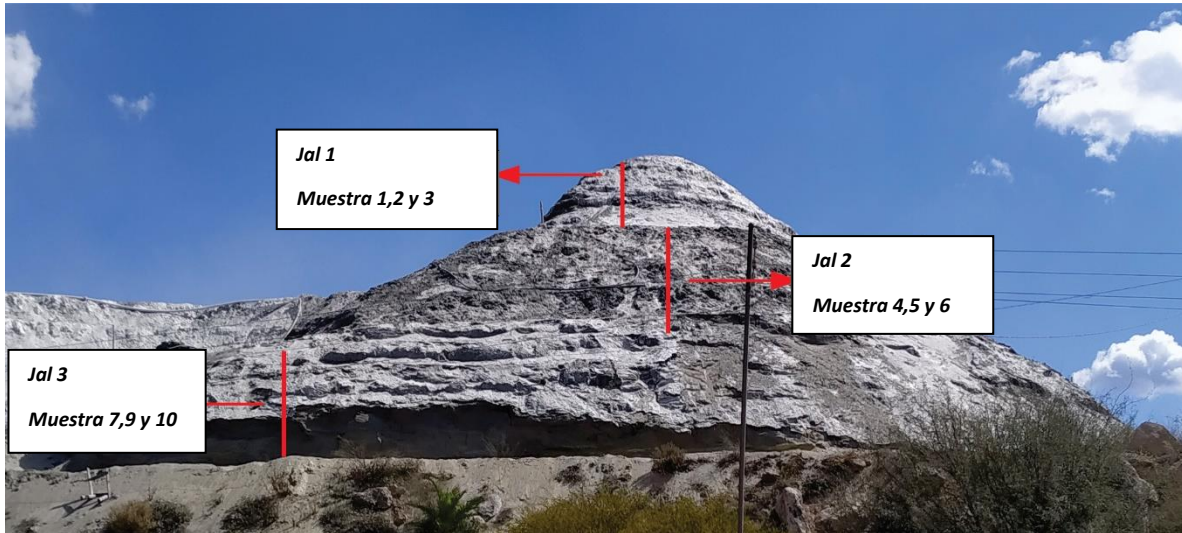


Figura 3.6. Presa de jales muestreada.

Con respecto al porcentaje de ceniza volante que se utilizó para las mezclas, la literatura menciona que se puede considerar del 15% hasta el 40% de ceniza en la sustitución de cemento (Ahmaruzzaman, 2010). Para este trabajo se sustituyó un 20% de ceniza con respecto a la utilización de Cal.

En la tabla 3.4, se muestra la composición de los tratamientos en cuando a la cantidad de jal, cal y ceniza.

Tabla 3.4 Cantidad en gramos utilizada en cada tratamiento

Tratamiento	Jal(g)	Cal(g)	Ceniza(g)	Total(g)
3:1 con ceniza	600	200	40	840
3:1 sin ceniza	600	200	-	800
1:1 con ceniza	400	400	80	880
1:1 sin ceniza	400	400	-	800

3.6 Elaboración de especímenes

La elaboración de las unidades experimentales se efectuó en el Laboratorio de Materiales, en la Facultad de Ingeniería, División de Ingenierías Civil y Geomática del Departamento de Estructuras y bajo la norma mexicana **NMX C159 ONNCE-2016** (Industria de la construcción-concreto-elaboración y curado de especímenes de ensayo).

Las mezclas se homogenizaron con un mezclador mecánico marca Hobart (Figura 3.7 a), esta operación se llevó a cabo durante dos minutos y medio hasta completar el mezclado. Al terminar la elaboración de la mezcla y para que la fluidez fuera constante en todas ellas, se utilizó una mesa de fluidez (figura 3.7 b) para que los agregados tuvieran un diámetro final de 15 a 17 cm, una vez que se remueve el cono trunco.



Figura 3.7 a) Mezcladora marca Hobart; b) Mesa de fluidez con platillo de bronce y cono trunco.

Cabe mencionar que el procedimiento que se lleva a cabo en la mesa de fluidez consiste en colocar la mezcla en el centro del platillo de bronce y el cono trunco previamente llenado con el aglomerado y, para la eliminación de burbujas, se introdujo una varilla de acero inoxidable 20 veces consecutivas y después se enrazó. El cono se retiró de forma vertical y

se hicieron 20 golpes mediante la manivela y posteriormente se midió con un flexómetro, para que el diámetro final estuviera dentro de los rangos antes mencionados.

Posteriormente se llenaron tubos de PVC con una altura de 5 cm y un diámetro de 2.5 cm, y después se llevaron a la cámara de curado (figura 3.8). El descimbrado de las unidades experimentales se llevó 24 horas después de su elaboración. Y finalmente se dejó en la cámara durante 28 días a una temperatura constante de 25 °C.



Figura 3.8 Cámara de curado

3.7. Prueba de compresión simple.

Las pruebas de compresión se llevaron a cabo en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas en la División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, utilizando una prensa mecánica de la marca Shimadzu (Figura 3.9) con una capacidad de 5000 kg. Los ensayos de compresión se realizaron conforme a la norma **ASTM C39** “Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto”.

Además, acorde a la norma anteriormente mencionada, las unidades experimentales se hicieron con dimensiones 2:1 (altura: diámetro).

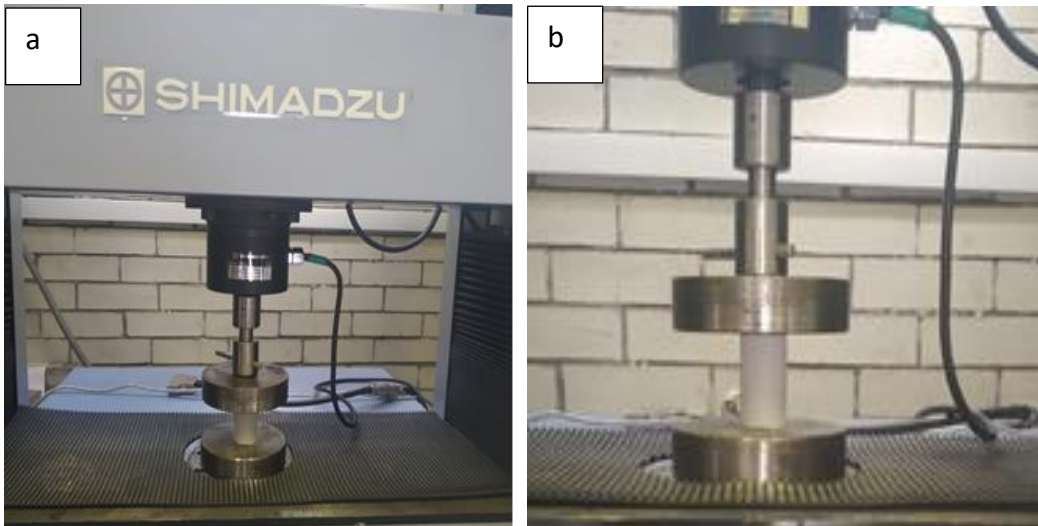


Figura 3.9 a) Prensa mecánica marca Shimadzu; b) puesta del espécimen bajo el cabezal.

3.8 Prueba de tanque.

El ensayo se realizó en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de UNAM. Las unidades experimentales se sometieron a la prueba de tanque como dicta la norma **EA NEN 7375:2004** Características de lixiviación de materiales de construcción y de desecho moldeados o monolíticos, la que consiste en colocar los especímenes en recipientes de metacrilato (10x10x10 cm, figura 3.10) a los cuales se les agregó un litro de agua destilada, esto con el propósito de verificar la disolución de los EPT (As y Pb) en el medio acuoso. Esta prueba tuvo una duración de 64 días, durante los cuales se realizaron lavados de la muestra- y posteriormente se drena, esto se repite con cada lavado. en 8 ocasiones a los (0.25, 1, 2.25, 9, 16, 36 y 64 días. En cada muestreo se midió pH y conductividad, posteriormente se tomaron 15 ml de muestra las cuales se filtraron con una membrana de Nylon con un tamaño de poro de 0.45 micras, se agregó HNO₃ para su posterior análisis



Figura 3.10 especímenes en prueba de tanque

3.9 Prueba de porosimetría

La prueba se realizó en el laboratorio de Rocas Fracturadas del Departamento de Ingeniería Petrolera, Facultad de Ingeniería, UNAM. Las unidades experimentales se colocaron dentro de vasos de precipitados y se llenaron con 200 ml de agua destilada (Figura 3.11 a). Posteriormente los vasos con las unidades se metieron a una cámara de vacío (Figura 3.11 b), para que los especímenes pudieran tener una óptima absorción del agua.

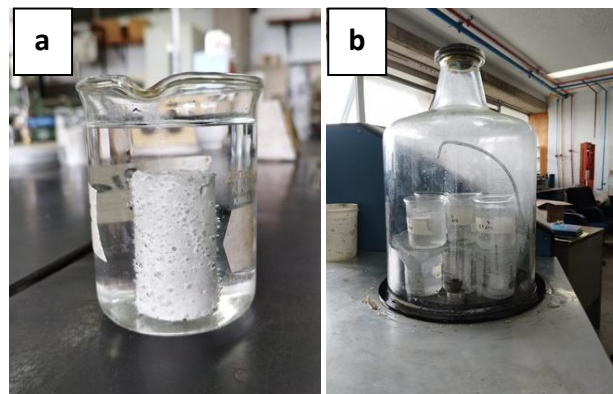


Figura 3.11. a) Especímen dentro de vaso de precipitado con agua destilada; b) Especímenes sometido a cámara de vacío

En la tabla 3.5, se presenta un resumen de las normas utilizadas en este capítulo.

Tabla 3.5 Normas de metodologías utilizadas

Norma	Título
NMX C159 ONNCE-2016.	Industria de la construcción-concreto-elaboración y curado de especímenes de ensayo
EA NEN 7375	Características de la lixiviación - determinación de la lixiviación de componentes inorgánicos a partir de materiales moldeados o monolíticos con ensayo de difusión - materiales sólidos
ASTM C39	Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto

Capítulo 4. Resultados y su evaluación.

En este capítulo se presenta la caracterización de los jales y de las cenizas volantes, utilizando los métodos físicos y químicos descritos con antelación, así como también los resultados de los tratamientos a los que se sometieron los especímenes para la evaluación de la E/S.

4.1 Caracterización de los jales

Inicialmente se llevó a cabo la caracterización de los jales, con el fin de conocer la composición física y química de estos residuos, así como su toxicidad y su compatibilidad para el tratamiento de E/S utilizando un mortero de cal.

4.1.1 Determinación de humedad y pH

La prueba de humedad señala que los jales tienen un porcentaje de agua importante, lo cual indica que, en condiciones ambientales, su capacidad de retener líquido es considerable. Los resultados de esta determinación se encuentran en la tabla 4.1. En cuanto a la influencia de porcentaje de humedad que presenta cada una de las muestras están muy dispersos, ya que van desde 1.7 hasta 18.5 % de humedad. Se supondría que las muestras en la base de la presa estarían con mayor porcentaje de líquido, ya que reciben mayor escurrimiento, y las que se tomaron en la parte superior se esperaría que tendrían menor humedad por las condiciones meteorológicas del sitio (baja precipitación pluvial, con clima variable de semiseco cálido a semiseco templado, INEGI 2017). Sin embargo, los resultados muestran que la disposición en la presa de jales no es aparentemente metódica.

En la tabla 4.1 se puede observar que la mayoría de las muestras tienen un pH de seis, a excepción de la muestra tres que tiene una naturaleza alcalina y la uno que tiene un pH ácido, así como la nueve con pH neutro. Paradójicamente la muestra uno y tres son de la parte superior de la presa de jales, de la muestra cuatro a la siete fueron tomadas de la

parte intermedia y de la muestra ocho a la diez fueron de la base de la presa de jal. Esto demuestra que dicha presa no tiene una acidez homogénea probablemente causado por el proceso de extracción de los elementos de interés de la mina y también puede deberse a la naturaleza de la mena. Los valores de acidez y alcalinidad influirán definitivamente en el proceso de E/S debido a las reacciones de neutralización que se llevan a cabo en presencia de la cal.

Es importante considerar los resultados de pH y porcentaje de humedad ya que se tomarán posteriormente para evaluar los resultados de las pruebas físicas y químicas de las especies elaborados con este residuo.

Tabla 4.1 Resultados de la determinación de humedad y pH para cada una de las diez muestras (Datos obtenido de -González et al., 2022).

Muestra	% de humedad	pH
1	6.6	4
2	11.6	6
3	18.5	8
4	8.1	6
5	13.8	6
6	3.0	6
7	1.7	6
8	3.1	6
9	8.7	7
10	11.8	6

4.1.2 Granulometría y SEM

Los resultados de la medición de granulometría por la técnica de tamizado mecánico se muestran en la figura 4.1 en donde se observa que el 90 % del tamaño de partículas pertenecen arenas finas y limos.

En la figura 4.1 se presenta la granulometría de los diferentes puntos de muestreo. Como se puede observar, el tamaño de partícula mayoritariamente se encuentra entre 0.08 y 0.6 mm. La apertura mínima en la técnica de tamizado por el método mecánico fue de 37 micras. Los jales se pueden clasificar de forma general en un rango de arenas finas a limos, Basándose en un intervalo de tamaños de partículas y en el Sistema de Clasificación de Suelos Unificado (USCS; ASTM, 2020).

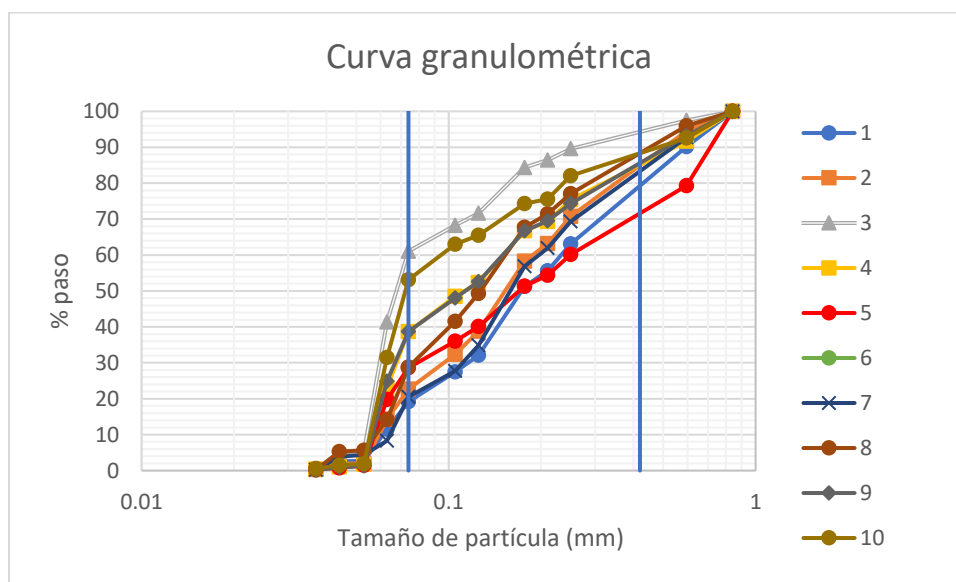


Figura 4.1 Granulometría de diferentes puntos de muestreo (Datos obtenidos de -González et al., 2022).

Además, las fotos del microscopio electrónico de barrido muestran que hay partículas menores a los 10 μm . En la figura 4.2 se ejemplifica que las partículas de esta granulometría tienen las características de ser una fracción respirable o inhalable (OMS, 2021), lo cual puede representar un riesgo para la salud de la población aledaña en función de la dirección de viento (González et al., 2023).

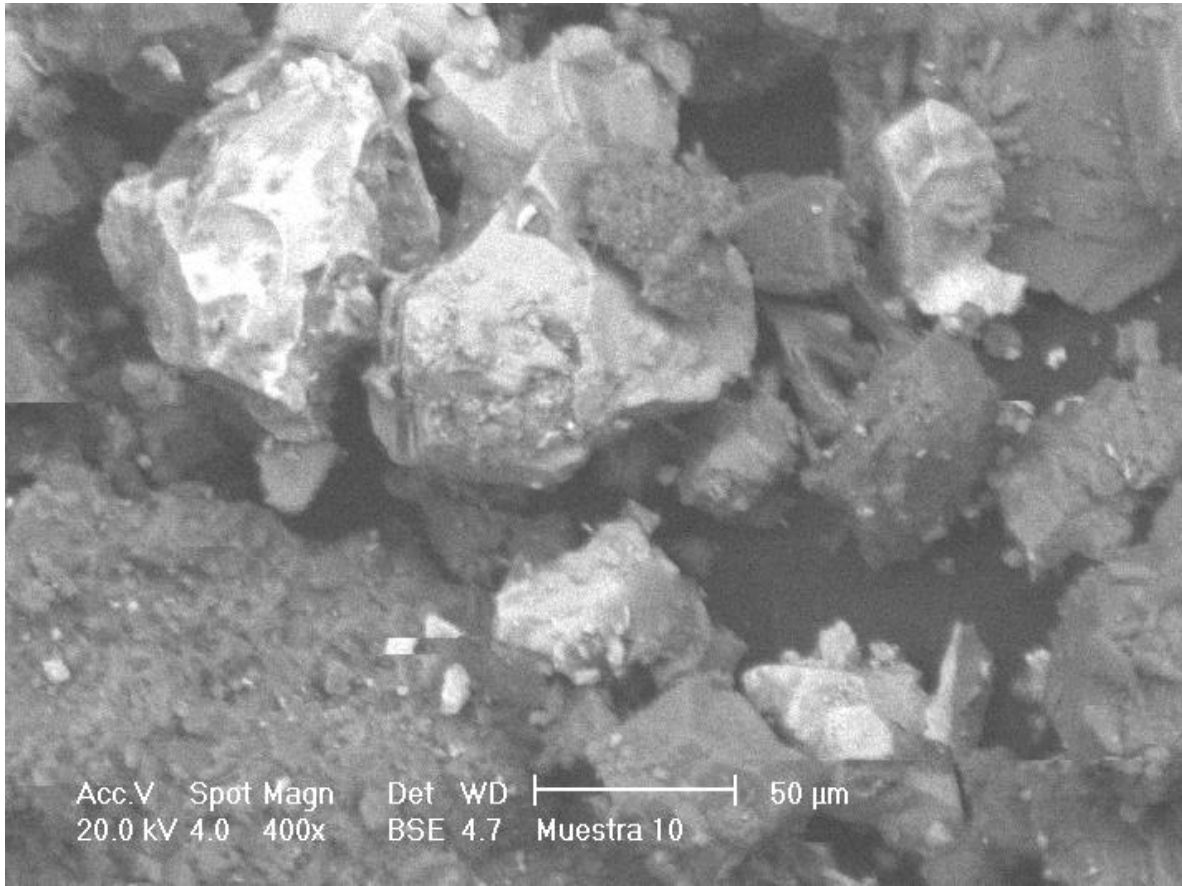


Figura 4.2 Imagen por microscopio electrónico de barrido de la muestra 10.

4.1.3 Espectroscopía Infrarroja (FTIR, por sus siglas en inglés).

La medición de grupos cristalográficos se hizo en paralelo para las diez muestras de jal. Analizando el espectro muestra que aparecen silicatos, carbonatos y arseniatos. Así mismo la espectroscopia infrarroja (Tabla 4.2) revela la presencia de plagioclasas ricas en sodio (oligoclasa, albita y andesina) lo cual indica que la roca de extracción es de una naturaleza de intermedia a ácida. Al mismo tiempo se tienen feldespatos ricos en potasio (Ortoclasa y Microclina) que sugieren un material ígneo de composición granítica.

La adamita y Berzeliita probablemente tienen un origen de yacimientos hidrotermales (Carrillo-Martínez, 2000; Villaseñor *et al.*, 1996) Los carbonatos presentes en la muestra pertenecen a la formación de El Doctor (Carrillo-Martínez, 2000; Villaseñor *et al.*, 1996)

Tabla 4 2 Resultados obtenidos por los análisis del FTIR (por sus siglas en inglés) (Datos obtenido de -González *et al.*, 2022).

Jales	Grupos funcionales	Silicatos		Carbonatos	Arseniatos
		Olivinos Nombre (Formula)	Feldespatos Nombre (Formula)	Nombre (Formula)	Nombre (Formula)
1	Si ₃ O ₈ ⁴⁻ y CO ₃ ²⁻	-	Ortoclasa	Smithsonita	
2			(KAlSi ₃ O ₈)	(ZnCO ₃)	
3			Microclina	Calcita	
4			(KAlSi ₃ O ₈)	(CaCO ₃)	
5			Oligoclasa	Magnesita	
7			(Ca _{0.1-}	(MgCO ₃) y	
8			_{0.3} Na _{0.7-0.9}	Gaylussita	
9			AlSi ₃ O ₈) y	(Na ₂ Ca	
10			Andesina	(CO ₃) ₂ 5	
			(Ca _{0.3-}	H ₂ O)	
	_{0.5} Na _{0.5-0.7}				
	AlSi ₃ O ₈)				
6	SiO ₄ ³⁻ y AsO ₄ ³⁻	Andradita (Ca ₃ Fe ₂ (SiO ₄) ₃)			Adamita(Zn ₂ (AsO ₄)(OH)) Berzeliita ((Ca;Na) ₃ (Mg;Mn) ₂ (AsO ₄) ₃)

4.1.4 Determinación de As y Pb

Las muestras compuestas de los jales se analizaron por medio de los métodos de fluorescencia de rayos X y espectrofotometría de absorción atómica, los elementos

detectados fueron arsénico y plomo, hubo otros elementos (Ag, Ba, Pb, Cu, As, Cd, Hg, Cr, Ni) que estuvieron fuera de los límites de detección del equipo.

Considerando la NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004, dichos elementos están arriba de los límites máximos permisibles. El As (22 mg/kg uso agrícola; 260 mg/kg) y el Pb (400 mg/kg para uso agrícola y 800 mg/kg para uso industrial). En la tabla 4.3 se muestran los resultados y en la figura 4.3 se presentan las gráficas solo para el método de absorción atómica para mayor visualización.

Tabla 4.3 Concentraciones de arsénico y plomo.

Muestras compuestas	Método de FRX As(mg/kg)	Método de Absorción atómica As(mg/kg)	Método de FRX Pb(mg/kg)	Método de Absorción atómica Pb(mg/kg)
1	2980	29.80	2020	2928.98
2	15760	249.89	6180	5200.34
3	20860	244.26	6390	3414.9

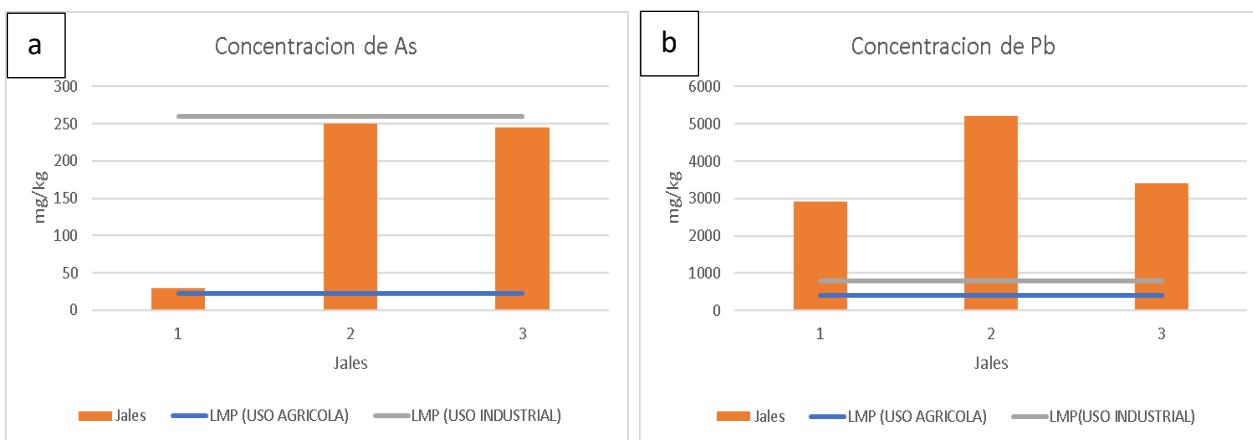


Figura 4.3 a) Grafica de concentración de arsénico; b) Grafica de concentración de plomo.

En las gráficas anteriores se muestra el caso para As, en donde las mezclas de jal 2 y 3 se encuentran sobre el LMP para uso industrial, así mismo todas las mezclas de jales rebasan los LMP para uso agrícola establecida por la normativa mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004). Con respecto a las concentraciones de plomo, todas las mezclas de jales superan los LMP tanto para uso agrícola como para industrial.

4.2 Caracterización de las cenizas volantes.

La caracterización de la ceniza se llevó a cabo para clasificarla tal como lo marca la ASTM C 618 para la ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada con fines de uso en concreto y determinar a partir de la composición química el tipo de carbón de donde proviene la ceniza volante (Ahmaruzzaman, 2010). Con respecto a la tabla 4.4, se observa que los elementos para determinar el tipo de carbón de procedencia de la ceniza es de un carbón tipo bituminoso a sub-bituminoso, ya que la muestra analizada tiene más de un 60% de sílice (SiO_2) de su composición total, además se observa que la mayoría de los componentes caen dentro de la clasificación de bituminoso y sub-bituminoso, a excepción Fe_2O_3 , este óxido no entra dentro de los rangos de carbón sub-bituminoso.

Tabla 4.4 Comparación de la ceniza analizada vs la composición química de las cenizas volantes producidas a partir de distintos tipos de carbón (Ahmaruzzaman, 2010).

Componente (%)	Ceniza analizada	Bituminosos	Sub-bituminoso	Lignito
SiO_2	60.39	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	23.88	5-35	20-30	10-25
Fe_2O_3	5.90	10-40	4-10	4-15
CaO	4.53	1-12	5-30	15-40
MgO	1.09	0-5	1-6	3-10
SO_3	0.68	0-4	0-2	0-10
Na_2O	0.32	0-4	0-2	0-6
K_2O	1.54	0-3	0-4	0-4
LOI	1.42	0-15	0-3	0-5

En la tabla 4.5 se hace una comparativa de los intervalos de componentes para su clasificación como lo determina la norma ASTM C 618. De acuerdo con los criterios de la norma se determinó que la ceniza estudiada pertenece a una clase F, ya que la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ es mayor al 70 % de su composición total. Además, se pueda apreciar en los otros componentes y pérdida a la incineración, que está dentro de los intervalos establecido.

Tabla 4.5-Especificaciones para las cenizas según la Norma ASTM C 618

Componente	Ceniza analizada	Clase C	Clase F
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	90.17	>50	>70
CaO	4.53	>10	<10
SO_3	0.68	<5	<5
álcalis (Na_2O)	0.32	<1.5	<1.5
Pérdida a la incineración (LOI)	1.42	<6	<6

4.3 Prueba de compresión simple

Los resultados de la prueba de compresión simple se analizaron mediante el ANOVA empleando el software R studio y se presenta en la tabla 4.6. Se puede apreciar que el valor de p-value para la interacción Jal-mezcla-ceniza es de 0.062031, y considerando un 5 % de significancia no se rechaza la hipótesis nula, esto significa que no existe interacción entre los factores de los materiales utilizados. Además, el factor Jal-mezcla y Jal-ceniza tienen un valor de p value mayor que 0.05 por lo que entre estos factores no hay relación entre la media. Asimismo, se observa que los factores mezcla-ceniza tiene un valor de 0.001115 por lo que se rechaza la hipótesis de que entre todas las medias no hay diferencias, con un 5% de significancia, por lo tanto, si hay variación entre los tipos de mezcla y presencia de ceniza. Para saber qué diferencia existen se utilizó la prueba de Tukey.

Tabla 4.6 Resultados de ANOVA de interacción entre Jal, Mezcla y ceniza para la prueba de compresión simple

Factores	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Jal	2	6.2932	3.1466	24.8747	1.411x10 ⁻⁰⁶
Mezcla	1	21.3136	21.3136	168.4907	2.418 x10 ⁻¹²
Ceniza	1	0.1907	0.1907	1.5074	0.231447
Jal:Mezcla	2	0.1633	0.0816	0.6454	0.533336
Jal:Ceniza	2	0.2751	0.1375	1.0873	0.353173
Mezcla:Ceniza	1	1.7336	1.7336	13.7047	0.001115
Jal:Mezcla:Ceniza	2	0.7915	0.3958	3.1285	0.062031
Residuals	24	3.0359	0.1265		

La tabla 4.7 contiene los resultados de la prueba de Tukey , donde las variables de respuesta a:c(1:1 con ceniza) tiene valores de p-value menores al 0.05, lo que indica que la resistencia de la unidad experimental si es afectada por la presencia de ceniza y la proporción de jal.

Tabla 4.7 Prueba de Tukey entre el factor Mezcla y Ceniza.

Mezcla:Ceniza				
	diff	lwr	upr	p adj
b:c-a:c	-1.9777	-2.4402	-1.5152	0.0000
a:s-a:c	0.5844	-1.0469	-0.1219	0.0096
b:s-a:c	-1.6844	-2.1469	-1.2219	0.0000
a:s-b:c	1.3933	0.9308	1.8558	0.0000
b:s-b:c	0.2933	-0.1691	0.7558	0.3213
b:s-a:s	-1.1000	-1.5625	-0.6374	0.0000

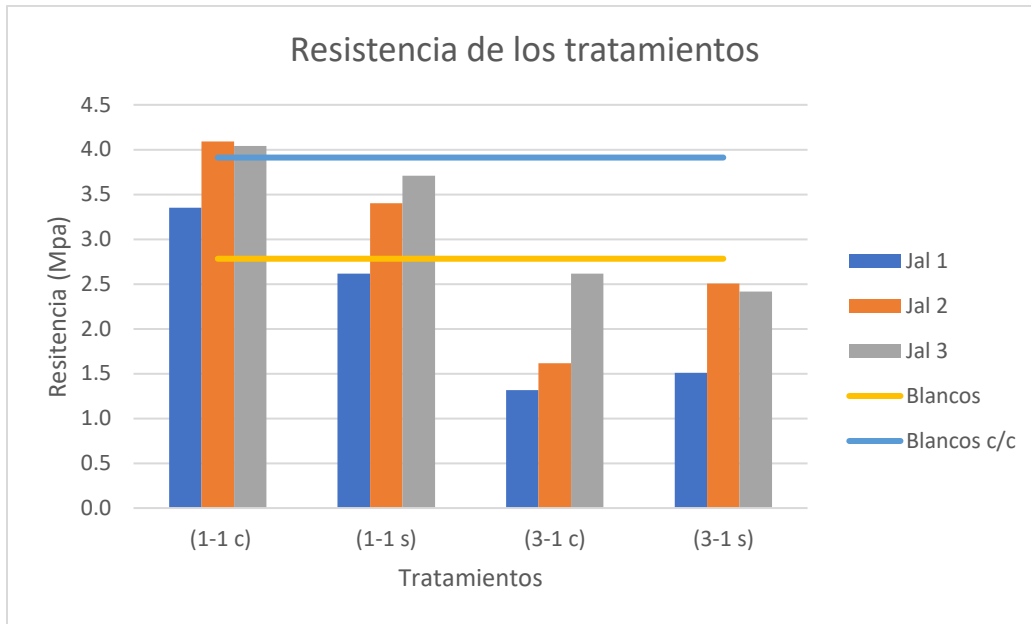


Figura 4.4 Resistencia a la compresión de los tratamientos

Como se muestra en la figura 4.4, la mezcla 1:1 (1 cantidad de cal: 1 cantidad de jal) en general es la que tiene mayor resistencia a la compresión, y ésta se incrementa cuando se le añade ceniza, a diferencia la mezclas 3:1 (3 cantidades de jal: 1 cantidad de cal), en donde al parecer disminuye la resistencia al agregar la ceniza.

Además en la tabla ANOVA (Tabla 4.6), el factor Jal tiene un valor de p-value de $1.411e^{-06}$, por ende, esto evidencia que la presa de jales es heterogénea estratigráficamente y si hay interacción de factor Jal. Para saber la diferencia que existe se utilizó la prueba de Tukey (Tabla 4.8), en donde se muestra que en la parte superior de la presa de jales (Jal 1) existe diferencia en comparación con la parte media (Jal 2) y la base (Jal 3), los cuales son homogéneos.

Tabla 4.8 Prueba de Tukey para el factor Jal.

Jal				
	diff	lwr	upr	p adj
2-1	0.7050	0.3423	1.0676	0.0001
3-1	0.9958	0.6332	1.3584	0.0000
3-2	0.2908	-0.0717	0.6534	0.1331

El factor mezcla (proporción de jal y cal) en la tabla de ANOVA (Tabla 4.6) tiene un valor de $2.418e^{-12}$, por lo que si existe interacción entre las medias y para saber las diferencias se empleó la prueba Tukey (Tabla 4.9), en donde se muestra que si hay una diferencia entre las proporciones de Jal-cal. Siendo la óptima la mezcla a (1:1), es decir una proporción de cal y una proporción de jal.

Tabla 4.9 Prueba de Tukey para el factor Mezcla.

Mezcla				
	diff	lwr	upr	p adj
b-a	-1.5388	-1.7835	-1.2942	0

4.4 Prueba de tanque.

En la figura 4.5, se presentan los valores de pH y conductividad de los lixiviados de la Prueba de Tanque con una duración de 64 días. Los valores de pH de los lixiviados de todos los jales y tratamientos fueron alcalinos y varían generalmente entre 7.5 y 9.5. Además, que en todos los tratamientos con diferentes jales, tuvieron su máximo valor de alcalinidad al cuarto día y después fue decreciendo el pH. El pH de del tratamiento 1:1 sin ceniza en los tres diferentes jales fue ligeramente mayor al de lo otros tratamientos, durante todo el periodo de prueba. El tratamiento 3:1 con ceniza mostro valores más bajo para el jal 1 y jal 3.A excepción del jal 2, en que el tratamiento con los valore de pH más bajos fueron el tratamiento3:1 sin ceniza.

En cuanto a la conductividad, la mayoría de los tratamientos exponen valores altos a partir del noveno día. El tratamiento 1:1 sin ceniza demuestra valores altos en la duración de la Prueba de Tanque, mientras que el tratamiento 3:1 sin ceniza es la que presenta valores bajos.

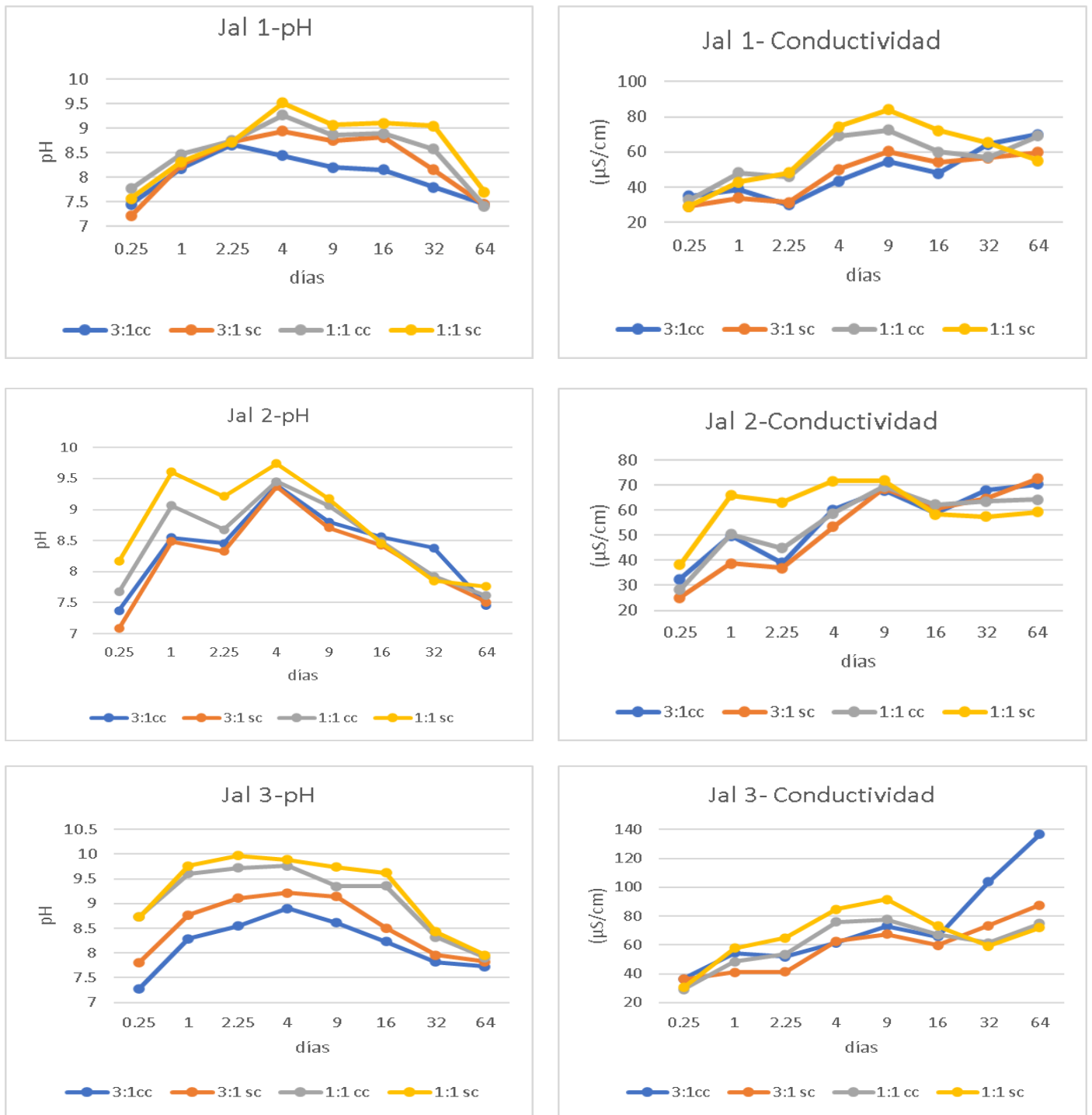


Figura 4.5 pH y conductividad de los lixiviados de la prueba de tanque

Con respecto al tratamiento para la retención de EPT (Pb y As), fue exitosa. Ya que en el caso del plomo la concentración está por debajo del límite de detección programado del equipo de absorción atómica (límite mínimo para Pb es 0.001ppm),. En el caso del arsénico éste si está presente en los lixiviados de la prueba, pero en concentraciones muy bajas. La liberación de arsénico se observa en dos tratamientos (3:1 con y sin ceniza). Los porcentajes

de liberación son menores al 1% con respecto a la concentración total de arsénico de cada Jal. Esto implica casi una eficacia de retención de más del 99% de arsénico en los tratamientos (figura 4.6). Pero por otro lado los lixiviados que muestran presencia de As (Tabla B.3), de esta prueba, sobrepasan los LMP de la NOM-127-SSA1-2021, esta norma establece 0.025 mg/L.

Posiblemente la liberación del arsénico en los tratamientos mencionados se deba a la sobresaturación de cantidad de Jal en la mezcla del mortero, lo cual conlleva a un bajo encapsulamiento. También la liberación de As podría atribuirse a la oxidación de minerales de sulfuro en arseniatos, los cuales son más solubles (Taha *et al.*, 2016; Taha *et al.*, 2018). Además, la oxidación de la piritita, podría ser la razón principal detrás de la liberación de sulfatos (Ecuación 1; Silva *et al.*, 2017) en los tratamientos 3:1 con y sin ceniza. La liberación de sulfatos también podría atribuirse a la oxidación de los sulfuros por los tratamientos de extracción de metales que se emplean en las minas (Espitia *et al.*, 2015; Hamberg *et al.*, 2017).

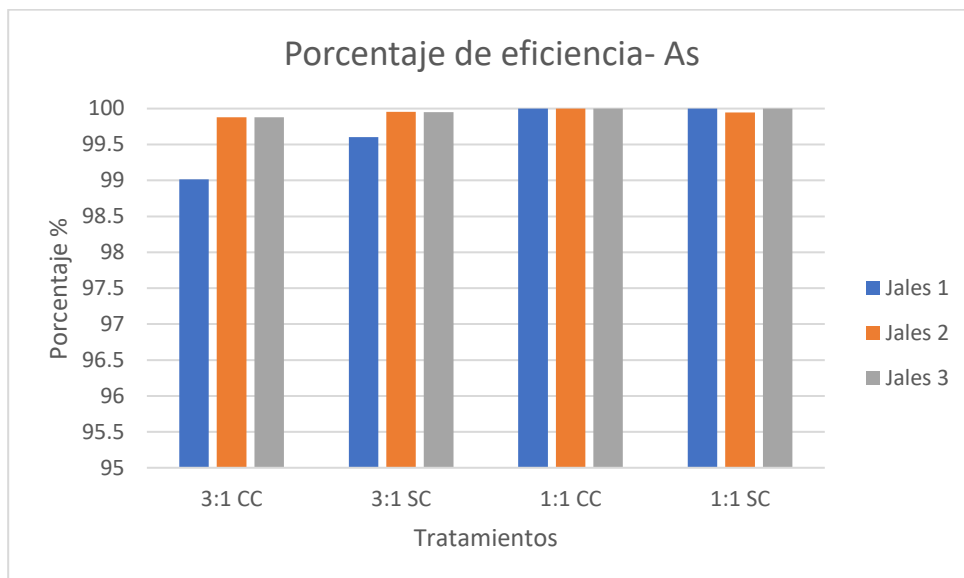
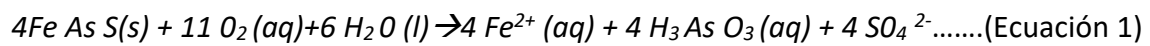


Figura 4.6 Porcentaje de eficiencia.

4.5 Porosidad

El análisis de los resultados de la prueba de porosidad se obtuvo de la siguiente tabla de ANOVA (Tabla 4.10) empleando el software R studio. La tabla demuestra que no se rechaza la hipótesis nula, esto significa que no existe interacción entre los factores: Jal-mezcla-ceniza, mezcla-ceniza y Jal-mezcla, ya que el p- value de cada uno de estos factores es mayor que 0.05. Por otro lado, los factores por separados (jal, mezcla y ceniza) tienen un valor de significancia menor que un 5%, por ende, se rechaza la hipótesis de que entre todas las medias no hay diferencias, por lo tanto, si hay interacción entre estos factores. Para comprender mejor las interacciones de estos factores, se realizó una prueba de Tukey.

Tabla 4.10 Resultados de ANOVA de interacción entre Jal, Mezcla y ceniza para la prueba de Porosidad

Factores	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Jal	2	228.55	114.28	4.4156	0.0365
Mezcla	1	432.48	432.48	16.7110	0.0015
Ceniza	1	707.20	707.20	27.3263	0.0002
Jal:Mezcla	2	5.87	2.93	0.1133	0.8937
Jal:Ceniza	2	150.13	75.07	2.9006	0.0938
Mezcla:Ceniza	1	41.19	41.19	1.5914	0.2310
Jal:Mezcla:Ceniza	2	33.10	16.55	0.6395	0.5446
Residuals	12	310.56	25.88		

En la prueba de Tukey (tabla 4.11) tomando un valor de significancia de 0.05, el factor Jal muestra que los Jales 3 y 2 son estadísticamente parecidos, al igual que para el Jal 3 y 1. Lo cual indica que en la parte media y base de la presa de jal no existe diferencia. Mientras que la cima de la presa si muestra una diferencia significativa al utilizarse en el tratamiento de E/S.

Por otro lado, el factor “mezcla” indica que si existe diferencia entre las distintas proporciones de jal y cal (a es una proporción de jal y una proporción de cal; b es tres proporciones de Jal una de cal). Aunado a esto, el factor “ceniza” también influye en cualquier tratamiento.

Tabla 4.11 Prueba de Tukey para los factores Jal, Mezcla y Ceniza.

Jal				
	diff	Lwr	upr	p adj
2-1	6.6350	-0.1510	13.4210	0.0554
3-1	6.4537	-0.3322	13.2397	0.0628
3-2	-0.1812	-6.9672	6.6047	0.9972
Mezcla				
	diff	Lwr	upr	p adj
b-a	8.49	3.9649	13.0150	0.0015
Ceniza				
	diff	Lwr	upr	p adj
s-c	-10.8566	-15.3817	-6.3315	0.0002

En la figura 4.7, se presentan los resultados de la determinación de porosidad, donde se pone de manifiesto que hay una relación directa entre la proporción de jal y la porosidad. Aunado a esto, se encontró que los tratamientos que contienen ceniza aumentan el valor de la porosidad con respecto a los tratamientos que no la tienen. Este resultado se puede deber a la presencia de ceniza volante sin reaccionar o incorporar a los tratamientos, por lo que da como resultado que la presencia de ceniza tienda a reducir la adhesión entre partículas, lo que provoca un aumento de vacíos, este comportamiento también concuerda con diferentes estudios (Islam et., 2020; Consoli et., 2011; Moreira *et al.*, 2019). Esto explica por qué en la prueba de resistencia la muestra 3:1 con ceniza tuvo valores bajos, ya que la adición de la misma aumenta la resistencia hasta un cierto contenido de esta sustancia, y más allá de ese contenido agregado, la resistencia comienza a disminuir.

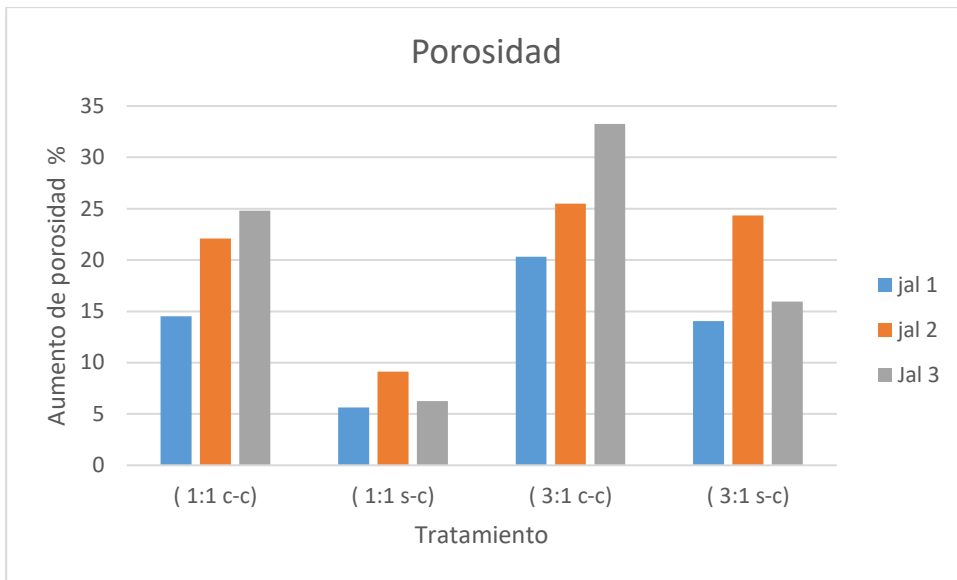


Figura 4.7. Porcentaje de aumento de porosidad

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.

5.1 Conclusiones

Principalmente de las últimas dos décadas sobre el uso de los jales mineros y cenizas volantes considerados residuos peligrosos, por su contenido de elementos potencialmente tóxicos, para utilizarlos en el tratamiento de E/S, se encontró que se pueden utilizar de manera eficaz, principalmente la ceniza volante como aditivo puzolánico, ya que mejora propiedades como la resistencia o durabilidad, aunado a esto también la adición de dicha ceniza en el mortero de cal, reacciona para formar compuestos de aluminosilicatos, lo cual hace que los EPT puedan fijarse firmemente a la estructura de la matriz, inmovilizando y encapsulando estos elementos en el geopolímero a base de ceniza volante.

Asimismo, se investigó el aprovechamiento de las cenizas volantes y los residuos mineros a partir de la realización de unidades experimentales para la E/S considerando un diseño estadístico de experimento, con el cual se determinó que el tratamiento más eficiente es el que contiene una proporción de jal con una proporción de cal con presencia de ceniza (1:1 c). Ya que estas proporciones son idóneas para reutilizar ambos residuos.

Las unidades experimentales elaboradas se sometieron a pruebas mecánicas, de porosidad así como de lixiviación, y derivado de los resultados obtenidos se pudo apreciar la eficiencia del tratamiento de E/S y se determinó lo siguiente:

- La adición de ceniza volante demostró ser de gran ayuda para incrementar la resistencia a la compresión, hasta un cierto contenido de esta sustancia, y más allá de ese contenido agregado, la resistencia comienza a disminuir. Esto se vio en el tratamiento 1:1 ya que, de forma general, señaló una mayor resistencia a comparación de los otros tratamientos, Por el contrario, el tratamiento 3:1 c, indico ser el tratamiento menos competente, ya que éste mostró una reducción a la prueba de resistencia.
- La prueba de tanque evidenció que los tratamientos fueron eficientes para el encapsulamiento de EPT, ya que, en el caso del plomo, no fue detectado en los lixiviados por el equipo de absorción atómica. En cambio, el As si lo fue, pero en

porcentajes de liberación menores al 1% con respecto a la concentración total de cada Jal.

- La prueba de porosidad muestra que hay una relación inversa entre ésta y la resistencia a la compresión, la cual disminuye notoriamente al aumentar la porosidad.

Derivado de este estudio se puede concluir que la valorización de cenizas volantes utilizándolas como aglutinantes en el proceso de estabilización/solidificación de residuos mineros es altamente factible, ya que se demostró que EPT como el As y Pb son encapsulados en ciertas proporciones de jal y cal.

Finalmente, se acepta la hipótesis de que las propiedades puzolánicas de las cenizas volantes, combinada con la cal, aislarán y encapsularán elementos peligrosos contenidos en los jales mineros, por medio del tratamiento de estabilización/solidificación y con ello, se valorizarán estos residuos.

5.2 Recomendaciones.

Los resultados de esta investigación son satisfactorios, ya que es una alternativa en la remediación de los jales mineros del área minera de Zimapán. Aunque los resultados muestran un encapsulamiento favorable de EPT como en el caso del arsénico, esta liberación no representa un riesgo a la salud, ya que están por muy por debajo de los límites permisibles de la NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004, se recomienda para una mayor eficiencia en el tratamiento E/S que la mezcla de mortero no se sobresature con Jal. Uno de los hallazgos de esta investigación es que la combinación ideal y que sea costeable para este tratamiento serían dos proporciones de jal y una cantidad de cal (2 jal:1 cal).

Para el uso de ceniza volante como material puzolánico para el tratamiento de E/S se recomienda solamente cuando haya carbóelctricas cercanas en la zona de Zimapán, como son en los estados de Coahuila y Guerrero., ya que el traslado de las cenizas volantes incrementaría demasiado el costo del tratamiento y no sería viable, por otro lado, se podría realizar el tratamiento con puzolanas de otra naturaleza como fuente de silicio.

Se recomienda el uso de ácido fluorhídrico en vez de la solución de agua regia (formada por una cantidad de HCl y tres cantidades de HNO₃), esto con el fin de mejorar el proceso de digestión de minerales silicatados.y tener una mayor eficiencia en los resultados de absorción atómica.

Referencias

- Ahmaruzzaman, M., 2010, A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, 136(3), 327-363.
- Alieh Saedi, Ahmad Jamshidi-Zanjani, Ahmad Khodadadi Darban, 2020, A review on different methods of activating tailings to improve their cementitious property as cemented paste and reusability. *Journal of Environmental Management*, 270.
- Alvarado, M., Volke, S., 2004, Informe de Resultados del Proyecto: Método de Análisis y Propuesta Para el Manejo de los Residuos Mineros del Sitio Nacozeni, Sonora. SEMARNAT-INE.
- Armienta, M., Rodriguez, R., Cruz, O., 1997, Arsenic content in hair of people exposed to natural arsenic polluted groundwater at Zimapan, Mexico *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 9.583-589.
- ASTM - C618e8a, 2009. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, USA.
- ASTM D2487-17e1, 2020, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- Bautista, W., Díaz, M, Martínez, S., 2017, Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(1), 135-146.
- Belmonte, M., Madrid, M., Pérez, R., Quiroz, J., 2019, Durabilidad de mezclas de concreto con diferentes contenidos de ceniza volante activada. *Revista ALCONPAT*, 9(2), 200-214.
- Berger, P.D., Maurer, R.E. ,2002, *Experimental Design with Applications in Management, Engineering and the Sciences*. ed. Duxbury Thomson Learning.
- Bhattacharjee U., Kandpal T.C., 2002, Potential of fly utilization in India. *Energy*, 27, 151–166.
- Bignozzi, M.,2011. Sustainable cements for green buildings construction. *International Conference on Green Building and Sustainable Cities*, Bologna University, Italy, 915-921.
- Bruce, R., 2009, El carbón en México. *Economía Informa*, 359. 138-160.
- Buschiazzo D., Aimar, S., 2003, Erosión Eólica: Procesos y predicción. En: *Viento, Suelo y Planta*. Golberg, Daniel A. y A.G. Kin. Eds. EEA Anguil, Ing. Agr. Guillermo Covas y Fac. De Agronomía, UNLPam. Ediciones INTA. 23-34.
- Calva, J.L, 2007, *Sustentabilidad y desarrollo Ambiental*. México D.F, UNAM
- Camprubí, A., Albinson, T., 2006, Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 27–81.
- Capasso, I., Lirer, S., Flora, A., Ferone, C., Cioffi, R., Caputo, D., Liguori, B., 2019, Reuse of mining waste as aggregates in fly ash-based geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 220, 65-73.
- Carrasco-Velázquez, B.E., Martinez-Hernández, E., Ramirez-Arriaga, E., 2009, *Estratigrafía de la Formación El Morro del Paleoceno-Eoceno en Zimapan*, Hidalgo.

- Carrillo, R., 2005, Niveles de contaminación de los suelos y las plantas. En: González-Chávez M.C. Pérez-Moreno J. y Carrillo-González R. Eds. El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas, Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México, 161.
- Carrillo-Martínez, M., 2000, Hoja Zimapán, con Resumen de la geología de la hoja Zimapán, estado de Hidalgo: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, escala 1:100,000, mapa con texto explicativo.
- Carrillo-Martínez, M., y Suter, M., 1982, Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro, En: in Alcayde, Magdalena, y de Cserna, Zoltan, eds., Libro guía de la excursión geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, estados de Hidalgo y Querétaro: Sociedad Geológica Mexicana, Sexta Convención Geológica Nacional, p. 1-20
- Celik, O., Damci, E., Piskin, S., 2008, Characterization of fly ash and its effects on the compressive strength properties of Portland cement. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 15(5),433-440.
- Cifuentes P., Ferrer J., 2006, Análisis del comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adición de cenizas volantes de Termopaipa. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Clark, K., Foster C., Damon P., 1982, Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 93(6), 533-544.
- Consejo de Competencia Minera (CCM), S.F. Recuperado el 20 de agosto del 2023 de <https://www.ccm.cl/estandares-sectoriales/rutas/procesamiento-de-sulfuros-de-cobre-proceso-de-concentrado/>
- Corona, R., Martínez, E, Tritilla, J., Benavides M., Piedad, N., 2007, Principales yacimientos de carbón mineral en México. *Geomimet*. 8-40.
- Dwivedi, A., Jain, M. K., 2014, Fly ash-waste management and overview: A Review. *Recent Research in Science and Technology*, 6(1).
- Elbaz, A., Aboulfotoh, A., Dohdoh, A., Wahba, A., 2019, Review of beneficial uses of cement kiln dust (CKD), fly ash (FA) and their mixture. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 10(11), 1062-1073.
- Espinosa, E., Armienta, M., Cruz, O., Aguayo, A., Ceniceros, N., 2009, Geochemical distribution of arsenic, cadmium, lead and zinc in river sediments affected by tailings in Zimapán, a historical polymetallic mining zone of México, *Environ. Geol.* 58 (2009) 1467-1477.
- Espitia, S. L. M., & Lapidus, G. T., 2015, Pretreatment of a refractory arsenopyritic gold ore using hydroxyl ion. *Hydrometallurgy*, 153, 106-113.
- Faguan L., Naiqian F., Xinying L., 2000, An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 989-992.

- Fitz- Diaz, E., Lawton, T.F., Juarez-Arriaga, E., Chavez-Cabello., 2017, The Cretaceous-Paleogene Mexican orogeny: Structure, basin development, magmatism, and tectonics: Earth-Science Reviews.
- Fuentes, G., 2017, Estimación de emisiones de mercurio a la atmosfera y su modelación para evaluar la calidad del aire por la operación de centrales carboeléctrica en México. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gollakota, A., Vikranth, V., Shu, Chi-Min, 2019, Progressive utilization prospects of coal fly ash. A review. Science of The Total Environment, 672, 951–989.
- González, A., 2012, Inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- González, F., Minor, M., Romero, J., Desentis, .S., Fernández, G.,2022, Determinación de sustancias potencialmente tóxicas presentes en los residuos de una mina activa de productos no ferrosos (Etapa I). Medellín, Colombia.
- González, J, Mendoza, O., Romero. J., Fernandez, G., 2023, Evaluation of the danger of a tailings pile belonging to an active mine through its characterization and a dispersion model. Environ Monit Assess 195, 889.
- González, J., 2016, Propuestas para el aprovechamiento de residuos metalúrgicos no ferrosos, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México
- Guadarrama G., 2019, Caracterización y análisis de riesgo de los jales de una zona minera del Estado de Durango, México. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM.
- Gutiérrez., J., 2018, Propuesta para la disposición de jales agotados previamente caracterizados y estabilizados, en cavidades mineras. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM.
- Hamberg, R., Maurice, C., & Alakangas, L.,2017, Lowering the water saturation level in cemented paste backfill mixtures—effect on the release of arsenic. *Minerals Engineering*, 112, 84-91.
- Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw,D., Rangan, B., 2004, On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101 (6), 467–472.
- Hemalatha, T., Ramaswamy, A., 2017, A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 147, 546–559.
- Hernández, E., Mondragón, E., Cristobal, D., Rubiños, J., Robledo, S., 2009, Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Forestal y del Ambiente*,15, 109–114.
- Huasquisto,S., Belizario, G., 2018, Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(2), 225-234.

- INEGI, 2017, Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2017. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/inegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825095093.pdf
- Johnson, O., Affam, A., 2018, Petroleum sludge treatment and disposal: A review. *Environmental Engineering Research*, 24(2), 191–201.
- King, R., 1939, Geological Reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico, *Geological Society of America*. 50(11), 1625–1722
- Labastida, I., Armienta, M. A., Lara-Castro, R. H., Aguayo, A., Cruz, O., & Cenicerros, N., 2013, Treatment of mining acidic leachates with indigenous limestone, Zimapán Mexico. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 1187–1195.
- Martínez, J., 2005, Guía para la gestión integral de los residuos peligrosos. Retrieved from *fudamentos*, Tomo I.
- Maslehuddin, M. 1989, Effect of sand replacement on the early-age strength gain and long-term corrosion-resisting characteristics of fly ash concrete. *ACI Mater J*, 86, 58–62.
- Mathapati, M., Amate, K., Prasad, C., Jayavardhana, M., Raju, T., 2021, A review on fly ash utilization. *Materials Today. Proceedings*, 1-6
- Maxwell S.E., Delaney, H.D., Kelley K. (2018). *Designing Experiments and Analyzing Data. A Model Comparison Perspective*. 3rd. ed. Routledge.
- Medel, A., Ramos, S.; Avelar, F.; Mora, L.; Rodríguez, F., 2008, Caracterización de Jales Mineros y evaluación de su peligrosidad con base en su potencial de lixiviación *Conciencia Tecnológica*, 35, 32-35.
- Medina, A., Gamero, P., Querol, X., Moreno, N., De León, B., Almanza, M., Font, O., 2010, Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3), 82–90 .
- Méndez, M., Armienta, M., 2003, Arsenic phased distribution in Zimapán mine tailings, Mexico, *Geofis. Int.* 42 , 131–140.
- Molina, A., 2018, *Geoquímica y distribución de Sb en jales del distrito minero de Zimapán, Hidalgo*. UNAM, tesis de maestría, 153 p.
- Muñoz, M., King, R., Montenegro, J., 2018, Caracterización geotécnica de cenizas volantes generadas a partir de la combustión del carbón en central termoeléctrica. *Universidad Católica de la Santísima Concepción*, 21.
- Naik, T., Ramme, B., Tews, J., 1994, Use of high volumes of class C and class F fly ash in concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 16, 12–20.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021, Calidad del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- Parbhakar, A., Lottermoser, B., 2015, A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Mineral Engineering*, 82, 107-124.

- Parra, J., 2017, Aprovechamiento de los Jales de la Mina La Guitarra para la manufactura de paneles prefabricados ligeros, Tesis de maestría, Instituto politécnico Nacional.
- Patil, S., Nawle, S., Kulkarni, S., 2013, Industrial applications of fly ash: a review. International Journal of Science. Engineering and Technology Research (IJSETR), 2(9), 1669-1663.
- Polic P., Ilic M, Popovic A., 2005, Environmental Impact Assessment of Lignite Fly Ash and Its Utilization Products as Recycled Hazardous Wastes on Surface and Ground Water Quality. In: Kassim T.A. Water Pollution. The Handbook of Environmental Chemistry, 2, Ed., Springer, Berlin, Heidelberg, 61-110.
- PROFEPA, 2003, Control de Residuos Peligrosos. Profepa.gob.mx. (En línea) Revisado el 19 de septiembre de 2021, recuperado de: http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1370/1/mx/control_de_residuos_peligrosos.html.
- Rivera-Moreno, E., 2018, Evaluación de la peligrosidad de jales mineros por su capacidad para generar drenaje ácido en una mina de hierro. Tesis de licenciatura. UNAM.
- Rivva L., 2008, Materiales para concreto. Lima, Perú, Editorial Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Romero, F., 2004, Procesos geoquímicos que controlan la movilidad de metales y metaloides en jales de sulfuros metálicos. "El Fraile", Taxco-Guerrero. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Salas, G., Benavides, L., 1976, La exploración y las reservas mexicanas de carbón. Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero (ILAFA), in Congreso: Usos del carbón en siderurgia: abastecimiento y tecnologías México DF, 79-90.
- Santaella, V., Luz, E., 2001, Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 10, 47-62.
- SEMARNAT, 2019, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadore Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2018.
- Sephton, M., Webb, J., McKnight, S., 2019, Applications of Portland cement blended with fly ash and acid mine drainage treatment sludge to control acid mine drainage generation from waste rocks. Applied Geochemistry, 103, 1-14.
- Shen, Z., Jin, F., O'Connor, D., Hou, D., 2019, Solidification/Stabilization for Soil Remediation: An Old Technology with New Vitality. Environmental Science & Technology, 53(20), 11615-11617.
- Silva, J. C. M., dos Santos, E. C., Heine, T., De Abreu, H. A., Duarte, H. A., 2017, Oxidation Mechanism of Arsenopyrite in the Presence of Water. The Journal of Physical Chemistry C, 121(48), 26887–26894.
- Soberanes, F., Treviño-M., 1997, El derecho ambiental en América del Norte y el sector eléctrico mexicano, Instituto de Investigaciones Jurídicas. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Solano, M, 2005, Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc. Tesis de Doctorado. Universidad de Murcia.

- Taha, Y., Benzaazoua, M., Edahbi, M., Mansori, M., & Hakkou, R.,2018, Leaching and geochemical behavior of fired bricks containing coal wastes. *Journal of environmental management*, 209, 227-235.
- Taha, Y., Benzaazoua, M., Mansori, M., Yvon, J., Kanari, N., & Hakkou, R. ,2016, Manufacturing of ceramic products using calamine hydrometallurgical processing wastes. *Journal of Cleaner Production*, 127, 500-510.
- USEPA, 1997, Innovative Site Remediation Technology, Design and Application, Stabilization/Solidification. Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA/542/B-97/007, vol 4, Washington DC
- Villaseñor-Cabral, M.G., Petersen, E.U., Avendaño-Cano, S., Gómez-Caballero, J.A., Sousa, J.,Reyes-Salas, A.M., 1996. Minerales del grupo de la tetrahedrita en las minas de Lomo de Toro y Las Ánimas, Zimapán, Hidalgo. *Actas INAGEQ 2*, 129–134.
- Volke, S., Velasco, T., de las Rosas, P., 2005, Suelo contaminado por metales y metaloides: muestreo y alternativa para su remediación, México: INE-SEMARNAT.
- Wang, L., Yu, K., Li, J.-S., Tsang, D. C. W., Poon, C. S., Yoo, J.-C., Dai, J.-G.,2018, Low-carbon and low-alkalinity stabilization/solidification of high-Pb contaminated soil. *Chemical Engineering Journal*, 351, 418–427.
- Xargay, H., Ripani, M., Caggiano, A., Folino, P., Martinelli, E., 2019, Uso de materiales reciclados en compuestos cementicios. *Tecnura*, 23(60), 38-51.
- Zhenguo Shi, Caijun Shi, Jian Zhang, Shu Wan, Zuhua Zhang, Zhihua Ou, 2018, Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 108, 10-19.

Anexos

ANEXO A Código de programación que se utilizó en el software R, para el análisis estadístico

❖ **Análisis estadístico de la prueba de compresión simple.**

```
file.choose()# para poder ubicar el directorio
setwd("E:\\tesis maestria\\prueba de compresion\\analisis") # mi directorio de trabajo
datos <- read.csv("prueba de compresion.csv")
datos

attach(datos)
is.numeric(y) #pregunta si Y es numero y dice TRUE
Jal <- as.factor(i.jal)
mezcla <- as.factor(mezcla)
ceniza <- as.factor(ceniza)

m1 <- lm(y ~ Jal*mezcla*ceniza) # forma abreviada del modelo
# de tres factores con todas las interacciones

anova(m1) # la interaccion de los tres factores es significativa
# como la interaccion de los tres factores es significativa,
# tenemos que estudiar la interaccion de dos de ellos
# en cada nivel del tercero

# Prueba de Tukey
m1.tukey <- TukeyHSD(aov(y ~ Jal*mezcla*ceniza))
m1.tukey
```

- ❖ Análisis estadístico de la prueba de porosidad.

```
file.choose()# para poder ubicar el directorio
```

```
setwd("E:\\tesis maestria\\prueba de porosidad") # mi directorio de trabajo
```

```
datos <- read.csv("porosidad analisis.csv")
```

```
datos
```

```
attach(datos)
```

```
is.numeric(y) #pregunta si Y es número y dice TRUE
```

```
Jal <- as.factor(i.jal)
```

```
mezcla <- as.factor(mezcla)
```

```
ceniza <- as.factor(ceniza)
```

```
m1 <- lm(y ~ Jal*mezcla*ceniza) # forma abreviada del modelo
```

```
# de tres factores con todas las interacciones
```

```
anova(m1) # la interacción de los tres factores es significativa
```

```
# como la interacción de los tres factores es significativa,
```

```
# tenemos que estudiar la interacción de dos de ellos
```

```
# en cada nivel del tercero
```

```
# Prueba de Tukey
```

```
m1.tukey <- TukeyHSD(aov(y ~ Jal*mezcla*ceniza))
```

```
m1.tukey
```

ANEXO B Tablas

Tabla B.1 Resultados de la prueba de compresión simple

Jal	mezcla	ceniza	Y(Mpa)	Incertidumbre estándar (Mpa)
1	a	c	3.23	0.16
1	a	c	3.24	
1	a	c	3.59	
1	a	s	2.70	
1	a	s	2.66	
1	a	s	2.49	
1	b	c	1.21	
1	b	c	1.42	
1	b	c	1.32	
1	b	s	1.49	
1	b	s	1.67	
1	b	s	1.37	
2	a	c	3.99	
2	a	c	3.64	
2	a	c	4.64	
2	a	s	3.71	
2	a	s	3.32	
2	a	s	3.18	
2	b	c	1.85	
2	b	c	1.66	
2	b	c	1.34	
2	b	s	2.79	
2	b	s	2.74	
2	b	s	1.99	
3	a	c	3.98	
3	a	c	3.99	
3	a	c	4.15	

3	a	s	3.41	
3	a	s	3.54	
3	a	s	4.18	
3	b	c	1.96	
3	b	c	3.35	
3	b	c	2.54	
3	b	s	2.76	
3	b	s	2.51	
3	b	s	1.97	

Tabla B.2 Resultados de la prueba de porosidad.

Jal	mezcla	ceniza	(% de porosidad)	Incertidumbre estándar (%)
1	a	c	8.71	1.33
1	a	c	20.33	
1	a	s	5.96	
1	a	s	5.30	
1	b	c	18.74	
1	b	c	21.86	
1	b	s	14.12	
1	b	s	13.97	
2	a	c	26.40	
2	a	c	17.81	
2	a	s	9.58	
2	a	s	8.65	
2	b	c	23.88	
2	b	c	27.09	
2	b	s	21.51	
2	b	s	27.15	
3	a	c	19.09	
3	a	c	30.54	
3	a	s	11.74	
3	a	s	0.79	
3	b	c	28.13	
3	b	c	38.40	
3	b	s	16.78	
3	b	s	15.15	

Tabla B.3 Resultado de concentraciones de As presentes en los lixiviados de la prueba de tanque

Jal	muestra	Concentración ppb	Incertidumbre estándar (ppb)	Concentración de As en Jales(mg/kg)	Concentración de As liberado en la prueba de tanque (mg/kg)	Eficiencia de tratamiento (%)
1	3:1 CC	1.76	0.26	29.80890465	0.89	99.015954
1	3:1 SC	0.7		29.80890465	0.88	99.60282595
1	1:1 CC	0		29.80890465	0.59	100
1	1:1 SC	0		29.80890465	0.59	100
2	3:1 CC	1.76		249.8977381	7.38	99.88088151
2	3:1 SC	0.7		249.8977381	7.38	99.95262333
2	1:1 CC	0		249.8977381	4.99	100
2	1:1 SC	0.55		249.8977381	4.99	99.94497749
3	3:1 CC	1.76		244.2651281	7.32	99.87991191
3	3:1 SC	0.7		244.2651281	7.32	99.95223769
3	1:1 CC	0		244.2651281	4.88	100
3	1:1 SC	0		244.2651281	4.88	100

Tabla B.4 Elementos mayores y trazas para las muestras de Jal y ceniza volante por el método de Fluorescencia de Rayos X

Componente	JAL-1 (masa%)	JAL-2 (masa%)	JAL-3 (masa%)	Ceniza Volante
F	0.237	0.411	0.697	
SiO ₂	38.433	31.768	33.277	60.388
TiO ₂	0.847	0.521	0.425	0.869
Al ₂ O ₃	11.603	7.298	7.324	23.876
Fe ₂ O _{3t}	12.496	14.886	12.275	5.903
MnO	0.045	0.128	0.040	0.029
MgO	0.887	1.190	1.173	1.086
CaO	10.846	24.067	23.413	4.526
Na ₂ O	0.345	0.261	0.388	0.316
K ₂ O	7.828	3.501	4.018	1.54
P ₂ O ₅	0.338	0.212	0.236	0.046
LOI1	5.11	4.83	4.91	1.42
Suma	89.016	89.071	88.175	99.999

SO₃	-	-	-	0.6766
S	3.645	2.584	3.036	
Cl	0.032	0.037	0.026	
Rb	0.042	0.025	0.027	
Sr	0.041	0.038	0.043	
Ba	0.436	0.089	0.170	
Y	0.000			
Zr	0.020	0.017	0.015	
Nb			0.002	
Cr	0.010			
Co			0.003	
Ni		0.009	0.007	
Cu	0.014	0.231	0.025	
Zn	0.421	0.742	0.443	
Pb	0.202	0.618	0.369	
As	0.298	1.576	2.086	
Ga				
Se		0.020	0.014	
Sb	0.047	0.171	0.119	
W	0.014	0.027	0.016	
Ce		0.006		

ANEXO C Divulgación de resultados.

Divulgación de resultados en eventos académicos y técnicos.

Con el fin de divulgar los resultados obtenidos de este trabajo, estos fueron expuestos en modalidad oral en La Convención Geológica Nacional 2023, que se llevo acabo del 23 al 27 de abril del 2023



La Sociedad Geológica Mexicana A. C., otorga el siguiente

RECONOCIMIENTO

a

**Minor-Varela, Mario Alberto; González-Sánchez, Jesús Fidel,
Desentis-Peña, Sandra; Fernández-Villagómez, Georgina; Lozano-Santa
Cruz, Rufino**

por la presentación de su trabajo en modalidad oral titulado:

VALORIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES UTILIZÁNDOLAS COMO AGLUTINANTES EN EL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE RESIDUOS MINEROS CONTENIENDO ARSENICO Y PLOMO
durante la Convención Geológica Nacional 2023, en el Palacio de Minería, Ciudad de México del 23 al 27 de abril del presente año.

Dr. Ricardo Barragán Manzo
PRESIDENTE

Dr. Hugo Delgado Granados
VICEPRESIDENTE



Asimismo, también se realizó divulgación de resultados de forma oral en Expo Residuos XIV Feria y Seminario Internacional Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos 2022.



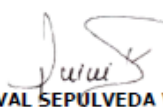
LA ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
ACODAL Seccional Noroccidente

CERTIFICA QUE:

El señor **Mario Minor Varela** identificado con cedula **N04172212** presento **TRABAJO TÉCNICO** con el tema: **Determinación de sustancias potencialmente tóxicas presentes en los residuos de una mina activa de productos no ferrosos para su posible estabilización-solidificación (Etapa I).**

Para constancia se firma a los 02 días del mes de noviembre de 2022


DIANA CAROLINA CARDENAS VELOTH
Directora Ejecutiva


LUIS ANIVAL SEPULVEDA VILLADA
Gerente ExpoResiduos 2022


GIOVANNIS ARRIETA BERNATE
Director División de Residuos Sólidos DIRSA



¡Contáctenos para
Más información!

Celular: 3174291542 - 3182851740
Correo: acodalnoroccidente@acodal.org.co
Calle 7 D #43A-40 Oficina 5-117 Medellín, Antioquia