



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“CUBIERTA GEOQUÍMICA PARA EL ABANDONO SEGURO  
DE UNA PRESA DE JALES”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**BRAYAN REYES TENORIO**

**Asesor: DR. LUIS GERARDO MARTINEZ JARDINES**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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: GUTIERREZ LARA MARIA RAFAELA**

**VOCAL: JUAREZ SANCHEZ FAUSTINO**

**SECRETARIO: MARTINEZ JARDINES LUIS GERARDO**

**1er. SUPLENTE: PAZ DIAZ BLANCA**

**2° SUPLENTE: MORALES MARTINEZ YOLOXOCHITL MARIA ELENA**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** En Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Instituto de Geología perteneciente a la UNAM.

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**DR. LUIS GERARDO MARTÍNEZ JARDINES**

**SUSTENTANTE (S):**

---

**BRAYAN REYES TENORIO**

# Agradecimientos Académicos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Facultad de Química** por brindarme un lugar dentro de sus instalaciones y formar parte como estudiante, viviendo grandes experiencias y aprendizajes.

Al **Instituto de Geología** de la UNAM, por las facilidades brindadas en sus instalaciones durante mi servicio social y la realización de este trabajo. Y a todo el equipo del laboratorio de Geoquímica Ambiental por apoyarme en cada uno de los experimentos realizados y su gran paciencia para explicarme.

Al **Dr. Luis Gerardo Martínez Jardines**, por su paciencia, consejos y recomendaciones realizadas para orientarme en este trabajo. Por mostrarme parte de su trabajo y darme la oportunidad de ser parte de grandes proyectos.

A mis sinodales: **Dra. María Rafaela Gutiérrez Lara** y **Dr. Faustino Juárez Sánchez** por el tiempo brindado en la revisión de este trabajo y por sus valiosas observaciones para hacer este trabajo una mejor tesis.

# Dedicatorias

A mis padres: **Carmen Tenorio Sánchez** y **José Manuel Reyes Posadas** por todo su cariño, su amor, y su gran esfuerzo para que todos y cada uno de sus hijos salgan adelante. Por enseñarme el valor de las cosas y trabajar por ello. Los amo.

A mis hermanos: **Emanuel, Irving, Eduardo, Suley** y **Lesli**. Por todas las risas y momentos inolvidables, los quiero.

A mi querida **Diana Bautista** por tu amor, tu comprensión, tu confianza y apoyo incondicional. Por ser mi compañera de vida en estos años y mi motivo para ser mejor persona. Te amo

A mis verdaderos amigos: **Alfredo Ayala** y **David Estrada** por estar conmigo en todos los momentos buenos y malos, contar con ustedes siempre y apoyarnos, sacarme siempre una sonrisa y darme ánimos para seguir adelante.

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>2</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>11</b>
<b>HIPÓTESIS</b>	<b>13</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>15</b>
1.1 UNIDAD MINERA	16
1.1.1 <i>Geología</i>	17
1.1.2 <i>Procesamiento</i>	18
1.2 JALES	19
1.3 PLAN DE CIERRE	20
1.4 DRENAJE ÁCIDO	21
1.5 PREVENCIÓN EN LA GENERACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS	23
1.6 REFORESTACIÓN DE UNA PRESA DE JALES	29
1.7 USO DE TECNOSUELO PARA CUBIERTA DE PRESA DE JALES	32
1.8 EFECTOS DE EPT SOBRE ALGUNAS FUNCIONES BIOLÓGICAS	40
1.9 GENERALIDADES DE ALGUNOS EPT	41
1.10 NORMATIVIDAD	44
1.11 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PH EN LOS JALES MINEROS	45
1.12 PRUEBAS DE PELIGROSIDAD EN LOS JALES MINEROS	46
<b>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>47</b>
2.1 MUESTREO Y OBTENCIÓN DE MATERIALES	47
2.1.1 <i>Jales mineros</i>	48
2.1.2 <i>Suelos aledaños</i>	49
2.1.3 <i>Roca caliza</i>	50
2.1.4 <i>Materia Orgánica</i>	51
2.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	52
2.2.1 <i>Análisis Granulométrico en roca caliza y Jales mineros</i>	52
2.2.2 <i>Medición de pH y CE en muestras de jales, suelo y roca caliza</i>	53
2.2.3 <i>Concentración total de EPT y EI en jales, y valores de fondo en suelos.</i>	53

2.2.4 Extracción de metales y metaloides, con agua en equilibrio con CO <sub>2</sub> en jales y roca caliza	54
2.2.5 Determinación de mineralogía asociada en los jales (DRX) y análisis semicuantitativo elemental e imagen de las partículas (MEB)	55
2.2.6 Prueba de Balance Ácido-Base (PN y PA) en jales y PN roca caliza	55
2.2.7 Pruebas de fertilidad en laboratorio Fertilab de Jales, Suelos y enmienda orgánica.	58
2.3. FORMACIÓN DE TECNOSUELOS	58
2.3.1 Caracterización de Tecnosuelos	59
2.3.2 Prueba de invernadero	61
<b>3 RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>62</b>
3.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE ROCA CALIZA Y JALES NO OXIDADOS	62
3.1 RESULTADOS DE PH Y CE EN JALES Y ROCA CALIZA	65
3.2 CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS (EPT's) Y ELEMENTOS DE INTERÉS (EI) EN JALES Y VALORES DE FONDO DE SUELOS ALEDAÑOS	66
3.2.1 Concentración de EPT y EI en jales	66
3.2.2 Valores de fondo en suelos aledaños a la presa de jales	68
3.3 GEODISPONIBILIDAD DE EPT'S EN JALES Y ROCA CALIZA	68
3.4 RESULTADOS DE MINERALOGÍA ASOCIADA EN LOS JALES (DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y MEB)	70
3.5 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE BALANCE ÁCIDO-BASE (PN Y PA) EN JALES Y PN EN ROCA CALIZA	71
3.5.1 Resultados de PN y PA en jales	71
3.5.2 PN en roca caliza	72
3.6 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE FERTILIDAD EN MUESTRAS DE JALES, SUELO Y ABONO ORGÁNICO	73
3.7 DESARROLLO DEL TECNOSUELO	73
3.7.1 Cantidad de roca caliza para neutralizar los jales	74
3.7.2 Fracciones de Tecnosuelo por medio de balance carga.	76
3.8 CARACTERIZACIÓN DE LOS TECNOSUELOS FORMADOS	79
3.8.1 pH y CE en los Tecnosuelos	79
3.8.2 Balance Ácido-Base en los Tecnosuelos	80
3.8.3 Concentración total de elementos químicos en los Tecnosuelos	81
3.8.4 Geodisponibilidad de EPT en los Tecnosuelos	82
3.9 EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES TECNOSUELOS A PARTIR DE EXPERIMENTOS DE GERMINACIÓN DE PASTOS (EXPERIMENTOS EN INVERNADERO)	83
<b>4. HOJA DE CÁLCULO EN EXCEL PARA DETERMINAR FRACCIONES DE CADA COMPONENTE EN UN TECNOSUELO.</b>	<b>85</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>87</b>
<b>6. REFERENCIAS</b>	<b>90</b>

<b>7. ANEXO</b>	<b>94</b>
7.1 DIFRACTOGRAMA EN MUESTRA DE JALES	94
7.2 CONTROLES DE CALIDAD EN LAS PRUEBAS REALIZADAS DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN	94
7.2.1 <i>Precisión y exactitud en resultado de pH, CE, Potencial de neutralización, determinación de azufre de sulfatos, Análisis de extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>.</i>	94



## Índice de tablas

Tabla 1. Densidad limitante para cada textura de suelo.....	31
Tabla 2. Parámetros a evaluar de un jal acondicionado para verificar la efectividad del tecnosuelo. ....	38
Tabla 3. Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el lixiviado de acuerdo con la NOM-052-SERMANAT-2005. ....	45
Tabla 4. Numero de malla y tamaño [ $\mu\text{m}$ ] en los tamices.....	53
Tabla 5. Cantidad de jal, suelo, roca caliza y abono orgánico para formar el tecnosuelo. ....	58
Tabla 6. Análisis Granulométrico para muestra de Roca Caliza .....	63
Tabla 7. Análisis Granulométrico para muestra de Jales .....	63
Tabla 8. Resultados en la caracterización de pH y CE de las muestras de jales compuestas. ....	65
Tabla 9. Resultados de pH y CE de los suelos aledaños a la presa de jales ...	65
Tabla 10. Resultados en la caracterización de pH y CE en la roca caliza proveniente de agua prieta. ....	66
Tabla 11. Concentración total de EPT en los jales.....	66
Tabla 12. Concentración total de EI de los jales en la presa.....	67
Tabla 13. Valores de fondo de los suelos aledaños. ....	68
Tabla 14. Extracción de metales y metaloides de las muestras compuestas, con agua en equilibrio con $\text{CO}_2$ , análisis realizado con ICP-óptico. ....	69
Tabla 15. Concentración de los EPT de la muestra de caliza en la caliza. ....	69
Tabla 16. Fases minerales identificadas en muestras compuestas de Jales. ...	70
Tabla 17. Análisis elemental semicuantitativo de partículas seleccionadas de las muestras compuestas de Jal. ....	71
Tabla 18. Obtención del PN y PA que predice la generación de acidez para las muestras de jales compuestas. ....	72
Tabla 19. Resultado de la prueba de potencial de neutralización de la roca caliza. ....	73
Tabla 20. Resultados promedio de la prueba de fertilidad para Jales, suelo y enmienda orgánica. ....	73
Tabla 21. Cantidad de caliza necesaria para neutralizar los jales.....	75

Tabla 22. Porcentaje de cada componente en el tecnosuelo, de acuerdo con el balance de carga realizado. ....	78
Tabla 23. Comparación de elementos en fertilidad en los 3 tecnosuelos estudiados con el suelo de referencia. ....	79
Tabla 24. Resultados de pH y CE en los Tecnosuelos .....	80
Tabla 25. Resultados de PN y PA de los diferentes tecnosuelos, así como la relación de PN/PA. ....	81
Tabla 26. Concentración de elementos químicos en los tecnosuelos, y comparación con valores de fondo de suelos de referencia. ....	82
Tabla 27. Resultados de Geodisponibilidad de EPT en los diferentes tecnosuelos. ....	82
Tabla 28. Porcentaje de germinación de pasto en tecnosuelos .....	83
Tabla 29. Evaluación de la altura de pasto después de 30 días. ....	84
Tabla 30. Evaluación de crecimiento en tecnosuelos a los 60 días. ....	85

## Índice de figuras

Figura 1. Comportamiento de pH en jales superficiales de la presa de jales no.3. Mapa elaborado con Qgis a partir de datos de 300 muestras tomadas del estudio del Laboratorio de Geoquímica Ambiental (Instituto de Geología, 2019) .....	8
Figura 2. Mapa de la presa de jales de acuerdo con su CE, 300 muestras .....	8
Figura 3. Variación de pH y CE a diferente profundidad de la presa de jales. ...	9
Figura 4. Concentración total de EPT en muestra de jales .....	9
Figura 5. Localización de Presa de Jales (cuadro verde), Sonora, México. [Datos del Mapa Google, INEGI 2020] .....	16
Figura 6. Unidad minera, Sonora. [Datos del Mapa Google, INEGI 2020] .....	17
Figura 7. Zona de drenaje de aguas ácidas en Mina Confesionario, España. (Gil, 2016) .....	23
Figura 8. Revegetación de Mina Piña del Hierro en España (Gil, 2016) .....	25
Figura 9. Adición de material neutralizante. (Aduvire, 2006) .....	27
Figura 10. Depósito de residuos mineros con varias capas estratificadas (Aduvire, 2006) .....	28

Figura 11. Toma de muestra en la presa de jales, fotografía del sitio y panorámica.....	48
Figura 12. Representación gráfica de distribución y ubicación de los sitios de muestreo compuestos.....	49
Figura 13. Representación gráfica de la ubicación de toma de muestras de suelos superficiales fuera del área de influencia, "F1". .....	50
Figura 14 Distancia de la zona donde se extrae la roca caliza (Agua Prieta, Sonora) respecto a la ciudad de Cananea, Sonora.....	51
Figura 15. Homogeneización y cuarteo de roca caliza de llegada (Izquierdo) y en malla 10 (Derecha).....	51
Figura 16. Cubetas con Caliza (Izquierda), Jales (Centro) y abono Orgánico (Derecha) .....	59
Figura 17. Bandeja amarilla (Tecnosuelo), azul (Tecnosuelo +MO) y Roja (Tecnosuelo + 2MOref) .....	59
Figura 18. Muestras de Tecnosuelo con ácido nítrico concentrado y peróxido de hidrogeno al 30%, pre-digestión.....	60
Figura 19. Filtrado y aforo de las muestras después de la digestión por microondas.....	61
Figura 20. Comportamiento de la Roca caliza de acuerdo al tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ ) y %Pasante. ....	64
Figura 21. Comportamiento de los Jales de acuerdo al tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ ) y %Pasante.....	64
Figura 22. Concentración total de EPT's en las muestras de jales compuestas. ....	67
Figura 23. Concentración de EPT's en los jales. ....	68
Figura 24. Imágenes de microscopia electrónica de barrido, tomada a 4 muestras compuestas. ....	71
Figura 25. Perfil de Tecnosuelo: A) Tecnosuelo, B) Altura de protección, C) Jales.....	76
Figura 26. Datos necesarios para realizar el balance y obtener las fracciones del tecnosuelo en la hoja de cálculo.....	86
Figura 27. Hoja de cálculo que brinda las fracciones de cada componente en el tecnosuelo .....	87
Figura 28. Difractograma de la muestra de Jales.....	94

## Resumen

La actividad minera es de gran importancia para el desarrollo de la sociedad; sin embargo; presenta un gran impacto ambiental, ya que las leyes de minerales de interés son muy bajas, y por tanto los residuos generados durante la flotación de minerales, denominados jales, superan por varios órdenes de magnitud al mineral de interés obtenido. Estos residuos mineros, al estar expuestos al agua y oxígeno, generan drenaje ácido de mina, muy a menudo con elementos potencialmente tóxicos disueltos que llegan afectar suelo y agua, si no se les maneja adecuadamente.

La disposición final de estos residuos mineros se encuentra en una gran extensión de terreno, al cual se le denomina presa de jales. Las presas de jales tienen una duración de vida, en las que al final de su vida útil, se busca que no existan problemas al ambiente y a la población de la región.

Los problemas que implica al no considerar el abandono seguro de una presa de jales son de gran riesgo, como en el caso estudiado de los jales mineros sobre terrenos de municipio del Oro de Hidalgo en el Estado de México, donde los análisis realizados a los cuerpos de agua identifican que el Hg y el As se presentan en concentraciones fuera de los límites máximos permisibles para aguas residuales y potables de acuerdo a las normas oficiales mexicanas (Agustin, 2005). Otro estudio realizado se encuentra en San Francisco del Oro, Chihuahua, donde se evaluó la contaminación en el suelo por Pb, Cd y As; donde todos los elementos sobrepasan los rangos establecidos por las agencias internacionales (Puga, 2006).

De manera que es muy importante el estudio para llevar a cabo el abandono seguro de una presa de jales, y dar cumplimiento a la normatividad oficial mexicana. Sin embargo, las normas oficiales no brindan detalles técnicos de cómo realizar el abandono seguro de la presa de jales, por tal motivo el presente trabajo presenta una propuesta de manejo seguro de una presa de jales en su etapa de cierre.

La presa de jales, propósito del presente estudio se localiza en Cananea, Sonora; con un área aproximada de 2000 hectáreas, está por llegar al final de su vida útil. El abandono seguro implica la colocación de una cubierta específica que cumpla con diferentes características, entre otras: evitar la oxidación de los compuestos sulfurados, controlar la acidez ocasionada por el drenaje de mina y permitir el desarrollo de una capa vegetal.

Dada la extensión de la presa, se requiere una gran cantidad de materiales específicos, que no existen de manera comercial, por lo que en este trabajo se diseñó y desarrollo una cubierta geoquímica denominada tecnosuelo que cumple con las características necesarias para el abandono seguro de la presa de jales. El desarrollo de la cubierta implicó los análisis geoquímicos a cada una de las muestras de jal, suelo de la zona, roca caliza y abono orgánico; para determinar la composición, geodisponibilidad de elementos potencialmente tóxicos, fertilidad, potencial de acidez y potencial de neutralización.

A partir de los resultados obtenidos se desarrolló una fórmula para la cubierta, que brinda la cantidad necesaria de jal, roca caliza, suelo y materia orgánica para que el tecnosuelo resultante presente las características y concentraciones similares a suelos de la zona.

Para evaluar la eficiencia de la fórmula desarrollada se formularon 3 tecnosuelos a diferentes concentraciones de abono orgánico y así buscar las mejores condiciones para una posible reforestación en la zona. De acuerdo a los análisis geoquímicos realizados en los tecnosuelos, se encontró que pueden prevenir el drenaje ácido de mina, ya que la relación entre el potencial de neutralización y potencial de acidez es mayor a 3, la cual se encuentra regulado por la NOM-141-SEMARNAT-2003. Además, la geodisponibilidad de los elementos potencialmente tóxicos se encuentra en concentraciones por debajo de los límites máximos permisibles regulados por la NOM-052-SEMARNAT-2005 reduciendo el riesgo ambiental y a la salud humana. Así mismo, de manera cualitativa se evaluó la germinación y crecimiento de pasto en cada uno de los tecnosuelos en experimentos de invernadero, la cual se desarrolló de manera favorable. Con estos estudios se logró la optimización de cada fracción en el tecnosuelo, logrando resultados favorables para la realización y aplicación de una cubierta geoquímica para el abandono seguro

de una presa de jales, previniendo la generación de drenaje ácido de mina y la geodisponibilidad de elementos potencialmente tóxicos, cumpliendo con las regulaciones ambientales de acuerdo a las normas oficiales mexicanas, y brindando características similares al suelo de referencia y llevarse a cabo en un futuro, una posible reforestación en la zona, en beneficio de la población y el medio ambiente.

Palabras clave: Tecnosuelo, elementos potencialmente tóxicos, abandono seguro, jales mineros, presa de jales, cubierta geoquímica, optimización.

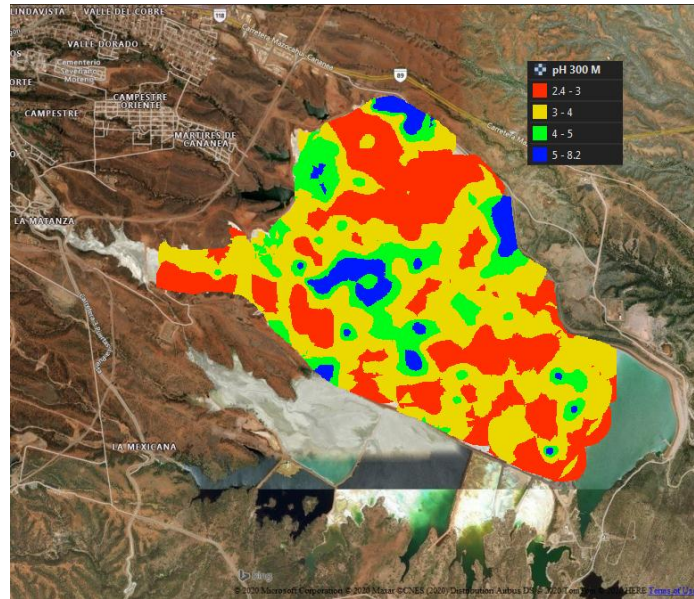
## Introducción

Con el inicio de la minería a cielo abierto de la unidad minera de Cananea en el año de 1944, se construyó una planta concentradora con grandes volúmenes de producción, con una capacidad de molienda de 12,000 ton/d. Para el año de 1965, ya existían las presas de jales 1 y 2, los cuales eran insuficientes para sostener el crecimiento proyectado, por lo que se construyó la presa de jales 3. La cortina tendría una altura de 45 metros y 210 metros de longitud. En 1970, la capacidad de molienda en la planta concentradora aumento a 20,000 ton/d. Y en la década de 1980, se comenzó la construcción de la concentradora 2, teniendo una capacidad de molienda total de 80,000 toneladas entre ambas plantas.

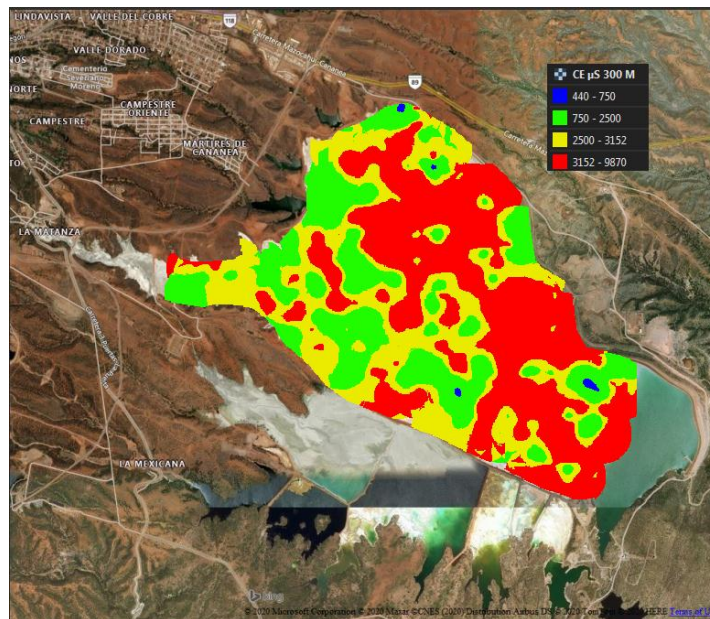
Durante varios años, la unidad minera tuvo varios problemas que afectaron al ambiente y a la población por las condiciones en las que se encontraba la presa de jales, para darle solución a estos problemas se hizo la construcción de otra presa de jales de mayor capacidad, que duplico la capacidad de las 3 anteriores y se le denomino “Bordo Definitivo”. Con varias ampliaciones y elevaciones de la cortina en los años siguientes, hay una estimación basada en imágenes de Google Earth de 2018, donde se calcula que la superficie actual de la presa de jales es de alrededor de 2100 hectáreas, y que su vida útil concluirá en 2025. (Moreno, 2017)

Estudios realizados por laboratorio de Geoquímica Ambiental, perteneciente al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología de la UNAM, muestran que la superficie de la presa de jales presenta valores de pH promedio de 4 y una conductividad eléctrica (CE) de 3 111 [ $\mu$ S/cm].

En las figuras 1 y 2 se muestra el comportamiento de pH y CE, respectivamente. Se puede observar el grado de acidez de la presa, identificando zonas altamente oxidadas con valores de pH inferiores a 3 y CE superior a 3 000  $\mu$ S/cm.



**Figura 1.** Comportamiento de pH en jales superficiales de la presa de jales no.3. Mapa elaborado con Qgis a partir de datos de 300 muestras tomadas del estudio del Laboratorio de Geoquímica Ambiental (Instituto de Geología, 2019)



**Figura 2.** Mapa de la presa de jales de acuerdo con su CE, 300 muestras

La presa de jales, se encuentra oxidada de manera superficial, ya que se encuentra en contacto directo con el ambiente; sin embargo, a mayor profundidad, hasta 100 cm (Figura 3), los jales presentan pH de 7, es decir, aún no han sufrido procesos de oxidación, no obstante representan un riesgo al ambiente ya que con el paso del tiempo pueden llegar a oxidarse y crear drenaje ácido (Instituto de Geología, 2019).



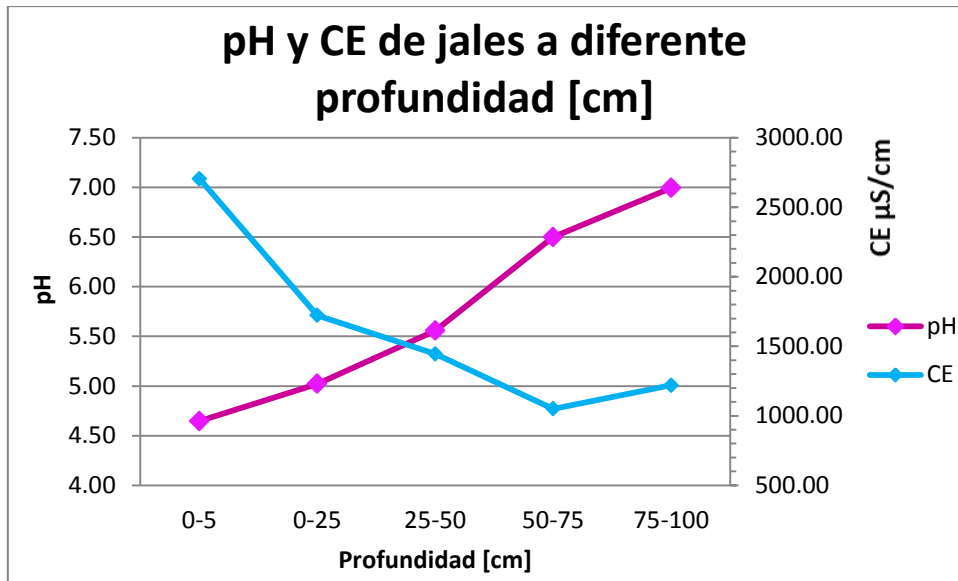


Figura 3. Variación de pH y CE a diferente profundidad de la presa de jales.

Estos jales presentan una concentración total de elementos potencialmente tóxicos (EPT) principalmente de Ba, Pb, Cr, As y Cd (Figura 4), por otra parte, la concentración geodisponible de los EPT se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles regulados en la norma 141-SEMARNAT-2003 (Instituto de Geología, 2019).

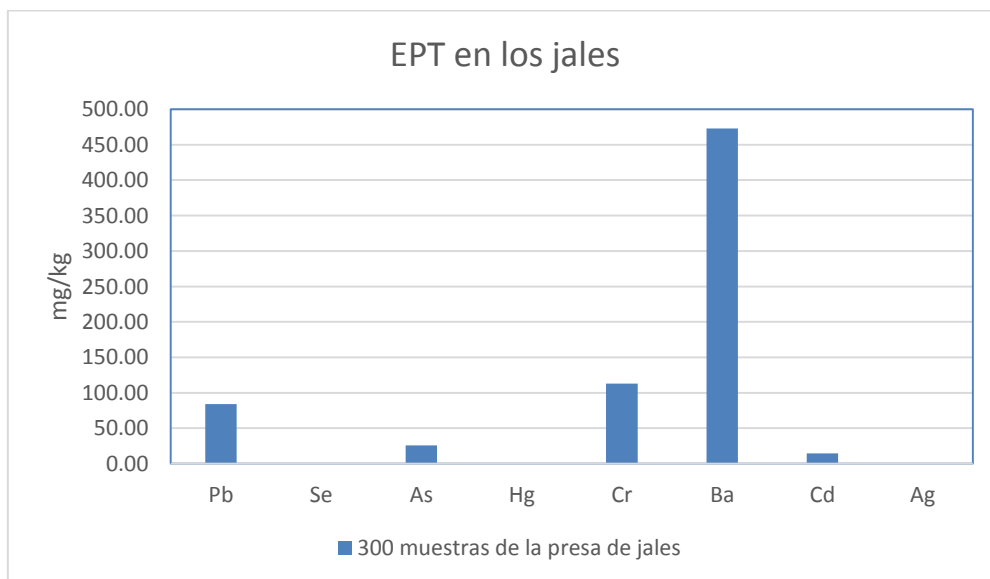


Figura 4. Concentración total de EPT en muestra de jales

El balance neto muestra que los jales grises o no oxidados van a ser generadores de acidez, por tal motivo se consideran como peligrosos y por lo tanto el abandono de la presa de jales debe considerar criterios específicos que controlen la peligrosidad de estos residuos.

Bajo este escenario, el presente trabajo propone una cubierta que permite controlar la potencial acidez, limite la dispersión eólica y permita el desarrollo de una cubierta vegetal. Dichas características cumplen con lo establecido en la normatividad mexicana para el abandono seguro de una presa de jales.

## Planteamiento del problema

Los estudios previos realizados a la presa de jales así como los realizados en el presente trabajo, muestran que, de manera superficial los jales se encuentran oxidados, pero que no hay geodisponibilidad de EPT. Los jales sub superficiales aún no presentan oxidación; sin embargo, son potenciales generadores de drenaje ácido de mina, de manera que hace necesaria una capa que permita por una parte, controlar la posible generación de acidez y que además permita el desarrollo de una capa vegetal.

De manera que controlar y diseñar un método sobre el abandono seguro de la presa de jales en Cananea, es de gran importancia en beneficio de la sociedad y el ambiente de la región. Para cumplir con este propósito, se plantea formular un tecnosuelo como posible cubierta geoquímica para el abandono seguro de la presa de jales.

Este tecnosuelo implica el uso de materiales geológicos y suelos de la zona; sin embargo, ambos materiales son una limitante en cualquier sitio minero. Por tal motivo se plantea la sustitución de una parte de estos materiales por los propios jales; sin embargo, la incorporación del jal, dado su potencial generación de drenaje ácido, obliga la incorporación de algún material neutralizante como son los carbonatos de calcio o roca caliza.

De manera que, conocidas las dimensiones en la presa de jales estudiada, se consideran factores importantes para desarrollar la cubierta, como es la cantidad y lugar de extracción de roca caliza, suelo fértil y si es requerido, el uso de algún abono orgánico. Planteados los componentes utilizados para el desarrollo del tecnosuelo, se considera un método para la optimización en cantidad de cada componente, y así desarrollar una fórmula que garantice el buen funcionamiento de cubierta en la presa de jales y la prevención de contaminación de los jales hacia el ambiente.

Las normas oficiales mexicanas, como la NOM-141-SEMARNAT-2003, evalúa si los jales son potenciales generadores de acidez, y si así es, se piden inclusiones de medidas que garanticen la protección al ambiente. De manera

que, el tecnosuelo propuesto debe garantizar una protección al ambiente y estar en cantidades suficientes para que pueda ser utilizado en un futuro al llevarse a cabo el abandono de la presa de jales.

## Hipótesis

El uso de una capa de tecnosuelo desarrollado a partir de criterios científicos, permitirá prevenir la oxidación de los jales, al evitar el contacto directo con el ambiente, como es el oxígeno del aire y agua. Por otra parte, uno de sus constituyentes, la roca caliza, neutraliza la acidez presente y la acidez que se pueda generar en un futuro, de manera que se evita la posible generación de drenaje ácido de mina y se controla la geodisponibilidad de EPT hacia el ambiente, cumpliendo con la regulación de la NOM-141-SEMARNAT-2003. La incorporación de un suelo aledaño a la zona y materia orgánica al tecnosuelo propuesto, brinda condiciones adecuadas para que se lleve a cabo la restauración de una cubierta vegetal, que cumpla con las funciones ecológicas de la zona.

## Objetivos

### Objetivo General

Diseñar y evaluar de una cubierta geoquímica o tecnosuelo para el abandono seguro de la presa de jales no.3 de Cananea, Sonora. De tal forma que garantice:

- a) Que la relación de potencial de neutralización entre potencial de acidez sea mayor a la que se establece en la NOM-141-SEMARNAT-2003, garantizando que el tecnosuelo no genere drenaje ácido de mina, de acuerdo con la cantidad optima de roca caliza agregada al tecnosuelo.
- b) Que el tecnosuelo no presente geodisponibilidad de EPT o se encuentren por debajo de los límites máximos permisibles regulados por la NOM-141-SEMARNAT-2003.
- c) Que el tecnosuelo brinde características similares al suelo de referencia (Suelo aledaño a la presa de jales sin afectaciones), como pH, CE y %MO.
- d) Que el tecnosuelo desarrolle condiciones adecuadas para que se lleve a cabo una reforestación de manera estable a la fauna endémica de la región.

## Objetivos específicos

- Análisis y selección de muestras representativas de jales.
- Caracterización física y química de jales, suelos, caliza y enmienda orgánica.
- Formulación y elaboración de tecnosuelo.
- Caracterización del tecnosuelo elaborado
- Avaluar en invernadero el desarrollo de un pasto comercial en el tecnosuelo formado.

## 1. Marco Teórico

La actividad minera es de vital importancia para el desarrollo de la sociedad, por lo que no se espera que en un futuro esta actividad disminuya, por lo tanto, es necesario que se tomen medidas que ayuden a un desarrollo sostenible, y sobre todo que minimice el impacto ambiental de dicha actividad.

Uno de los principales problemas de la minería se encuentra en el proceso de concentración, ya que las leyes de los minerales son muy bajas, y por tanto los residuos generados superan por varios órdenes de magnitud al metal obtenido. A manera de ejemplo, se cita el caso de concentración de cobre, donde por cada kilo de cobre se generan, por término medio, 500 kg de residuos de diversa peligrosidad denominados “jales” (Castells, 2012).

Estos jales se confinan con el fin de evitar la contaminación al ambiente. En realidad, dicho confinamiento difícilmente funciona al 100%, debido a problemas como escorrentía, filtraciones, mantenimiento y sismos. (Zúñiga, 1999).

En las zonas mineras donde el clima predominante es árido o semiárido, el proceso de contaminación de los suelos se da principalmente por la dispersión eólica de los residuos hacia el entorno; mientras que en climas húmedos se da por dispersión hídrica. En ambos casos, se ha documentado que la dispersión de los residuos mineros afecta grandes extensiones de terreno. (Martínez, 2015).

La presa de jales estudiado está ubicado al norte de Sonora (Figura 5), en esta zona la minería es su principal fuente de ingresos y empleo, le sigue en importancia el comercio y la ganadería.

El clima de la región es árido a semiárido, se caracteriza por veranos calientes e inviernos moderados; la temperatura media anual es de 15.3 °C. La flora que prevalece es con vegetación de pastizal y bosque de pino-encino. Así como la fauna que consiste en especies como sapo, salamandra, rana verde, tortuga de agua, camaleón, cachora, víbora sorda, víbora de cascabel, venado cola

blanca, puma, lince, coyote, jaguar, jabalí, liebre, conejo, ardilla entre otros. Las principales vertientes hidrológicas proceden de los ríos: Sonora, Bacanuchi y San Pedro. (INEGI, 2015)



Figura 5. Localización de Presa de Jales (cuadro verde), Sonora, México. [Datos del Mapa Google, INEGI 2020]

## 1.1 Unidad Minera

Es la unidad minera mayor productora de cobre en México (Figura 6), tiene reservas certificadas con barrenación que la ubican entre las 10 más grandes del mundo. La unidad minera opera una mina de cobre, dos concentradores y tres plantas SX-EW. (SGM, 2011).



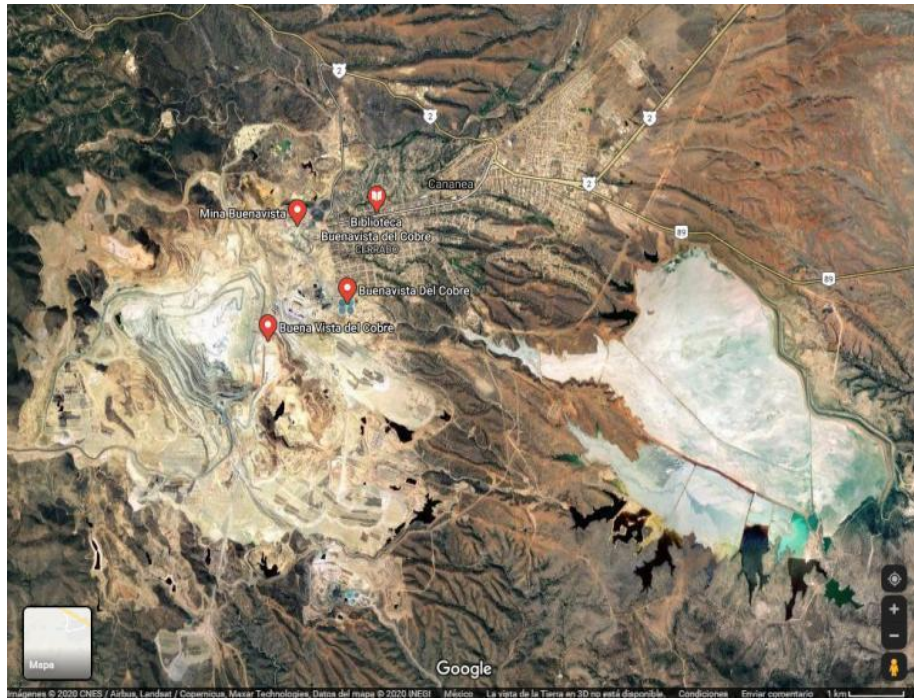


Figura 6. Unidad minera, Sonora. [Datos del Mapa Google, INEGI 2020]

### 1.1.1 Geología

La mineralización en esta zona es extensa, y cubre una superficie de aproximadamente 30 km<sup>2</sup>. La zona es económicamente importante en enriquecimiento supergénico, con zonas diseminadas y de calcocita (CuS), que se encuentran desarrolladas debajo del recubrimiento de óxido de hierro. Esta zona tiene un espesor promedio de 300 metros. Una zona mixta de sulfuros secundarios y primarios subyace a la capa de calcocita. La mineralización hipogénica, principalmente calcopirita (CuFeS), subyace ampliamente al cuerpo mineral. La molibdenita se produce en todo el depósito y su contenido tiende a aumentar con la profundidad.

El pórfido de cobre de la unidad minera se considera de clase mundial y única. Los resultados de exploración más profundos en el núcleo del depósito han confirmado un aumento significativo en las leyes de cobre. Las dimensiones actuales del yacimiento mineralizado son de 5x3 km, y se proyecta a más de un kilómetro en profundidad (SGM, 2011).

### 1.1.2 Procesamiento

La unidad minera utiliza sistemas de monitoreo de computadora de última generación en los concentradores, la planta de trituración y el circuito de flotación para coordinar entradas y optimizar operaciones.

En el concentrador original, el material con un grado de cobre superior al 0.38% se carga en camiones y se envía al circuito de molienda, donde las trituradoras rotativas gigantes reducen el tamaño del mineral a aproximadamente media pulgada, luego, el mineral se envía a los molinos de bolas, que lo muelen hasta obtener la consistencia de un polvo fino que denominan como tamaño de liberación del mineral económico de la ganga. El polvo finamente molido se agita en una solución de agua y reactivos, y, después se transporta a las celdas de flotación. El aire se bombea a las celdas, produciendo una espuma que transporta el mineral de cobre a la superficie, pero no a la roca residual o los relaves (jales). El cobre recuperado, con la consistencia de espuma, se filtra y se seca para producir concentrados de cobre con un contenido promedio de cobre de aproximadamente 24%. Los concentrados se envían por ferrocarril a fundición. En el segundo concentrador, el mineral con una ley de cobre superior al 0.57% se envía a un circuito de molienda trifásica, para posteriormente seguir el circuito explicado anteriormente de la concentradora original. De igual manera, los concentrados se envían por camiones o por ferrocarril a la fundición. Cuenta con una planta diseñada para procesar 1,500 toneladas de concentrado de cobre y molibdeno por día, con una recuperación de aproximadamente 80% de cobre y 50% de contenido de molibdeno.

La mina opera con instalación de lixiviación y tres plantas SX-EW. Todo el mineral de cobre con una ley inferior de 0.38%, pero superior a 0.25%, se entrega a los vertederos de lixiviación. Se produce un ciclo de lixiviación y descanso durante aproximadamente 5 años en los vertederos de la mina y de 3 años para el material de lixiviación triturado.

Actualmente mantiene 10.2 millones de metros cúbicos de solución de lixiviado en un inventario con una concentración de aproximadamente 1.2 g/L de cobre

por litro. Se cuenta 3 sistemas de riego para los vertederos y once presas para la solución de lixiviados. (COMMISSION, 2015)

El concentrador original tiene una capacidad nominal de molienda de 76,700 ton/d. El segundo concentrador comenzó a operar en 2015 con una capacidad de molienda nominal de 100,000 ton/d.

El material extraído en el 2018 fue de 297 millones de toneladas. En la mina se extraen 360,000 ton/d de material; de los cuales 76,000 ton/d es numeral para la planta de beneficio, 63,300 toneladas de mineral por día van a lixiviación y 120,000 toneladas por día es tepetate; por lo tanto, la relación roca mineral es de 1.5-1 (GRUPO-MÉXICO, 2018).

El Departamento de Geología de la mina, proporciona las siguientes reservas actuales:

- Reservas probadas: 2,283,000,000 toneladas con 0.58% de Cu; 1,960,000,000 toneladas con 0.22% de Cu.
- Reservas probables: 603,000,000 toneladas con 0.55% de Cu y 376,000,000 toneladas con 0.21% de Cu (SGM, 2011).

## 1.2 Jales

El avance de la tecnología en los procesos de obtención de minerales en México propició la introducción de procesos metalúrgicos como la flotación y la cianuración a inicios del siglo XX, por lo tanto, fue necesario explotar mayores volúmenes de mineral con valor comercial; y a su vez, se propició a la generación de una mayor cantidad de residuos mineros. (Romero, 2010).

La norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, establece que los jales son residuos sólidos de las operaciones primarias de separación y concentración de minerales. Específicamente, los jales se definen como los residuos que se producen en los procesos de concentración de minerales en una operación minera, donde se forman depósitos superficiales denominados presa de jales, lugar donde se concentran estos residuos. Los jales presentan

características físicas como son el tamaño de partícula que varía de 2  $\mu\text{m}$  hasta 0.2 mm. El tamaño de las partículas en los jales se establece principalmente por el tamaño de liberación que presenta el metal de interés con la ganga del mineral.

Debido al pequeño tamaño de las partículas de los jales y al estar almacenados a la intemperie, pueden presentar algunos problemas en el ambiente como son: la dispersión por acción del agua (precipitación pluvial) y del viento. Los jales se depositan en los suelos cercanos al sitio de almacenaje, o integrándose a cuerpos superficiales de agua, los cuales pueden ser transportados a varios kilómetros de su origen. Los jales se manejan mezclados con agua, y van desde 30% a 40% de sólidos, formando una pulpa, donde posteriormente por medio de decantación se lleva a cabo la separación del agua en la presa de jales. Estos depósitos pueden sufrir una falla por inestabilidad por la presencia de agua, lo cual permite la liberación del residuo.

A nivel mundial se han establecido lineamientos de protección ambiental para evitar la liberación de jales durante la operación de las minas. En México, las medidas establecidas para evitar la dispersión, arrastre y transporte de jales se encuentran contenidas en las normas oficiales mexicanas. (Santos, 2013).

### 1.3 Plan de Cierre

El plan de cierre de una presa de jales debe estar destinado a evitar los posibles traumas que implican los antiguos cierres. Además, debe considerarse el daño ambiental, así como sus efectos económicos y sociales sobre las comunidades situadas en el área de influencia (Muñoz, 2008).

Los objetivos que se deben cumplir durante el plan de cierre de la presa de jales son las siguientes:

- Asegurar el cumplimiento de leyes y normas que regulan el cierre, así como de los compromisos asumidos por la empresa.
- Asegurar el cierre y estabilidad de las labores mineras en la presa.

- Prevenir la erosión, remoción en masa y subsidencia asociada a los efectos de la disposición de los jales.
- Estabilizar y proteger los jales.
- Resolver satisfactoriamente lo relativo a suelos contaminados en el área de influencia.
- Restaurar en lo posible la hidrología original del sitio o al menos una red hidrológica estable.
- Prevenir la generación de drenaje ácido, y si es necesario, tratarlo para reducir su acidez y contenido metálico a nivel legal y ambientalmente aceptable.
- Asegurar el cumplimiento de las condiciones requeridas para que el sitio intervenido recupere sus cualidades para el desarrollo de la vida silvestre, o permita el desarrollo de nuevas actividades humanas.
- Procurar que el cierre implique el menor grado posible de los efectos socioeconómicos negativos para los trabajadores y la comunidad situada en su área de influencia económica y laboral.
- Establecer las medidas necesarias de seguimiento y control de resultados en el plan de cierre.

#### 1.4 Drenaje ácido

Los drenajes ácidos de mina (DAM) son uno de los principales impactos generados por la actividad minera. El drenaje ácido de mina se genera debido a la oxidación de sulfuros metálicos, principalmente los sulfuros de hierro, causada por el oxígeno atmosférico y del agua.

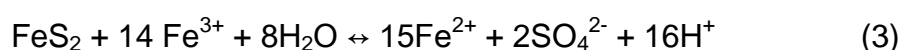
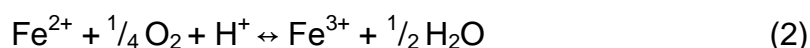
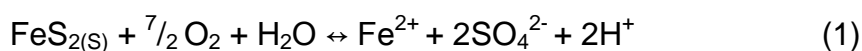
Los jales que se generan principalmente en la concentración de minerales de Zn, Pb, Ag y Cu, contienen sulfuros metálicos residuales como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) que son la fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como son As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, Hg, Cr, etc. (Sepúlveda, 2004).

El drenaje ácido se genera por la oxidación de los sulfuros metálicos y forma soluciones que se caracterizan por tener valores bajos de pH y altas

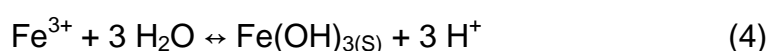
concentraciones de elementos potencialmente tóxicos disueltos, que cuando se transportan se convierten en un problema ambiental, ya que contaminan los suelos, los sedimentos, aguas superficiales y aguas subterráneas.

La oxidación de los jales que contienen sulfuros metálicos reactivos, necesitan condiciones climáticas apropiadas (agua o una atmósfera húmeda y aire). La oxidación de los sulfuros metálicos en los jales es muy limitada durante la operación de la mina, lo cual se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, ya que los jales se hayan depositado en la presa de jales y la porosidad del mismo permite la difusión del oxígeno atmosférico. Por lo general, los jales recién salidos de mina no presentan ninguna alteración, comúnmente son de color gris, después que ocurre la oxidación, es cuando los jales presentan una coloración café, amarilla o roja (Figura 7).

Los procesos de oxidación en los jales que generan acidez, se ven reflejados en los bajos valores de pH, tanto en los jales como en los lixiviados. Se puede sugerir que la generación de acidez se debe la oxidación de la pirita, de acuerdo a las siguientes reacciones estequiométricas: (Pérez, 2013)



En la primera etapa, reacción (1), la oxidación del sulfuro mineral ( $\text{FeS}_2$ ) genera  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}^+$ , el pH se mantiene en valores por arriba de 4.5. Después, el  $\text{Fe}^{2+}$  se oxida a  $\text{Fe}^{3+}$ , reacción (2), donde el  $\text{Fe}^{3+}$  actúa como agente oxidante, reacción (3), pero si el pH se encuentra entre 2.3 y 3.5, el  $\text{Fe}^{3+}$  precipita como hidróxido ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), el cual es un sólido amarillo, naranja o rojo, provocando una disminución en el pH, reacción (4).



Es muy importante aclarar que no siempre los jales mineros producen drenaje ácido, ya que hay un balance entre los minerales productores de ácido

(sulfuros metálicos) y los minerales con capacidad de neutralizarlos (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos). Por ello, si la capacidad de neutralización excede la capacidad de generación de drenaje ácido, se consumirá toda la acidez generada y las soluciones que drenen del depósito de jales tendrán un pH cercano al neutro. (Romero, 2010)



Figura 7. Zona de drenaje de aguas ácidas en Mina Confesionario, España. (Gil, 2016)

### 1.5 Prevención en la generación de aguas ácidas

Una forma efectiva de evitar la generación de acidez es mediante el control y la eliminación de los parámetros y las condiciones que favorecen la formación de aguas ácidas. Para lograrlo, es necesario cumplir con algunas de las siguientes medidas:

- 1) Restringir el ingreso del agua en los residuos expuestos a la meteorización.
- 2) Minimizar la penetración del oxígeno a través del aire o del agua mediante el empleo de materiales impermeabilizantes.

- 3) Aislar los minerales sulfurosos, mediante un proceso de flotación u otro tratamiento previo al vertido.
- 4) Adicionar materiales alcalinos para controlar el pH del medio.
- 5) Emplear bactericidas para inhibir la acción bacteriana a los minerales sulfurosos.

Con dichas medidas se pretende limitar la formación de aguas ácidas, mediante la supresión de los mecanismos de oxidación de los elementos contaminantes contenidos en los efluentes. Esto se puede conseguir mediante la exclusión de uno o varios de los elementos protagonistas de las reacciones de oxidación y reducción de los sulfuros, o controlando el medio en el que se encuentran dichos sulfuros. (Aduvire, 2006)

De manera general, en el **método de barrera** se recurre al empleo de métodos físicos que actúan como barreras que impiden la mezcla y dilución de los distintos efluentes o reducen el potencial ácido generador de los mismos. Principalmente, se encuentran técnicas de vegetación de los terrenos y el aislamiento del agua y del oxígeno.

**Revegetación en los terrenos:** Se produce la compactación de los materiales y la reducción de espacios vacíos, lo que evita el ingreso y la circulación del oxígeno y del agua a través de los estériles y residuos que contienen sulfuros. Además, se incrementa la evapotranspiración y se restringe la migración del agua y posiblemente del oxígeno hacia los estériles y residuos contaminantes, en la figura 8 se muestra un ejemplo de revegetación. (Aduvire, 2006)





Figura 8. Revegetación de Mina Piña del Hierro en España (Gil, 2016)

En relación a la exclusión de oxígeno, uno de los métodos más efectivos es el **recubrimiento o inundación** del material sulfurado con una cubierta de agua o en un tipo de disposición subacuática, pues la baja solubilidad del oxígeno en el agua (10-12 mg/L) y su reducida velocidad de difusión, la cual es aproximadamente 4 órdenes de magnitud inferior que en el aire, sustentan la factibilidad de este procedimiento, el cual puede ser aplicado a diferentes tipos de materiales o componentes de un emplazamiento minero. Algunos puntos que se deben cuidar son:

- ✓ Mantenimiento de la cubierta acuática: Para limitar la difusión de oxígeno, por lo general, se requiere una cubierta de agua de aproximadamente de 0.5 metros.
- ✓ Movimiento del agua en la cubierta: Para prevenir el arrastre de finos, se suele colocar un estrato de roca gruesa sobre el material que se requiere aislar, con lo cual también se evita el efecto del movimiento y la eventual turbulencia de esta cubierta de agua en el arrastre de finos.
- ✓ Contaminantes solubles: Esto puede ser especialmente problemático si se trata de materiales oxidados que se requieran aislar. En este sentido, la mezcla de estos materiales con la cal o caliza finamente molida puede proporcionar el suficiente control químico sobre los productos solubles. (Rodríguez, 1997)

Cabe mencionar que las cubiertas no eliminan por completo el flujo de oxígeno de los mecanismos conocidos y naturales del transporte de oxígeno tales como: la convección por diferencias de concentración en una pila o botadero, advección causada por la diferencia de presiones en el flujo afuera de una pila y por el flujo difusivo dentro de una pila.

Ahora bien, respecto a la exclusión del agua del sistema de intemperización, esta se materializa fundamentalmente mediante las cubiertas que impiden o reducen significativamente el flujo del agua dentro de los materiales sulfurados.

En el caso de **eliminación de sulfuros**, es posible utilizar la flotación de un concentrado de pirita cuando se trata de jales. En tal sentido, se debe buscar una alternativa de disposición de este producto. En algunas minas este concentrado de pirita se combina con cemento y es utilizado como relleno subterráneo. Si se produce oxidación, la estabilidad física y química del relleno puede resentirse. Por lo tanto, se requiere de pruebas de evaluación de estabilidad física y química del relleno a fin de cuantificar la potencialidad de este método a largo plazo. Para los desmontes de mina, la segregación o aislamiento de materiales sulfurados sólo es posible si existe una zona geológicamente distinta o si se permite la identificación relativamente fácil de este mineral. Las medidas incluyen encapsulamiento de este material, conjuntamente con los aditivos alcalinos que puedan ser necesarios para evitar generación futura de acidez. (Rodríguez, 1997)

**Adición de material alcalino:** Los minerales de la ganga que acompañan a los sulfuros son importantes en el control de las condiciones físico-químicas del medio. La oxidación de los sulfuros resulta en la acidificación del agua intersticial en los residuos mineros y esto, a su vez, conlleva a la disolución de los metales contenidos. Esta agua ácida reacciona con los minerales no sulfurados de la ganga. Este proceso donde los  $H^+$  son consumidos, se le conoce como neutralización, la cual permite el amortiguamiento del pH en el agua con la formación de nuevas especies químicas mediante reacciones de adsorción, coprecipitación e intercambio iónico para el control de la movilidad de los elementos disueltos. (Aduvire, 2006)

La adición de sustancias alcalinas o rocas básicas (figura 9) es una medida de control adecuado a corto plazo, aunque en algunos casos su efectividad puede notarse a largo plazo, dependiendo de la cantidad, tipo y grado de reacción de los minerales sulfurados. Algunos de los minerales que pueden elevar el pH de las soluciones ácidas generadas por la oxidación de sulfuros son minerales tipo carbonatados, hidróxido de aluminio y aluminosilicatos.



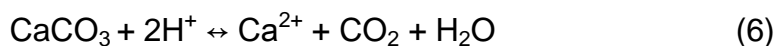
Figura 9. Adición de material neutralizante. (Aduvire, 2006)

Existen diversos minerales carbonatados, entre los cuales la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y la dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) se destacan por su gran importancia y abundancia. A continuación, se describe la disolución de la calcita y de la dolomita en medios ácidos.

La disolución de la calcita puede ser descrita por la reacción (5)



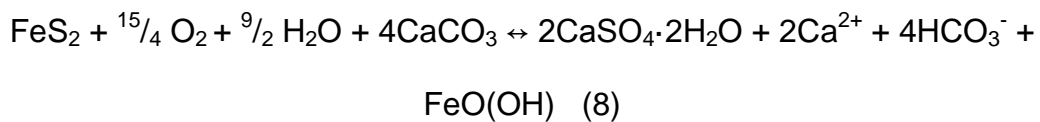
Mientras que la disolución de calcita en medios ácidos (pH menor a 6) se lleva a cabo por la reacción (6)



Por otro lado, la disolución de dolomita en medios ácidos se describe a continuación:



En la disolución de estos minerales carbonatos se liberan  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$  que se encuentran en solución y aumentan la alcalinidad del agua permitiendo un amortiguamiento mayor del pH. El mecanismo de amortiguamiento de la oxidación de la pirita a través de un carbonato genera sulfato disuelto y calcio que precipita en forma de yeso, de acuerdo con la reacción (8)



Conforme los carbonatos se disuelven, el pH se mantiene en valores neutros, lo cual favorece la precipitación de hidróxidos metálicos cristalinos y amorfos. (Morales, 2016)

En algunos casos se suelen colocar capas estratificadas e intercaladas de material alcalino junto con los estériles y los jales, tal como se observa en la figura 10.

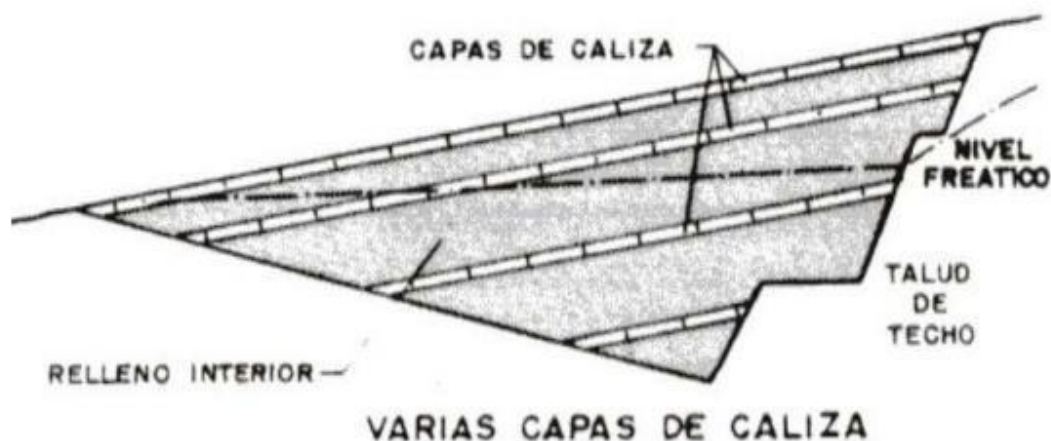


Figura 10. Depósito de residuos mineros con varias capas estratificadas (Aduvire, 2006).

**Método de inhibición bacteriana:** Si se logran eliminar los microorganismos (bacterias como el *Thiobacillus ferrooxidans*) que contribuyen a la oxidación de

los sulfuros y que posteriormente generan drenaje ácido, se puede llegar a reducir hasta un 50% el proceso de acidificación. Entre los bactericidas más eficientes se encuentran los surfactantes aniónicos y los ácidos orgánicos. El detergente aniónico más eficaz y económico utilizado es el sodio lauril sulfato (SLS), que se aplica sobre la superficie de la escombrera en forma de solución diluida en concentraciones del orden de 25 ppm, con la que se saturan los primeros 20 o 30 cm de profundidad, que es la zona de oxidación de los sulfuros almacenados en la escombrera. Este tratamiento es muy efectivo durante unos meses cuando los estériles son propensos a formar aguas ácidas antes de la vegetación, debiendo aplicarse mediante riego por aspersión durante la nivelación de los estériles y antes del extendido del suelo vegetal. (Aduvire, 2006)

### **1.6 Reforestación de una presa de jales**

Actualmente algunas empresas mineras han optado por la reforestación de sus presas de jales como medida correctiva al impacto ambiental que estos provocan. Dicha acción consiste en compatibilizar el uso de los recursos mineros y la mantención del recurso natural. De este modo, el área que ha sido degradada por la actividad minera puede ser reintegrada a su entorno, incluso en las zonas áridas.

Esta iniciativa no ha sido nada fácil, debido a que los jales están lejos de constituir un suelo, ya que sus características físicas, químicas y biológicas son las más adversas al establecimiento de la vegetación, ya sean gramíneas, arbustos o árboles. Uno de los principales impedimentos para que el jal constituya un suelo, es la falta de materias orgánicas y de nutrientes, ya que impide el desarrollo de microorganismos y, a la vez, influye en la permeabilidad, y consecuentemente en la humedad. Los materiales sulfurosos juegan un papel importante ya que si se exponen a la intemperie se oxidan, generando acidez, incrementando la solubilidad de metales y, en cadena, desfavoreciendo a la flora y a la fauna. Es por este motivo que, en la reforestación del suelo en una presa de jales se busca: la conformación del terreno, la restitución de la estructura del suelo, el establecimiento del equilibrio

hidrológico y el favorecimiento de la actividad microbiana a través del suministro de materia orgánica, nutrientes y eliminación de acidez y toxicidad.

Existen dos alternativas para obtener un suelo que contenga materia orgánica y microorganismos, y que, además permiten el enraizamiento y favorecen el ciclo de nutrientes y del agua:

- 1) Formar un suelo a partir de materiales sustitutos: Crear un suelo apto a partir de una mezcla determinada de subsuelo y estéril triturado, sometido a la intemperie. Es importante que los estratos tóxicos sean aislados y que el material de granulometría más adecuada se reserve para la superficie.
- 2) Utilización del suelo ya conformado: Consiste en incorporar una capa de tierra vegetal en la superficie, que, a largo plazo resulta ser el sistema más eficaz, y posiblemente el más económico para la implementación de una cubierta vegetal, ya sea de tipo herbáceo, arbustivo o arbóreo. El espesor de esta capa dependerá del uso programado y de la disponibilidad del suelo. La profundidad debe ser tal que, permita la infiltración del agua y el desarrollo del sistema radical. (Valdebenito, 1998).

Sin embargo, el jal depositado modifica las características originales del suelo vegetal, incrementa la disponibilidad de los metales, y, en algunos casos se genera la formación de amoníaco y reducción de materia orgánica y nutrientes. Además, disminuye el número de bacterias, lombrices y semillas viables, por lo tanto, es indispensable que una vez extendido el suelo vegetal sobre la superficie del jal, se apliquen tratamientos especiales. También es importante considerar la densidad del suelo, ya que se encuentra directamente relacionada con el desarrollo del sistema radicular, el cual se ve limitado por una densidad superior a  $1.5 \text{ g/cm}^3$  en suelos arcillosos y  $1.7 \text{ g/cm}^3$  en suelos arenosos, en la tabla 1 se muestran los valores correspondientes a las densidades máximas soportadas por las plantas para cada textura de suelo.

Tabla 1. Densidad limitante para cada textura de suelo.

Textura	Densidad máxima soportada por las plantas (g/cm <sup>3</sup> )
Arena gruesa	1.60
Arena fina	1.50
Arcilla-limosa	1.45
Arena	1.30

Una vez preparado el suelo, sigue el análisis químico del mismo, con el fin de poder determinar la cantidad de nutrientes, materia orgánica o neutralizantes necesarios para corregir la acidez del suelo. La adición de fertilizantes inorgánicos es una práctica común en la corrección de deficiencias nutricionales del suelo, tanto en tierras cultivadas como en las áreas restauradas. En el caso de la reforestación de la presa de jales es más demandante, debido a la necesidad de establecer la cubierta vegetal. El empleo de fertilizantes con materia orgánica aumenta la retención de nutrientes, la materia orgánica es de asimilación más lenta, absorbe los nutrientes, y tiene efecto positivo sobre la humedad. Los elementos críticos sobre los suelos de jales son el nitrógeno y el fósforo. El nitrógeno es un elemento esencial para la vida vegetal, y el fósforo difícilmente se encuentra en los jales, este compuesto presenta la ventaja de no lixiviarse como el nitrógeno. Los compuestos de nitrógeno más empleados son: el nitrato de sodio, urea, sulfato de amonio, y amoníaco. En cuanto al fósforo, los compuestos más usados son: fosfatos de amonio, superfosfatos simples o triples, ácido fosfórico o roca fosfática. La aportación de materia orgánica mejora las características físicas y químicas del suelo, además aumenta la capacidad de retención de agua.

Otro factor fundamental es el establecimiento de la fauna edáfica. Los microorganismos aceleran la vegetación, actúan sobre el ciclo de nutrientes, también protegen a las raíces de las condiciones adversas. La fauna edáfica es variada: hongos, bacterias, actinomicetos, algas, protozoos y virus. Siendo los grupos más importantes las bacterias y hongos. Las bacterias participan en

distintos ciclos de nutrientes para las plantas, y los hongos participan activamente en la descomposición de materia orgánica. Conjuntamente mejoran la estructura del suelo a través de la producción de gomitas, que actúan como un escudo alrededor de las raíces, protegiéndolas del ambiente agresivo existente en los jales.

El éxito de la reforestación de una presa de jales, depende en gran medida de ciertos factores, siendo los más importantes: el estado físico del suelo, el contenido de nutrientes, la presencia de elementos tóxicos y la selección de las especies más adecuadas a las condiciones del clima. La topografía y las características edáficas, pueden ser manipuladas con cierta facilidad, sin embargo, el clima no es controlable, por lo tanto, es la mayor condicionante para la selección de especies. Se deben definir ensayos experimentales con los que se podrá determinar cuáles son las especies que lograrán sobrevivir a un ambiente tan agresivo como lo es la superficie de un embalse de relaves. Los ensayos realizados son de suma importancia debido a que los resultados obtenidos en una reforestación no son extrapolables de un embalse a otro, ya que son diferentes en composición, la cual dependerá del mineral procesado.

En la plantación de vegetales, los factores más relevantes para la rehabilitación de una presa de jales, son la calidad y el cuidado de las plantas, los métodos de plantación, la época de plantación, la competencia con otras especies vegetales y la compactación del suelo. En el trabajo de reforestación, por lo general, son utilizados árboles jóvenes de pequeño y mediano tamaño, hasta una altura de 1.5 metros. (Valdebenito, 1998)

### **1.7 Uso de tecnosuelo para cubierta de presa de jales**

Un tecnosuelo se define como una mezcla sólida de materiales naturales o sintéticos, minerales u orgánicos que, colocado en superficie, permite la rápida integración de los componentes residuales antropogeomorficos en los ciclos biogeoquímicos así como el cumplimiento de las funciones, ambientales y



productivas del suelo, mejorando la situación ambiental precedente. (Macías, 2004; 2007)

Los jales no están catalogados como suelos, ya que solo están conformados de material particulado fino y homogéneo (arenas y lamas), sin estructura, con ausencia de nutrientes esenciales, alto contenido de elementos tóxicos y casi nula actividad biológica (ausencia de microorganismos que permitan el ciclado de la materia orgánica y de los nutrientes del suelo). Por lo tanto, para poder introducir una cubierta de tecnosuelo funcional y sustentable a través de programas de reforestación, es necesario incorporar acondicionadores de sustrato con la finalidad de:

- ★ Mejorar las propiedades físicas de los jales, tales como aireación, infiltración, retención de humedad y estabilidad de los agregados, entre otros.
- ★ Mejorar las propiedades químicas de los jales, como fertilidad, pH, capacidad de intercambio catiónico, entre otros.
- ★ Disminuir la biodisponibilidad de los metales, mediante mecanismo de adsorción y/o precipitación.

Los acondicionadores, además de mejorar las condiciones físicas, químicas y microbiológicas de los jales, también deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- ★ Ser económicos, fáciles de manejar y de aplicar en terreno.
- ★ Encontrarse disponibles localmente, en cantidades suficientes o bien ser fáciles de producir.
- ★ Ser compatibles con las especies vegetales seleccionadas para el programa de reforestación.
- ★ No deben provocar impactos ambientales secundarios en el sitio donde se van aplicar.

Existen diferentes tipos de acondicionadores de sustrato, pueden ser orgánicos, inorgánicos o mezclas. El tipo y cantidad de acondicionadores dependerá de cada depósito de jal.

**Acondicionadores orgánicos:** Son materiales de origen vegetal y/o animal resultante de la descomposición microbiana de la materia orgánica. Los

acondicionadores orgánicos más usados para mejorar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los jales mineros son:

- Residuos vegetales (agroindustriales, agrícolas, podas municipales y de jardín, domésticos, etc.)
- Estiércoles o guanos de aves o animales.
- Residuos forestales (aserrín, viruta, ramillas, etc.)
- Compost de diversos orígenes (ejemplo los desechos orgánicos domiciliarios).
- Lodos de procesos agroindustriales (ejemplo purines de cerdos).
- Residuos de las plantas productoras de celulosa y de papel.
- Biosólidos o lodos del tratamiento de aguas servidas domiciliarias.

Estos acondicionadores orgánicos mejoran las características físicas, químicas y microbiológicas. Son fuente de varios nutrientes esenciales para las plantas, y de este modo elevan el potencial de fertilidad de los jales. Además, contribuyen a incrementar el desarrollo radicular de las plantas mejorando el sostén de estas, también aportan hormonas que influyen positivamente los mecanismos fisiológicos de las especies vegetales. (Santibáñez, 2011)

Como ya se mencionó, los acondicionadores orgánicos tienen efectos positivos sobre las propiedades físicas del tecnosuelo, tales como:

- ♣ Incrementar la capacidad de retención de humedad de los jales. Debido a la alta porosidad y carga negativa de la materia orgánica, es posible retener una cantidad de agua equivalente a 20 veces su peso.
- ♣ Mejorar la porosidad de los jales. Facilita la recirculación del agua y del aire a través de estos materiales.
- ♣ Estimular el desarrollo radicular de las plantas. Si el contenido de materia orgánica es alto, mayor será el desarrollo radicular, lo que permite a las plantas explorar un mayor volumen de sustrato para satisfacer sus necesidades nutricionales y de agua. Esto permite un mejor control de la erosión de los jales.

- ♣ Mejorar la estructura de los jales, dándole una mayor resistencia contra la erosión y una mejor permeabilidad, aireación y capacidad para almacenar y suministrar agua a las plantas.
- ♣ Otorgar un color más oscuro al sustrato, aumentando la temperatura y las reacciones bioquímicas que allí se desarrollen.

Los efectos sobre las propiedades químicas que aporta el acondicionador orgánico al tecnosuelo son:

- ♣ Aumentar la capacidad de intercambio catiónico de los jales, lo que se refleja en una mayor capacidad para retener y aportar nutrientes a las plantas, elevando su estado nutricional.
- ♣ Favorecer la fertilidad de los jales mediante la liberación de nutrientes esenciales para las plantas, entre los cuales se destacan el nitrógeno (N), el fósforo (P), el azufre (S) y algunos elementos menores. No solo aportan nutrientes de rápida liberación, como los fertilizantes químicos, sino también los de lenta liberación.
- ♣ Incrementar la capacidad buffer o amortiguadora de los jales; es decir, su habilidad para resistir cambios bruscos en el pH cuando se producen reacciones químicas, como la oxidación de la pirita, las que generan drenaje ácido o bien cuando se liberan sustancias o productos que dejan residuo ácido o alcalino.
- ♣ Reducir la toxicidad de los metales presentes en altas concentraciones en los jales para el correcto desarrollo de plantas y otros organismos. La materia orgánica tiene la capacidad de neutralizar las formas solubles de los metales con carga positiva (cationes) contenidas en los jales, tales como los iones divalentes de cobre y zinc. (Santibáñez, 2011).

En cuanto a los efectos, sobre las propiedades biológicas, que aporta el acondicionador orgánico al tecnosuelo son:

- ♣ Aumentar la actividad biológica de los jales. Mejora el componente microbiano desde un nivel prácticamente inexistente en el jal, además aporta la fuente de energía (nutrientes y carbono) necesaria para su funcionamiento.

- ♣ Incrementar la biomasa microbiana del sustrato encargada de la mineralización o descomposición de los compuestos orgánicos presentes en la masa vegetal y animal muerta y de la liberación de los nutrientes para las plantas (ciclado de nutrientes).

Por otro lado, los **acondicionadores inorgánicos** generalmente se incorporan en los tecnosuelos para mejorar las propiedades físicas como son: la granulometría o la textura, la tasa de infiltración, la porosidad y la estructura, el grado de compactación, entre otros. También son usados para controlar algunos factores químicos inadecuados del sustrato, tal como la acidez o la biodisponibilidad excesivas de metales.

Los acondicionadores inorgánicos más utilizados para mejorar las propiedades físicas de los jales mineros son:

- Cenizas (ya sea de la combustión de madera o bien, de productos de combustión).
- Gravas y ripios (disponibles dentro de las mismas plantas mineras, como las marinas, estériles y los ripios de lixiviación).
- Suelos de escarpe.
- Arena.
- Sedimentos (de canales de regadío, de dragados de muelles).
- Óxidos de hierro.
- Fosfatos, yeso, zeolitas (aluminosilicatos) naturales o sintéticas.
- Lodos de plantas siderúrgicas (hierro y acero).

Los acondicionadores inorgánicos más empleados para mejorar problemas de pH en los relaves son: (Santibáñez, 2011).

- Cal.
- Cenizas.
- Conchuela pulverizada.

La dosis de aplicación de los acondicionadores orgánicos e inorgánicos en los jales, para la formación de un tecnosuelo, depende de las limitaciones

específicas que deben ser abordadas y de las características propias de los acondicionadores que serán utilizados.

Una buena aproximación, es tomar como referencia un suelo local, saludable, y usar sus parámetros fisicoquímicos como objetivos meta. Por ejemplo, se puede usar el contenido de materia orgánica del suelo local como referencia para el sitio que será manejado. Es importante tener presente que una gran fracción de materia orgánica aplicada se descompondrá en dióxido de carbono y agua en un periodo de tiempo relativamente corto. Por ello, si el suelo natural posee un 2% de materia orgánica, entonces se sugiere duplicar la adición a un 4% como una forma de compensar la descomposición inicial rápida. La velocidad de descomposición depende de la proporción de C:N y del tipo de compuesto que debe ser agregado. Es importante considerar que, si se incorpora una dosis de materia orgánica muy superior a la de los suelos aledaños, es probable que el sistema presente problemas de invasión de malezas y especies oportunistas, en desmedro de las especies nativas y endémicas. Otro problema que se puede ocasionar es la lixiviación de contaminantes hacia las aguas subterráneas, dichos contaminantes pueden ser: nitratos, metales pesados, entre otros.

La segunda opción consiste en recopilar información de las dosis de aplicación que han sido usadas en sitios similares. Por último, una tercera aproximación se basa en usar protocolos de laboratorio, por ejemplo, la adición de cal a un sustrato ácido se determina a través de protocolos de laboratorio que permiten calcular la relación ácido-base del sustrato, esta información junto con el pH final deseado permite estimar la dosis adecuada de adición de cal.

En la tabla 2 se citan las características que tienen que ser evaluadas para monitorear la efectividad del tecnosuelo. (Santibáñez, 2011)

**Tabla 2.** Parámetros a evaluar de un jal acondicionado para verificar la efectividad del tecnosuelo.

Variable	Parámetro
<p><b>Geotécnicas</b></p> <p><b>e</b></p> <p><b>Hidrológicas</b></p>	<p>*Textura</p> <p>*Compactación</p> <p>*Tasa de infiltración</p> <p>*Capacidad de retención de agua</p> <p>*Estabilidad de los agregados</p> <p>*Flujo estacional del agua</p> <p>*pH</p>
<p><b>Químicas</b></p>	<p>*Conductividad eléctrica (CE) o salinidad</p> <p>*Contenido de materia orgánica (MO)</p> <p>*Capacidad de intercambio catiónico (CIC)</p> <p>*Fertilidad (N, P y K disponibles)</p> <p>*Contenidos totales de C y N</p> <p>*Relación C:N</p> <p>*Generación de acidez</p> <p>*Metales totales y solubles</p>
<p><b>Microbiológicas</b></p>	<p>*Tasa de respiración o respiración basal</p> <p>*Carbono de la biomasa microbiana</p> <p>*Tasa de mineralización de carbono</p>

Como última recomendación, es importante la forma de aplicación de los sustratos, básicamente existen 2 formas de aplicación; depositándolos sobre la superficie de los jales (sin mezclar); o bien incorporándose con los jales. Los resultados de diversas investigaciones señalan que la estrategia más recomendable es incorporar el acondicionador mezclándolo con los primeros 15-20 cm de los Jales (Santibáñez, 2011). Se recomienda por las siguientes razones:

- La densidad de la mayoría de los acondicionadores orgánicos es baja (<0.9 g/cm<sup>3</sup>), por lo tanto, si se aplican en la superficie el material será transportado fácilmente fuera del sitio, particularmente en lugares ventosos.
- Al aplicar un material orgánico en la superficie, las raíces de las plantas establecidas tienden a desarrollarse en la capa orgánica superior, sin

traspasar de forma importante hacia la capa de los jales subyacente, existiendo una escasa conexión en la interface acondicionador-jal, por lo que el material queda expuesto a procesos erosivos.

- Para que se produzcan los procesos de adsorción y complejación de los metales solubles, es necesario que la materia orgánica entre en contacto con los jales o que se maximice la superficie de contacto entre ambos materiales. Por ende, mezclar los jales con el acondicionador favorecerá los procesos de inmovilización de los metales.

### **Ejemplos de aplicación de tecnosuelos con residuos mineros**

En la región de Murcia, la actividad minera desarrollada durante más de 2000 años ha generado grandes cantidades de residuos acumulados en balsas, que aún permanecen en la zona. Se llevó a cabo un estudio donde realizan una incubación en laboratorio de residuo minero ácido enmendado con biocarbón procedente de diferentes materias primas y residuos de mármol.

El tecnosuelo se compone de 20g/Kg de biocarbón y 200g/Kg de residuo de mármol, donde la parte restante es de residuo minero. Después de 90 días, se obtiene como resultado que la adición de biocarbón en combinación con lodo de mármol es una estrategia efectiva para aumentar el carbono orgánico del suelo y la estabilidad de los agregados, necesaria para mejorar la estructura del suelo, se logra aumentar el pH y se redujo significativamente la CE. Además, de que esta estrategia disminuye la disponibilidad de metales pesados, reduciendo la toxicidad del suelo (Barriga, 2016).

De manera similar, se hizo el estudio de la estabilización de jales mineros, provenientes del depósito de jales “El Fraile” localizado en el distrito minero en Taxco, Guerrero, utilizando biocarbón y composta para promover el crecimiento de pastos e inmovilizar elementos potencialmente tóxicos, en dicho estudio se utilizaron jales mineros pobres en nutrientes y con un pH ácido, y se aplicaron 4 diferentes enmiendas orgánicas, para evaluar el crecimiento de pasto e inmovilizar los EPT. Este experimento se desarrolló en 4 macetas donde la enmienda orgánica establecía un 4% aproximadamente, utilizando biocarbón de fibra de coco inoculado con orina, compostas de residuos domésticos,

mezcla de biocarbón y composta y un testigo sin enmienda. Después de 4 meses la adición de enmienda mejoro las propiedades químicas del jal: redujo la acidez, incremento la cantidad de MO y disminuyo la absorción de EPT como As, Cd, Cu, Pb y Zn. Las enmiendas adicionan MO a los suelos, amortigua el pH e inmoviliza principalmente los EPT. (Ríos-Esparza, 2018)

### 1.8 Efectos de EPT sobre algunas funciones biológicas

Para que un ion de alguno(s) de los elementos tengan un efecto fisiológico o tóxico sobre un organismo, primero debe entrar a la célula. Los cationes metálicos divalentes ( $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ , y  $Zn^{2+}$ ) son estructuralmente muy similares entre sí; todos ellos tienen diámetros iónicos entre 138 y 160 pm y una doble carga positiva. Por ello, ciertos metales divalentes pueden desplazar a otros con funciones fisiológicas importantes en la célula. Un ejemplo se encuentra en  $Zn^{2+}$ , que sí es reemplazado por  $Ni^{2+}$ , o el  $Be^{2+}$ , o por  $Mg^{2+}$ , en enzimas estas se desactivan y pierden su función. La sustitución de  $Ca^{2+}$  por otros metales en proteínas de la membrana provoca desórdenes funcionales. Ciertos metales funcionan como “venenos” metabólicos, reaccionan e inhiben una serie de sistemas enzimáticos; algunos iones de estos elementos ( $Hg^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ , y  $Ag^+$ ) forman complejos tóxicos inespecíficos en la célula, produciendo efectos tóxicos para cualquier función biológica. Otros elementos como Hg, As, Sn, Tl y Pb, pueden formar iones órgano-metálicos liposolubles capaces de penetrar membranas y acumularse en las células. Algunos elementos sin propiedades tóxicas en baja concentración, como son el  $Zn^{2+}$ , o  $Ni^{2+}$ , y específicamente  $Cu^{2+}$ , son tóxicos en concentraciones mayores.

Por otra parte, los cationes de metales como Sn, Ce, Ga, Zr, y Th debido a su baja solubilidad, no poseen influencia biológica. Los elementos como Fe, Mo y Mn son elementos traza importantes con baja toxicidad. Mientras que el Zn, Ni, Cu, V, Co, W y Cr son tóxicos con importancia biológica moderada; y los elementos como As, Ag, Sb, Cd, Hg, Pb y U, no tienen importancia biológica significativa como elementos traza y se consideran tóxicos. Algunos metales no implican peligro para los sistemas biológicos, sin embargo, algunos metales y



metaloideos, como Se y As son potencialmente tóxicos dependiendo la concentración en la que se encuentren.

Los elementos potencialmente tóxicos se encuentran biodisponibles y se movilizan hacia poblaciones cercanas, provocando problemas de intoxicación. La forma química del elemento tiene influencia directa en la solubilidad, movilidad y toxicidad en el suelo, que a su vez depende de la fuente de contaminación y de la química del suelo en el sitio contaminado. (Sepúlveda, 2004)

## 1.9 Generalidades de algunos EPT

### **Arsénico (As)**

En la tabla periódica este elemento se encuentra en el grupo VA, es un elemento con propiedades de metaloide, presente en la corteza terrestre (0.0005%). El As tiene una química bastante compleja y puede encontrarse con valencia -3, +3, y +5. En ambientes aerobios, el As (V) es la forma dominante, usualmente como arseniato ( $\text{AsO}_4^{-3}$ ), en varios estados de protonación:  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^{-1}$ ,  $\text{HAsO}_4^{-2}$  y  $\text{AsO}_4^{-3}$ ; también puede co-precipitar o adsorberse en oxi-hidróxidos de hierro bajo condiciones moderadamente reductoras o ácidas. Los co-precipitados son inmóviles en estas condiciones, pero a medida que aumenta el pH aumenta su movilidad. Cuando se encuentra en condiciones reductoras, el As (III), es la forma dominante en forma de arsenito ( $\text{AsO}_3^{-3}$ ) y sus formas protonadas ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_3^{-1}$  y  $\text{HAsO}_3^{-2}$ ).

El As se encuentra principalmente en minerales como arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) y en el trióxido de arsénico ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), se obtiene del procesamiento de minerales que contienen Cu, Pb, Zn, Ag y Au. Los efectos de la exposición crónica de este elemento son: cáncer, enfermedades cardiovasculares y trastornos neurológicos.

### **Berilio (Be)**

Pertenece al grupo de los metales alcalinotérreos (grupo IA). Es un metal grisáceo y duro que se presenta naturalmente en rocas y en el suelo, se estima que su concentración en la corteza terrestre va de 2 a 10 ppm. Se encuentra en forma de mineral llamado berilo ( $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$ ); también, se encuentra algunas veces en esmeralda y aguamarina. Es altamente reactivo, por lo que no se encuentra en forma libre en la naturaleza. Los compuestos de este elemento son muy tóxicos, y sus efectos se relacionan con la inhibición de actividades enzimáticas. Sus sales solubles (sulfatos y fluoruros) causan efectos agudos. Tiende a depositarse principalmente en suelos y sedimentos, en donde permanece adherido a la materia orgánica. El Be con valencia 2+ tiende a formar sales, principalmente con sulfatos y fluoruros.

### **Cadmio (Cd)**

El cadmio pertenece a los metales de transición (grupo B), se encuentra de forma natural como CdS o  $\text{CdCO}_3$ . Generalmente se encuentra como impureza en minerales de Zn (aproximadamente 3 Kg de Cd/ton Zn), Cu y Pb. Tiende a depositarse y adherirse a la materia orgánica del suelo. Parte de él se disuelve en agua, por lo que puede llegar a los cuerpos de agua. Las formas más comunes de Cd, incluyen  $\text{Cd}^{2+}$ , complejos de cadmio-cianuro y  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ . A un pH alto las formas dominantes son hidróxidos y carbonatos, en pH bajos (<8) predomina el  $\text{Cd}^{2+}$  y especies acuosas de sulfatos. Bajo condiciones reductoras, en presencia de azufre, se forma el sulfato de cadmio (CdS). El Cd precipita en presencia de fosfato, arseniato, cromato y otros aniones.

Los compuestos de Cd son muy tóxicos; una exposición aguda a humos con Cd puede causar daño pulmonar, mientras que la exposición crónica se asocia a daños renales y con un aumento de riesgo de cáncer.

### **Cromo (Cr)**

El cromo es un metal de transición ubicado en el grupo B en la tabla periódica. Es uno de los elementos menos comunes, y no se encuentra naturalmente en

forma elemental, solo como compuesto. Se encuentra en la cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), el mineral de cromo más abundante. Se encuentra en la corteza terrestre con una concentración aproximadamente de 125 ppm. Es un elemento necesario para la utilización adecuada de azúcares y otros carbohidratos en sistemas biológicos. El Cr posee valencias de +2, +3 y +6, dependiendo del pH y las condiciones redox, se encuentra generalmente como Cr (III) y Cr (VI). La mayoría de las especies de Cr(VI) son las más tóxicas y móviles, incluyendo al cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) y al dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ), las cuales precipitan en presencia de cationes metálicos como  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  y  $\text{Ag}^+$ . El cromo (VI) se puede encontrar de forma natural como crocoita ( $\text{PbCrO}_4$ ). A pH bajos (<4) el Cr (III) es la forma dominante creando complejos con  $\text{NH}_3$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CN}^-$ , y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

### **Mercurio (Hg)**

El mercurio es un metal de transición que se encuentra en el grupo B en la tabla periódica, es el único metal líquido a temperatura ambiente. El cinabrio o sulfuro de mercurio ( $\text{HgS}$ ) es la principal fuente natural. En esta forma el mercurio se encuentra en la corteza terrestre con una concentración de 0.5 ppm. El Hg en el ambiente puede existir de forma elemental ( $\text{Hg}^0$ ), reducida ( $\text{Hg}_2^{2+}$  [mercúrica],  $\text{Hg}_2^{2+}$  [mercuriosa]) o alquilada (metil/etil mercurio). Las formas mercúrica y mercuriosa son más estables bajo condiciones oxidantes. En condiciones reductoras el Hg orgánico e inorgánico puede reducirse a su forma elemental y ser convertido a formas alquiladas por procesos bióticos o abióticos; estas son las formas más tóxicas del Hg, las cuales son solubles y volátiles. A valores altos de pH co-precipita con sulfuros formando  $\text{HgS}$ . El Hg es un elemento tóxico para el sistema nervioso y, en su forma gaseosa, es absorbido por tejidos pulmonares.

### **Plomo (Pb)**

Es un metal que se encuentra en el grupo VIA en la tabla periódica. Es un metal gris azulado que se presenta en forma natural y en pequeñas cantidades (0.002%) en la corteza terrestre. Este elemento se obtiene principalmente de la galena ( $\text{PbS}$ ), la anglesita ( $\text{PbSO}_4$ ) y la curocita ( $\text{PbCO}_3$ ). La mayor parte del plomo liberada en el ambiente es retenida por el suelo; los principales procesos que dictan su destino en éste incluyen la adsorción, el intercambio iónico, la

precipitación y el acoplamiento con la materia orgánica. Como contaminante ambiental, normalmente se encuentra como forma elemental, como óxidos e hidróxidos y como complejos oxianiónicos metálicos. El Pb cuenta con valencias de +2 y +4, donde el Pb (II) es la forma más común y reactiva, formando ligandos orgánicos (ácidos húmicos y fúlvicos) o inorgánicos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ), se forman compuestos poco solubles; las formas sólidas más estables del plomo son el carbonato de plomo y el PbS que se forman a pH menor a 6. El Pb es tóxico para el sistema nervioso y se asocia con la depresión de muchas funciones endócrinas, aunque no hay evidencias de efectos teratogénicos, o carcinogénicos.

### **Selenio (Se)**

El Se es un no metal, que se encuentra en el grupo VIA de la tabla periódica, con valencias -2, +4 y +6. Se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, generalmente, combinado con sulfuro o con minerales de Ag, Cu, Pb, y Ni. Su concentración en la corteza terrestre es de 0.09 ppm. Este elemento es relativamente no tóxico y se considera un elemento traza esencial. Es un antioxidante que previene la ruptura de cromosomas, ciertos defectos de nacimiento y ciertos tipos de cáncer. Es necesario para la acción benéfica de la vitamina E. Además de su actividad como anticancerígeno, retarda el proceso de envejecimiento y fortalece los músculos del corazón. Se han reportado efectos de toxicidad crónica en humanos por dosis de 1 mg Se/Kg-día. El  $\text{H}_2\text{Se}$  y algunos otros compuestos de selenio son muy tóxicos y se asemejan al As en sus reacciones fisiológicas. (Sepúlveda, 2004).

#### **1.10 Normatividad**

El objetivo de la NOM-141-SERMANAT-2003 es que con su aplicación se garantice la seguridad de los depósitos de jales durante su construcción y hasta la etapa posterior al cierre. Esta norma 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 presa de jales.

La determinación de la peligrosidad del jal está bien definida; un jal puede llegar a ser peligroso por dos importantes razones:

- a) La movilidad de sus constituyentes tóxicos, de acuerdo a la tabla 3, que hace referencia a la NOM-052-SERMANAT-2005.
- b) Por su potencia para generar acidez.

Las pruebas para determinar estas características son: la prueba de extracción de constituyentes tóxicos con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub> y la prueba modificada de balance ácido-base, las cuales están claramente descritas en los anexos 1 y 5 de la norma, respectivamente.

**Tabla 3.** Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el lixiviado de acuerdo con la NOM-052-SERMANAT-2005.

<b>Contaminante</b>	<b>LMP (mg/L)</b>
<b>Arsénico (As)</b>	<b>5.0</b>
<b>Bario (Ba)</b>	<b>100.0</b>
<b>Cadmio (Cd)</b>	<b>1.0</b>
<b>Cromo (Cr)</b>	<b>5.0</b>
<b>Mercurio (Hg)</b>	<b>0.2</b>
<b>Plata (Ag)</b>	<b>5.0</b>
<b>Plomo (Pb)</b>	<b>5.0</b>
<b>Selenio (Se)</b>	<b>1.0</b>

### 1.11 Conductividad eléctrica y pH en los jales mineros

Los residuos que se generan en la industria minera contienen una cantidad variable de minerales magnéticos y conductores de electricidad, principalmente asociados a los sulfuros metálicos y óxidos de hierro, los cuales contienen a los EPT cuya dispersión representa un peligro ambiental. Se ha reportado que la

generación de drenaje ácido, en este tipo de residuos, es la causa de que sus lixiviados acuosos se caractericen por valores bajos de pH y altas concentraciones de iones disueltos como  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , y  $\text{Ca}^{2+}$ , lo que se deriva a altos valores de conductividad eléctrica en estos residuos, implicando que los suelos afectados por el drenaje ácido de minas pueden acidificarse y aumentar su capacidad de conductividad eléctrica (Martínez, 2015).

### 1.12 Pruebas de peligrosidad en los jales mineros

La norma Oficial Mexicana NOM-141-SERMANAT-2003 menciona que es necesario realizar pruebas que permitan identificar su capacidad potencial de generación de acidez y la presencia de EPT disponibles para la lixiviación (EPT solubles) bajo las condiciones ambientales (Ruiz, 2007).

Este procedimiento consta de 2 métodos; el primero determina la extracción del constituyente tóxico y determina la peligrosidad en función de la movilidad de los constituyentes tóxicos con agua, conforme a la “Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con  $\text{CO}_2$ ”, el segundo consiste en evaluar la peligrosidad en función del potencial de generación de drenaje ácido de acuerdo con la “Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales”.

#### **Prueba de extracción de constituyentes tóxicos:**

La toxicidad de los metales y metaloides en jales no depende de su concentración total, si no de la concentración de la fracción extraíble bajo condiciones ambientales. La fracción extraíble es la que puede presentar un riesgo al ambiente, ya que es móvil en condiciones ambientales. También se considera a esta fracción extraíble como una medida indirecta de la fracción biodisponible, ya que reacciona fácilmente dentro de los organismos vivos.

El propósito de esta prueba es caracterizar los jales por su toxicidad, en este procedimiento se utiliza como extractante agua destilada en equilibrio con  $\text{CO}_2$

en condiciones estándar (ácido carbónico, pH=5.5), dicho extractante debe ser preparado al momento de su uso.

En el extracto obtenido se cuantificarán los metales y metaloides regulados en la norma ya mencionada anteriormente (NOM-052-SEMARNAT), mediante los métodos de “Espectroscopia de emisión atómica inductivamente acoplada a plasma” y “Métodos de absorción atómica”.

### **Evaluación del potencial de Generación de Ácido Prueba Estática:**

La peligrosidad de los jales debida a su reactividad está determinada, como ya se mencionó, por la oxidación de sulfuros, que ocurre cuando los jales que contienen sulfuros metálicos son expuestos al aire y agua. El producto de la oxidación de los sulfuros metálicos es ácido sulfúrico, que, si no es neutralizado por minerales de reacción básica, produce drenaje ácido que contiene metales disueltos y metaloides potencialmente tóxicos.

Esta prueba tiene el propósito de caracterizar la peligrosidad de los jales por su reactividad. Esta consiste en definir el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores, para determinar la capacidad neutralizante neta de los constituyentes del jal, bajo la base de la “Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales”. Al realizar la determinación, el generador debe registrar el valor del potencial de neutralización (PN) y determinar el potencial de acidez (PA) de la muestra, calculando el potencial de neutralización neto (PNN):  $PNN = PN/PA$  (NOM-141-SEMARNAT, 2003).

## **2. Desarrollo Experimental**

### **2.1 Muestreo y obtención de materiales**

Durante el muestreo se siguieron los lineamientos que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 que se mencionan enseguida, el

muestro se realizó de manera representativa en la presa jales y suelos aledaños.

Cada muestra de jales y suelo colectado tuvo un peso aproximadamente de 2 kg, y se realizaron con 5 incrementos (submuestras tomadas a diferentes tiempos), las muestras se conservaron en contenedores apropiados para evitar la contaminación de estas, y se transportaron tan pronto como fue posible al laboratorio. En ninguno de los casos se agregaron sustancias para preservar las muestras (Figura 11).

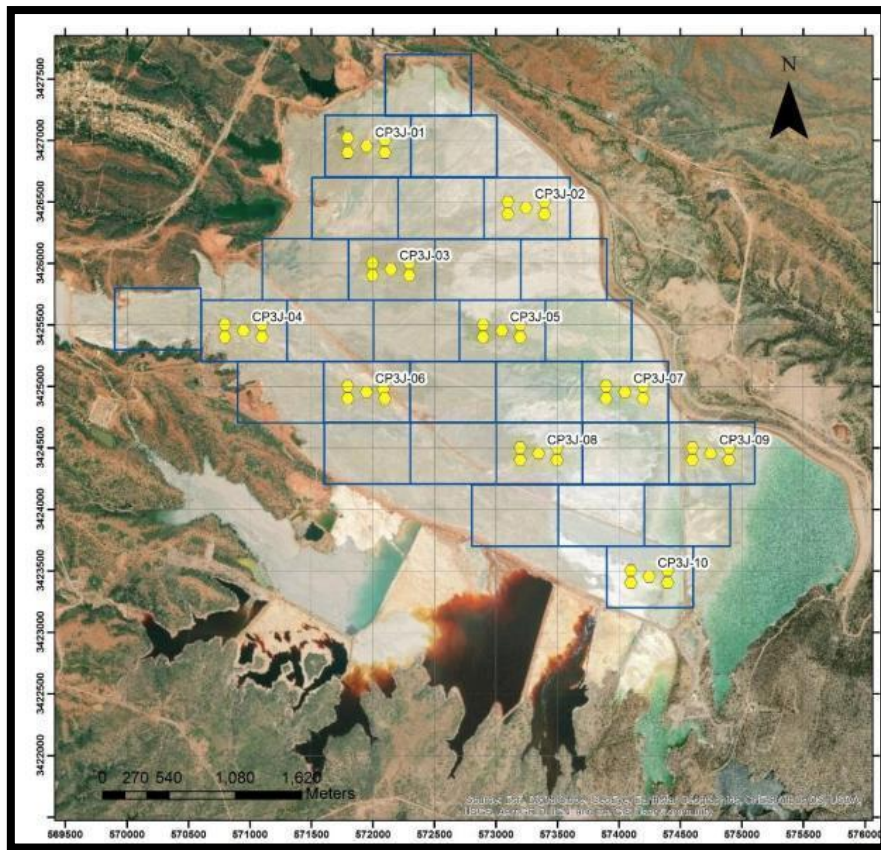


Figura 11. Toma de muestra en la presa de jales, fotografía del sitio y panorámica.

### 2.1.1 Jales mineros

Se llevó a cabo un muestreo sistemático agrupado representativo del área, tomando 10 muestras compuestas a 5 cm de profundidad. Se toma como referencia las 300 muestras tomadas por el instituto de geología de la UNAM, que como se observa en la figura 1, presenta aquellas zonas donde se encuentran los jales con mayor oxidación, cubriendo a los jales que no se encuentran oxidados y así poder colectar jales grises. En la figura 12 se muestran los sitios donde fue tomada cada una de las muestras compuestas, cada una conformada por 5 muestras simples de los jales de flotación depositados en la presa de Jales. Las muestras compuestas se identificaron como: CP3J-01 hasta CP3J-10.





**Figura 12.** Representación gráfica de distribución y ubicación de los sitios de muestreo compuestos.

### 2.1.2 Suelos aledaños

Se realizó el muestreo de los suelos superficiales que se encuentran en los alrededores de la presa de Jales. Corresponden al área fuera de influencia, las muestras tomadas en esta zona se identificaron con las letras “FI”. El código completo con el cual fueron registradas las muestras fue: 20-CAN-S-SUP-FI-01 hasta 20-CAN-S-SUP-FI -17, como se aprecia en la figura 13. Las muestras utilizadas para desarrollar el tecnosuelo son las que se encuentran al norte de la presa de jales, que son 20-CAN-S-SUP-FI-02, 05 y 06.

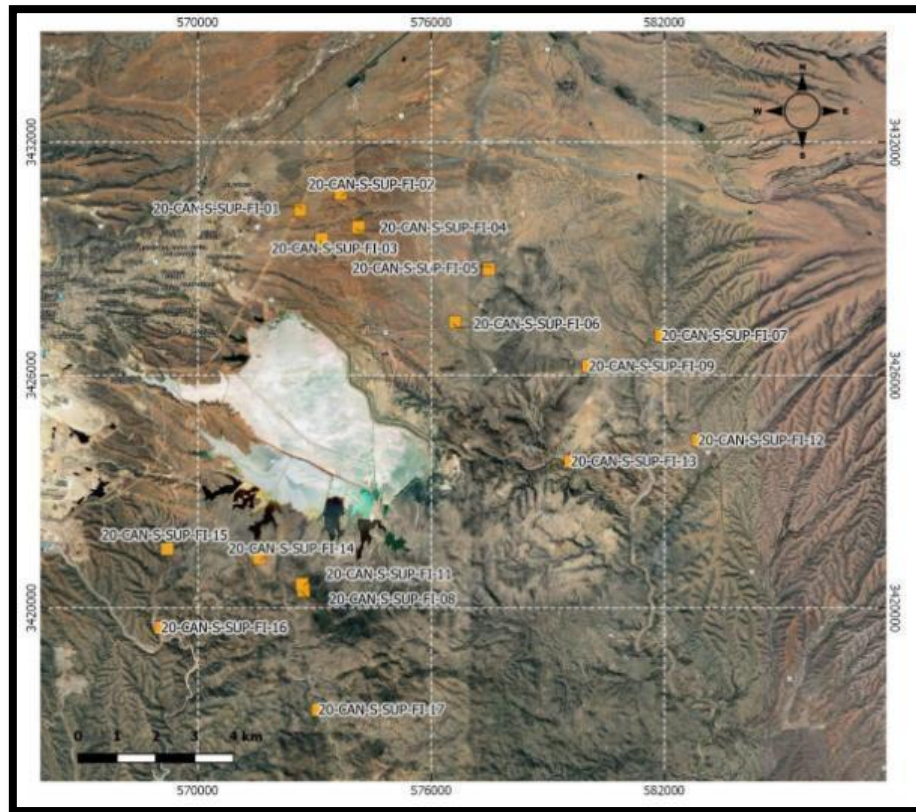


Figura 13. Representación gráfica de la ubicación de toma de muestras de suelos superficiales fuera del área de influencia, "FI".

### 2.1.3 Roca caliza

La roca caliza llegó proveniente de una zona cercana a la mina en Agua Prieta Sonora, a 79 Km de distancia (Figura 14), la muestra representativa llegó a laboratorio en dos cubetas. Se realizó una homogeneización y cuarteo, para obtener un kilogramo de la muestra que se trituró a malla 10. Posteriormente se realizó un cuarteo y un tamizado para obtener 200g de muestra a malla 10 como se muestra en la figura 15. Se realizó un cuarteo para obtener 200g y se llevó a molido fino (malla 200). Las muestras proporcionadas por la empresa privada presentan un mismo tamaño, de manera que se recomienda ya que el control de pH que brinda la roca caliza se encuentra en función del tamaño, presentando una mayor área superficial y una mayor reacción con el drenaje ácido de mina generado.

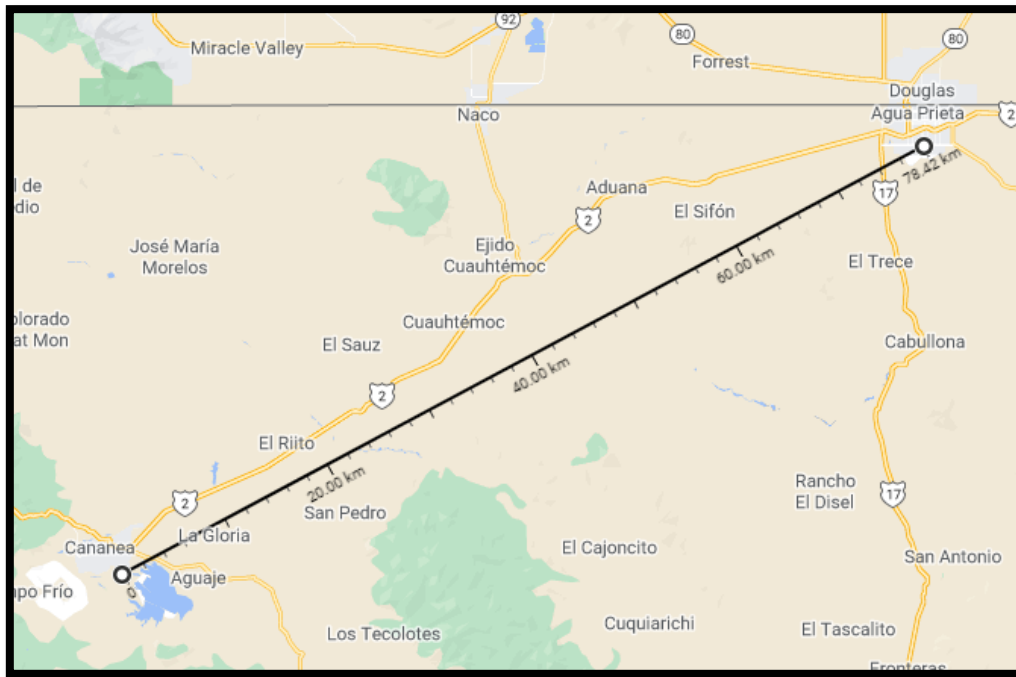


Figura 14 Distancia de la zona donde se extrae la roca caliza (Agua Prieta, Sonora) respecto a la ciudad de Cananea, Sonora.



Figura 15. Homogeneización y cuarteo de roca caliza de llegada (Izquierdo) y en malla 10 (Derecha)

#### 2.1.4 Materia Orgánica

La materia orgánica utilizada fue la enmienda comercial denominada Biotic Earth TM Black el cual garantiza que es un material estable y probado por la empresa ECBVERDYOL, el cual se fabrica con paja procesada térmica, mecánicamente y fibras flexibles de linaza con musgo de turba esfagno canadiense y otros materiales patentados para el crecimiento de las plantas y aditivos para el control de la erosión.

De acuerdo con las especificaciones del producto, la composición del material es la siguiente:

\*40% del volumen de paja procesada térmica y mecánica y fibras flexibles de linaza (FFL)

\*57% por volumen de turba de esfagno canadiense de calidad profesional.

\*1.26 en volumen de otros microelementos, azúcares, almidones, proteínas, fibras y 16 aminoácidos, incluyendo ácido fólico, estimulantes/ reguladores del crecimiento, vitamina A, triconnatol y triacontanol como estimulantes/reguladores del crecimiento.

\*<1% en volumen de micorrizas fúngicas y bacterias beneficiosas para las plantas.

Estos datos fueron brindados por el proveedor marca ECB VERDYOL (VERDYOL)

## **2.2 Caracterización de materiales**

Para la caracterización de materiales se llevaron a cabo los siguientes análisis geoquímicos, siguiendo procedimientos estandarizados y con controles de calidad correspondientes a cada procedimiento.

### **2.2.1 Análisis Granulométrico en roca caliza y Jales mineros**

Se pesaron 1200g y 450g de la muestra de roca caliza y Jales respectivamente, para obtener el análisis granulométrico, realizando el tamizado en las mallas como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Numero de malla y tamaño [ $\mu\text{m}$ ] en los tamices

Roca caliza		Jales	
malla	[ $\mu\text{m}$ ]	malla	[ $\mu\text{m}$ ]
3	6730	20	841
4	4760	35	500
10	2000	40	400
20	841	50	297
35	500	60	250
40	400	100	149
50	297	200	74
60	250	PAN	-74
100	149		
200	74		
PAN	-74		

La fracción de cada malla fue pesada en balanza semi analítica.

### 2.2.2 Medición de pH y CE en muestras de jales, suelo y roca caliza

De acuerdo con la norma ISO 12265(1994), se agregaron a 5g de muestra a malla 10, una cantidad de 50 ml de agua, se agitaron las muestras durante 1 hora y se dejaron sedimentar 15 min, la medición se realizó con un potenciómetro marca y modelo (Denver Instrument Ultrabasic, U-10. Calibrado a 3 puntos pH=10, 7 y 4 a 25°C).

La Determinación de la conductividad eléctrica (CE) en laboratorio, se realizó posteriormente a la toma de pH. Se utilizó como instrumento de medición un Conductímetro. Marca y modelo: OAKTON, CON 700. Calibrando con el material de referencia de 1413 $\mu\text{S/cm}$  (EN 13038).

### 2.2.3 Concentración total de EPT y EI en jales, y valores de fondo en suelos.

Esta prueba se realizó de acuerdo con la norma EPA Method 6200 con un equipo portátil FRX, marca Niton XL3 y modelo Ultra. Este método es rápido,

sencillo y no destructivo. Además, la preparación de la muestra fue sencilla y solo se requirió una pequeña cantidad de esta para realizar la medición.

La muestra fue secada, posteriormente tamizada a través de la malla #60, se colocó en un contenedor de polietileno de 31.00 mm para el análisis, cuidando que el contenedor con la muestra esté por lo menos a tres cuartos de su capacidad, el contenedor se cubrió con una pantalla Mylar de 2.5  $\mu\text{m}$  para el análisis. Como controles de calidad se pasaron estándares del suelo Montana 2710 para determinar la exactitud del análisis y además un blanco que determina la contaminación cruzada.

#### **2.2.4 Extracción de metales y metaloides, con agua en equilibrio con $\text{CO}_2$ en jales y roca caliza**

Se siguió el procedimiento de acuerdo con el ANEXO 5 I de la norma NOM-141-SEMARNAT-2003.

- a) Se realizó la preparación de la solución extractante, burbujeando aire en agua destilada hasta alcanzar un pH de  $5.5 \pm 0.2$ .
- b) La solución extractante se añadió a la muestra de caliza, hasta que se alcanzó una relación de 20 veces el peso en gramos. (5g de muestra en 100 ml de solución extractante).
- c) Se agitó la mezcla continuamente ( $29 \pm 2$  rpm) por  $18 \pm 0.25$  horas a temperatura ambiente.
- d) Se dejó reposar la muestra durante 5 minutos. Después de este periodo se llevó a cabo la separación de la fase acuosa de los sólidos más pesados por decantación, y, se filtró la mezcla utilizando una membrana de 0.45  $\mu\text{m}$ .
- e) Se prepararon las soluciones para realizar el análisis de cuantificación de metales y metaloides lo antes posible por medio de ICP.

### 2.2.5 Determinación de mineralogía asociada en los jales (DRX) y análisis semicuantitativo elemental e imagen de las partículas (MEB)

La caracterización de los minerales presentes en los jales y productos se llevó a cabo utilizando la técnica de difracción de rayos X, el cual es un método no destructivo y aplicable a una amplia gama de materiales sólidos. Solo puede identificar minerales con una estructura cristalográfica definida, pues la información se basa en la difracción producida por un conjunto de átomos en un arreglo ordenado que es típica de cada compuesto (Bijvoet, 1972). Las muestras empleadas se llevaron a un tamaño de malla 100. Se realizó con un analizador portátil XRD-XRF TERR, Olympus, la medición se llevó a cabo con un intervalo angular de 5° a 55° con un escaneo de 50 exposiciones de 20 segundos cada una, con una fuente de radiación de cobalto. La identificación se realizó con ayuda del software X Powder versión 2010.01.35 PRO con una base de datos PDF2.

La prueba de Microscopia electrónica de barrido se realizó acoplada a un analizador semicuantitativo de espectrometría de Rayos X por energía dispersa. Con un equipo con marca y modelo Hitachi TM 100.

### 2.2.6 Prueba de Balance Ácido-Base (PN y PA) en jales y PN roca caliza

Se siguió el procedimiento de acuerdo con el ANEXO 5 II de la norma NOM-141-SEMARNAT-2003.

- a) Las muestras se secaron a 104 °C ± 2. La muestra se homogeneizó mediante cuarteo para obtener una muestra homogénea de 200 gramos.
- b) Se tomó una porción de 20 gramos de la muestra total, para realizar la determinación de  $S_{total}$  y  $S_{so4}$ , además, se tomaron otros 10 gramos de muestra para la determinación del balance ácido-base. Estos 10 gramos

se molieron finamente y se tamizaron a un tamaño de < 0.074 mm (malla 200).

### **Determinación del potencial de neutralización (PN) en jales y roca caliza**

- a) Se pesaron 2 gramos de muestra homogeneizada y se secaron a temperatura ambiente, para colocarlos en un matraz Erlenmeyer de 250 ml y se agregaron 90 ml de agua destilada.
- b) Al inicio de la prueba, en el tiempo=0, se agregó HCl 0.93N hasta alcanzar un pH entre 2 y 2.5. Registrando el volumen añadido.
- c) Se agitó la mezcla a temperatura ambiente durante 2 horas, después, se agregó nuevamente HCl 1 N para ajustar el pH hasta alcanzar un valor entre 2 y 2.5, tomando nota del volumen agregado.
- d) Se agitó la mezcla durante 22 horas y al término de este periodo se midió el pH, si el pH era mayor a 2.5, se volvía a agregar HCl 0.93N y a someter a agitación durante 2 horas, registrando el volumen de HCl añadido.
- e) Una vez alcanzado un pH entre 2 y 2.5, se adicionó agua destilada al matraz hasta un volumen final de 125 ml y se tituló con una solución de NaOH de 0.1 N, hasta obtener un pH final de 8.3.
- f) Se calculó el potencial de neutralización expresado como kgCaCO<sub>3</sub>/ton de jal, utilizando la siguiente formula:

$$PN = \frac{(V_f \text{ en ml de HCl}) - (0.1 \text{ vol en ml de NaOH})}{\text{peso de la muestra (g)}} * 50 \quad (9)$$

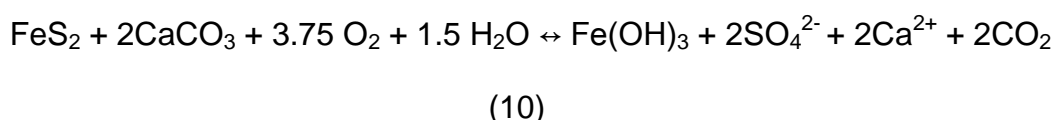
### **Determinación de potencial de acidez (PA) en jales**

- a) Se determinó el contenido de azufre total de acuerdo con la NMX-B-400-1970, consiste en disolver la muestra en ácido clorhídrico y ácido perclórico, se agregó cloruro de bario y así convertir el azufre que lo contiene el sulfato de bario; posteriormente se filtró, se calcino y se pesó.



b) Se determinó el azufre que está en forma de sulfatos. Se realizó la extracción de los sulfatos de acuerdo con lo señalado en el punto 7.1.1 de la NMX-B-021-1982 y se cuantificaron los sulfatos por el método turbidimétrico EPA-9038.

c) Se calculó el Potencial de Acidez con la diferencia entre el azufre total ( $S_{total}$ ) y el azufre como sulfatos ( $S_{SO_4^{2-}}$ ) y se multiplicó por 31.25; valor que se obtiene de la siguiente reacción de neutralización de los sulfuros:



Que, de acuerdo a la estequiometria de la reacción, 1 tonelada de jal que contiene 10kg de S requiere 31.25 kg de  $CaCO_3$  para no producir acidez.

De acuerdo a lo anterior, el PA se expresa como kg requeridos de  $CaCO_3$  / ton de jal; calculándolo con las siguientes ecuaciones:

$$PA = \% S^{2-} \times 31.25 \quad (11)$$

$$\% S^{2-} = (\% S_{total} - \% S_{sulfatos}) \quad (12)$$

### Relación entre PN y PA

Esta relación permite evaluar si los jales contienen o no, la suficiente cantidad de minerales neutralizantes para consumir la acidez generada por los sulfuros metálicos contenidos en el jal. De este modo se estima si el jal producirá o no drenaje ácido, bajo las siguientes condiciones:

- Cuando  $PN/PA \leq 1.2$ ; los jales son potenciales generadores de Drenaje Ácido.
- Cuando  $PN/PA > 1.2$ , los jales no son potenciales generadores de Drenaje Ácido.

### 2.2.7 Pruebas de fertilidad en laboratorio Fertilab de Jales, Suelos y enmienda orgánica.

Las pruebas de fertilidad se realizaron en un laboratorio privado (Fertilab), donde las muestras se enviaron homogenizadas y cuarteadas, y así se obtuvieron resultados representativos. En el análisis de fertilidad se dio prioridad en los resultados de %MO, K, P, N. Estos valores fueron utilizados en el balance de carga para obtener resultados similares al suelo de referencia.

Las muestras enviadas a pruebas de fertilidad fueron 3 muestras compuestas de Jal, 3 muestras de Suelo, que corresponden a la zona fuera de Influencia de la presa en la zona norte. Se envió una muestra de abono orgánico, la cual es la principal fuente de materia orgánica al tecnosuelo (MO).

### 2.3. Formación de Tecnosuelos

Se prepararon 3 tecnosuelos con proporciones diferentes de jal, roca caliza, suelo y abono orgánico (Figura 16). Como se muestra en la tabla 5, brindando la cantidad de cada componente para formar 1Kg de tecnosuelo. El primer tecnosuelo no cuenta con enmienda orgánica el segundo tecnosuelo cuenta con enmienda orgánica, mientras que el tercer tecnosuelo cuenta con el doble de enmienda orgánica.

Tabla 5. Cantidad de jal, suelo, roca caliza y abono orgánico para formar el tecnosuelo.

	Jal	Caliza	Suelo	Enmienda orgánica	Total Kg
Maceta	Kg				
Tecnosuelo	0.5000	0.3221	0.1779	0.0000	1.00
Tecnosuelo + MO	0.4892	0.3152	0.1740	0.0293	1.01
Tecnosuelo + 2MO	0.4734	0.3050	0.1684	0.0723	1.02

Se mezcló cada componente en el tecnosuelo (Figura 17), la muestra quedó completamente homogeneizado, se realizó un cuarteo para obtener una

muestra representativa de aproximadamente 250g y se realizaron análisis geoquímicos.



Figura 16. Cubetas con Caliza (Izquierda), Jales (Centro) y abono Orgánico (Derecha)



Figura 17. Bandeja amarilla (Tecnosuelo), azul (Tecnosuelo +MO) y Roja (Tecnosuelo + 2MOref)

### 2.3.1 Caracterización de Tecnosuelos

Se realizaron los análisis geoquímicos de pH, CE, FRX, Geodisponibilidad de EPT y potencial de neutralización (PN), con los métodos mencionados anteriormente en el apartado 2.2.

Para obtener el potencial de acidez (PA) en los tecnosuelos, se siguió el siguiente método:

a) En la determinación de azufre total se realizó una digestión por microondas, y después se cuantificó el azufre por medio de la técnica de ICP. El desarrollo experimental se realizó de la siguiente manera por duplicado:

1.- Se pesaron 0.2g de muestra de Tecnosuelo

2.- Se agregó 3 ml de Peróxido de Hidrogeno al 30% ( $H_2O_2$ ) y 7ml de ácido nítrico ( $HNO_3$ ) concentrado.

3.- Para que se realizara una digestión adecuada, se dejó reaccionar el ácido nítrico y el peróxido de hidrógeno durante 24 horas aproximadamente en la campana (Figura 18).

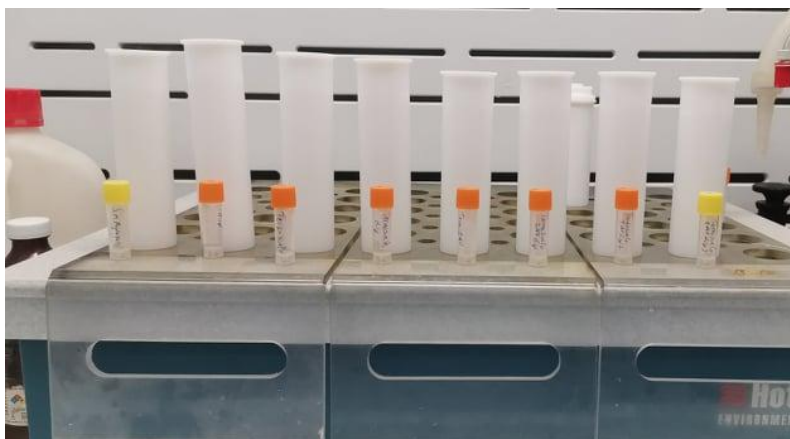


Figura 18. Muestras de Tecnosuelo con ácido nítrico concentrado y peróxido de hidrogeno al 30%, pre-digestión.

4.- Se realizó la digestión por microondas con las siguientes condiciones: Se elevó la temperatura hasta  $175^{\circ}C$  (15 min) y mantuvieron esta temperatura durante 5 min, finalmente se dejó enfriar.

5.- Se retiraron las muestras del microondas, se filtró con papel y aforaron con agua acidificada al 2%  $v/v$   $HNO_3$  (Figura 19).



**Figura 19. Filtrado y aforo de las muestras después de la digestión por microondas.**

6.- Se hizo una dilución de las muestras 1:100, tomando 1 ml de la muestra original y aforando a 100 ml; posteriormente, las muestras se analizaron por ICP y así obtener el porcentaje de azufre total.

b) En la determinación de azufre que está en forma de sulfatos se llevó a cabo en un cromatógrafo de iones Metrohm 883 Basic IC Plus con un detector de conductividad. Para realizar la cuantificación, la muestra tiene que ser tratada de igual manera que en el punto en el punto 2.2.3.

En la cuantificación de  $\text{SO}_4^{2-}$ , se utilizó una columna de polivinilalcohol con grupos amonio cuaternario modelo Metrosep A Supp 4 250/4.0 con una fase móvil de  $\text{NaHCO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$  con supresión química.

c) Se calculó el Potencial de Acidez con la diferencia entre el azufre total ( $S_{\text{total}}$ ) y el azufre como sulfatos ( $S_{\text{SO}_4^{2-}}$ ) y se multiplicó por 31.25, como se señaló en el punto 2.2.5.

### **2.3.2 Prueba de invernadero**

Las pruebas en invernadero se realizaron en maceta de  $500 \text{ cm}^3$ . Para cada tecnosuelo se llenaron dos macetas con 375 g. A cada maceta se sembraron 100 semillas de pasto Ray Grass *Lolium perene* sp. El procedimiento consistió en distribuir las 100 semillas en cada una de las macetas, posteriormente se

removió la superficie del tecnosuelo con ayuda de un lápiz, de tal forma que se trató de cubrir las respectivas semillas.

Si instauró un sistema de riego por aspersión que dosificaba agua cada 2 días durante 10 minutos. A pesar de que la temperatura no se controló, los registros indicaron que se mantuvo en promedio en 24 ° C.

Estos experimentos se monitorearon a los diez días (Etapa de germinación) y posteriormente a los 30 y 60 días. A los 10 días se evaluó la tasa de germinación y a los 30 y 60 la altura de los pastos.

### **3 Resultados y análisis**

A continuación, se presentan los resultados desde la caracterización de los materiales, el desarrollo de una fórmula que brinda la cantidad necesaria de cada componente en el tecnosuelo y así optimizar la cantidad a agregar, caracterización de los tecnosuelos formados y los resultados de germinación de pasto en los tecnosuelos. En el anexo 7.2 se encuentra el control de calidad realizado en cada método experimental.

#### **3.1 Análisis Granulométrico de Roca caliza y Jales no Oxidados**

Con los datos presentados en la tabla 6 y 7, se puede desarrollar la curva en la que se observa el comportamiento que siguen las muestras de acuerdo con su tamaño de partícula en el análisis granulométrico.

Tabla 6. Análisis Granulométrico para muestra de Roca Caliza

Roca Caliza					
g muestra	malla	µm	%Retenido	%Ac	%Pasante
0.00	3.00	6730.00	0.00	0.00	100.00
623.80	4.00	4760.00	55.87	55.87	44.13
328.80	10.00	2000.00	29.45	85.32	14.68
37.78	20.00	841.00	3.38	88.70	11.30
8.11	35.00	500.00	0.73	89.43	10.57
2.78	40.00	400.00	0.25	89.68	10.32
1.84	50.00	297.00	0.16	89.84	10.16
10.09	60.00	250.00	0.90	90.75	9.25
13.61	100.00	149.00	1.22	91.97	8.03
25.68	200.00	74.00	2.30	94.27	5.73
64.00	PAN	-74.00	5.73	100.00	

Tabla 7. Análisis Granulométrico para muestra de Jales

Jales No Oxidados					
g muestra	malla	µm	%Retenido	%AC	%Pasante
2.58	20.00	841.00	0.60	0.60	99.40
59.37	35.00	500.00	13.71	14.30	85.70
25.02	40.00	400.00	5.78	20.08	79.92
0.15	50.00	297.00	0.03	20.11	79.89
61.49	60.00	250.00	14.20	34.31	65.69
96.20	100.00	149.00	22.21	56.52	43.48
119.47	200.00	74.00	27.58	84.10	15.90
68.88	PAN	-74.00	15.90	100.00	

Realizando el ajuste con una línea exponencial para el comportamiento de la roca caliza de acuerdo con su comportamiento como se observa en la figura 20, nos brinda la siguiente formula:  $y = 7.8592e^{0.0004x}$ , que al desarrollar para obtener el P80 o el 80% de muestra pasante, el cual se encuentra a los 5800.85 µm o 0.58 cm en la roca caliza.

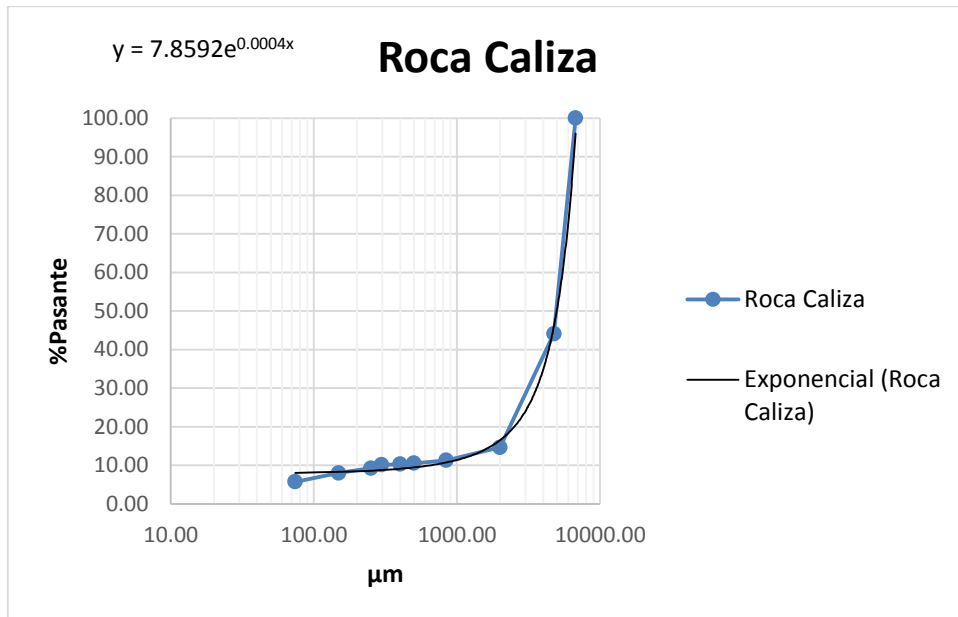


Figura 20. Comportamiento de la Roca caliza de acuerdo al tamaño de partícula (µm) y %Pasante.

Y de igual forma, la figura 21 nos muestra el comportamiento de los jales no oxidados, donde al desarrollar el gráfico se obtiene la siguiente fórmula:  $y=34.947\ln(x)-129.88$ . Con la cual se conoce que el P80 o el 80% de muestra pasante es 405.72 µm.

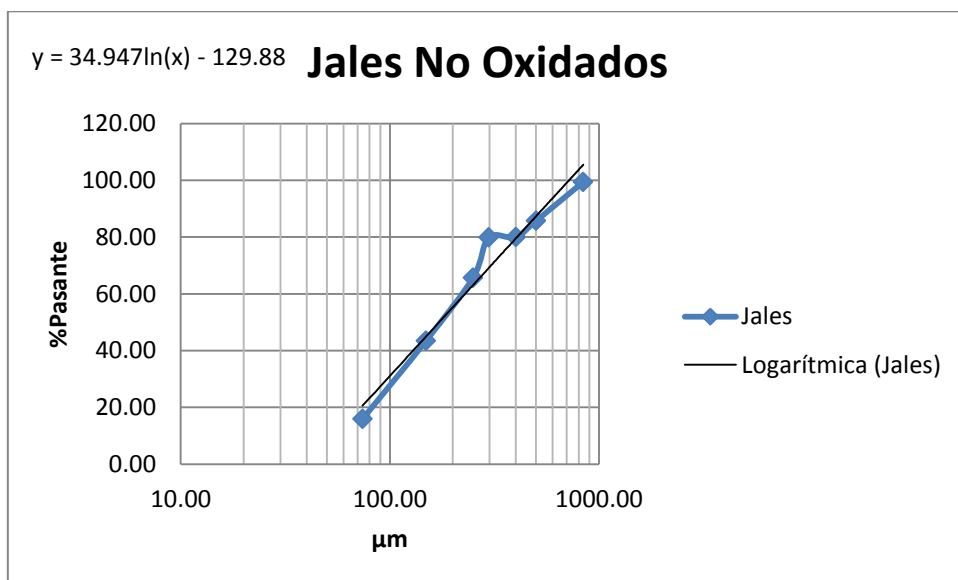


Figura 21. Comportamiento de los Jales de acuerdo al tamaño de partícula (µm) y %Pasante.



### 3.1 Resultados de pH y CE en jales y roca caliza

De acuerdo con la tabla 8, los jales tienen un pH promedio de 7.69, esto refleja que los jales aun no presentan oxidación, y son adecuados para el estudio donde se busca prevenir el drenaje ácido.

Tabla 8. Resultados en la caracterización de pH y CE de las muestras de jales compuestas.

	pH	CE [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
<b>Promedio</b>	7.69	1291.10
<b>Máximo</b>	9.12	2020.00
<b>Mínimo</b>	4.69	830.00

El pH y CE que presentan los suelos aledaños es promedio de 6.41 con una conductividad eléctrica baja de 91.68  $\mu\text{S}/\text{cm}$  como muestra la tabla 9, mostrando que suelos no se encuentran afectados por la presa de jales.

Tabla 9. Resultados de pH y CE de los suelos aledaños a la presa de jales

<b>Suelos</b>		
	pH	CE [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
<b>Promedio</b>	6.41	91.68
<b>Máximo</b>	8.61	299.00
<b>Mínimo</b>	3.98	18.70

En la tabla 10, se observa que el pH de la roca caliza es alto (9.14), y con una CE es de 45.7  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que hace que la roca caliza sea adecuada para utilizarla como método de neutralización.

Tabla 10. Resultados en la caracterización de pH y CE en la roca caliza proveniente de agua prieta.

Clave de la muestra	pH	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )
Roca caliza agua prieta	9.1 4	45.7

### 3.2 Concentración de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT's) y Elementos de Interés (EI) en jales y valores de fondo de suelos aledaños

#### 3.2.1 Concentración de EPT y EI en jales

En la figura 22, se aprecia que la concentración total de EPT's, determinada por medio de la técnica de FRX, los elementos como el Ba, Pb, Cr y As se encuentra en mayor cantidad, de manera que son los elementos en los cuales hay que tener mayor cuidado, y seguir su comportamiento cuando se lleve a cabo la oxidación de los jales.

Tabla 11. Concentración total de EPT en los jales

Muestra	Analito	Pb	Se	As	Hg	Cr	Ba	Cd	Ag
	Unidad	mg/kg							
	LD (mg/kg)	13	20	11	50	85	100	12	10
Muestras compuestas	Promedio	91.00	<LOD	26.26	<LOD	95.74	546.19	<LOD	<LOD
	Máxima	127.61	<LOD	38.24	<LOD	100.72	588.94	<LOD	<LOD
	Mínima	72.51	<LOD	18.70	<LOD	87.60	508.81	<LOD	<LOD

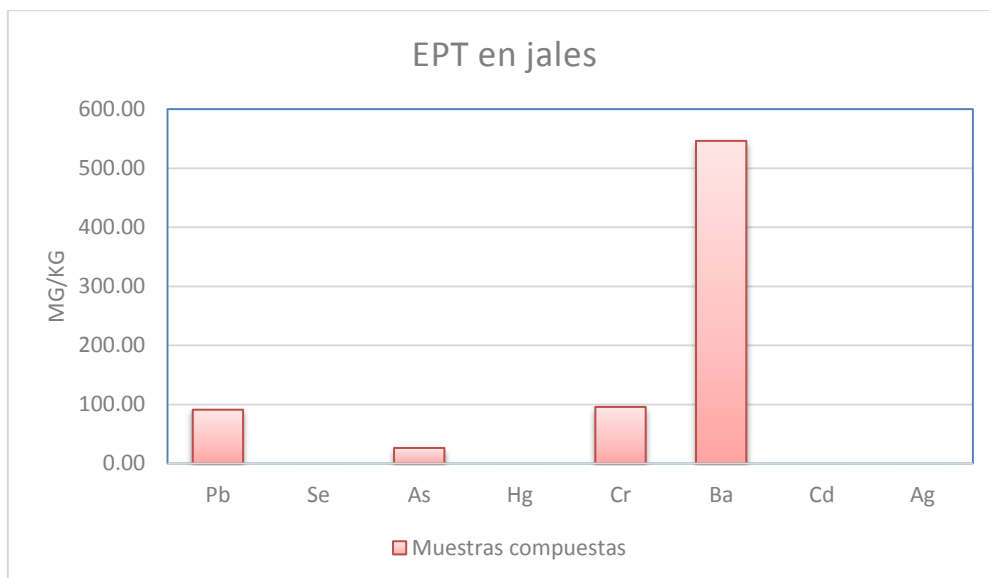


Figura 22. Concentración total de EPT's en las muestras de jales compuestas.

Encontramos los elementos de interés en los jales, como son el Fe, que representa un 2.31% (Tabla 12), de manera que nos muestra que la concentración de pirita en los jales es alta. Otros elementos que se encuentran son el Mn, Cu, Zn y Mo (figura 23).

Tabla 12. Concentración total de EI de los jales en la presa.

Muestra	Analito	Mo	Zn	Cu	Mn	Sb	Ca	Fe	
	Unidad	mg/kg							%
	LD (mg/kg)	15	25	35	85	30	500	100	
Muestras compuestas	Promedio	40.10	197.59	613.42	549.14	<LOD	4186.52	2.31	
	Máxima	65.05	269.00	873.10	764.37	<LOD	4747.34	2.50	
	Mínima	15.20	144.62	436.42	436.80	<LOD	3443.15	1.95	

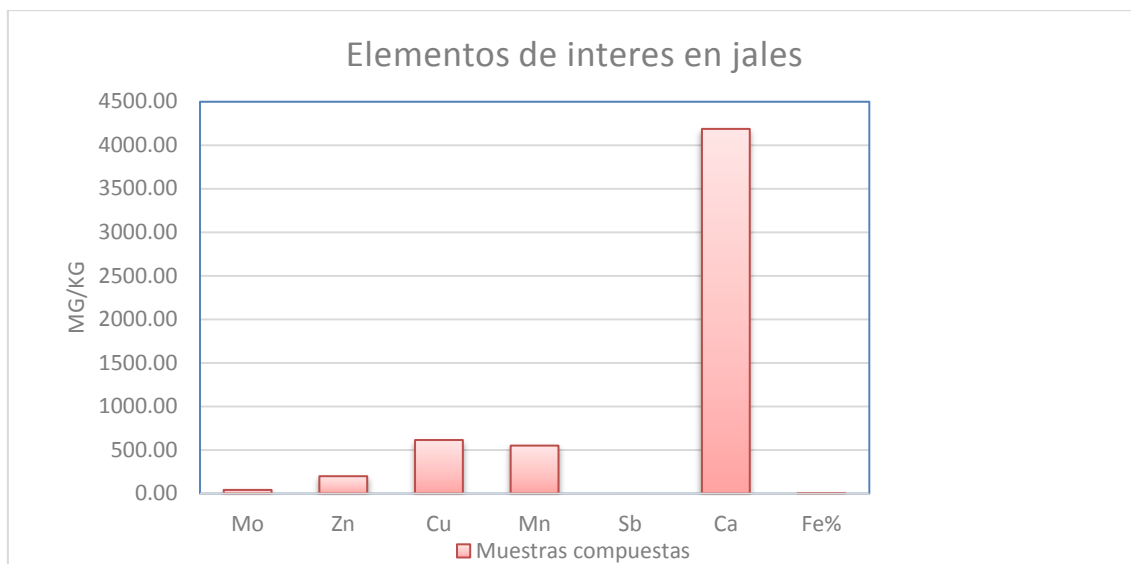


Figura 23. Concentración de EPT's en los jales.

### 3.2.2 Valores de fondo en suelos aledaños a la presa de jales

Como valores de fondo (tabla 13) para los suelos aledaños encontramos concentraciones totales de EPT como son el Ba, As, Pb. También es de importancia establecer que la concentración de Fe es alta. Estos valores de fondo son importantes al realizar la comparación con la concentración que se obtenga en el tecnosuelo.

Tabla 13. Valores de fondo de los suelos aledaños.

Parámetro	As	Ba	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Concentración	mg/Kg						
Valor mínimo	5.00	67.47	29.98	18625.00	68.72	10.00	32.48
Media	26.60	249.17	128.47	30800.93	985.97	51.74	131.03
Valor máximo	76.21	752.50	317.42	61469.27	5733.20	161.13	665.75

### 3.3 Geodisponibilidad de EPT's en jales y roca caliza

Los jales no presentan geodisponibilidad de EPT's como se muestran en la tabla 14, ya que todos los elementos se encuentran por debajo del límite de

detección. Este resultado es importante ya que de acuerdo a esta prueba no representan un riesgo al ambiente; sin embargo, si el pH cambia derivado de la oxidación de la pirita presente en los jales, esta situación puede conducir a un escenario de riesgo ambiental.

**Tabla 14.** Extracción de metales y metaloides de las muestras compuestas, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>, análisis realizado con ICP-óptico.

Analito	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Se
<b>LD (mg/L)</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>
CP3J-01	<LD	<LD	<LD	0.03	<LD	<LD	<LD
CP3J-02	<LD	<LD	<LD	0.20	<LD	<LD	<LD
CP3J-03	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
CP3J-04	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
CP3J-05	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
CP3J-06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
CP3J-07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
CP3J-08	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
CP3J-09	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
CP3J-10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

En la roca caliza, tabla 15, se ve reflejado el mismo comportamiento, donde los EPT's se encuentran por debajo de los límites de detección de la técnica de análisis, indicando que también se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad.

**Tabla 15.** Concentración de los EPT de la muestra de caliza en la caliza.

Analito	Pb	Se	As	Cr	Ba	Cd	Ag
<b>LD (mg/L)</b>	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.03	0.06
<b>Clave de campo</b>	mg/L						
LGA-641-20	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

### 3.4 Resultados de mineralogía asociada en los jales (Difracción de rayos X y MEB)

La ganga comprende a los minerales que acompañan a la mena, que no presentan interés minero en el momento de la explotación como lo es el cuarzo, la calcita y la pirita, entre otros. La tabla 16 muestra las fases de minerales identificadas en las muestras compuestas, donde se encuentran fases como la caolinita, feldespato, cuarzo y micas.

En el anexo se muestra un difractograma de las muestras analizadas, es necesario aclarar que todas las muestras presentan el mismo patrón de difracción.

**Tabla 16.** Fases minerales identificadas en muestras compuestas de Jales.

<i>Clave de muestra</i>	<i>Ficha PDF2</i>	<i>Fases minerales identificadas</i>	<i>Fórmula química</i>
<b>CP3J-01 a CP3J-10</b>	14-164	Caolinita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$
	87-1790	Feldespato tipo microclina	$K(AlSi_3O_8)$
	79-1910	Cuarzo	$SiO_2$
	84-1306	Mica tipo muscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$

En las figura 24 se muestran algunas partículas analizadas en microscopio electrónico de barrido (MEB-EDS), en cada muestra se realiza el análisis elemental semicuantitativo para 10 partículas, por lo que se muestra una partícula representativa de cada muestra, así como en análisis elemental semicuantitativo (Tabla 17). A partir del análisis semicuantitativo por MEB-EDS, se establecieron posibles compuestos, los cuales coinciden con el análisis mineralógico, tabla 16, es decir, compuestos que son característicos en la ganga como minerales de silicatos y aluminosilicatos.

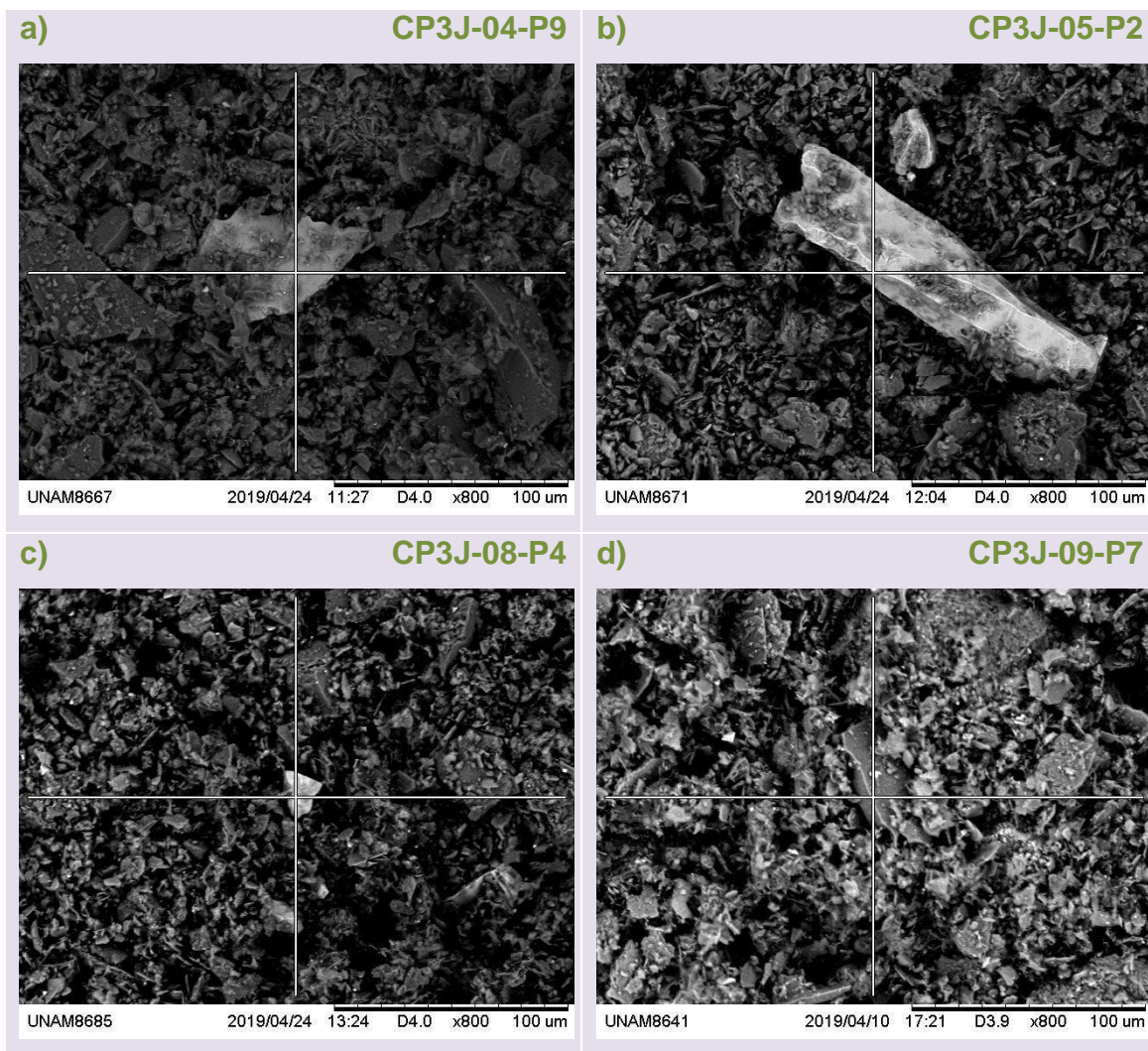


Figura 24. Imágenes de microscopía electrónica de barrido, tomada a 4 muestras compuestas.

Tabla 17. Análisis elemental semicuantitativo de partículas seleccionadas de las muestras compuestas de Jal.

Muestra/elemento	Al(%)	Si(%)	S(%)	K(%)	Ca(%)	Fe(%)
CP3J-04-P9	20.30	47.10	4.80	11.90	1.90	
CP3J-05-P2	13.20	29.20	15.30	9.30		33.10
CP3J-08-P4	40.10	45.70		14.20		
CP3J-09-P7	21.60	42.80	3.20	15.90	2.60	

### 3.5 Resultados de la prueba de Balance Ácido-Base (PN y PA) en jales y PN en roca caliza

#### 3.5.1 Resultados de PN y PA en jales

Al predecir la generación de drenaje ácido de mina se hace referencia a la NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece una relación de PN/PA en los

jales, si esta relación es menor a 1.2, se producirá drenaje ácido de mina. La tabla 18, muestra que la relación PN/PA (columna 4) es mucho menor a 1.2. Este resultado advierte que los jales no oxidados presentan un alto riesgo de generar drenaje ácido de mina, por lo que es necesario encontrar algún método para prevenir esta generación de drenaje ácido y/o controlarlo de tal forma que no represente riesgo al ambiente.

**Tabla 18.** Obtención del PN y PA que predice la generación de acidez para las muestras de jales compuestas.

Clave de la muestra	Potencial de Neutralización (PN)	Potencial de Acidez (PA)			Balance Ácido Base (PN/PA)	
	[kg CaCO <sub>3</sub> /t jal]	% S total	%S	% S <sup>2-</sup>	PA	Adimensional
			SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		[kg CaCO <sub>3</sub> /t jal]	
CP3J-01	2.37	3.30	0.21	3.09	96.49	0.025
CP3J-03	4.60	3.20	0.17	3.03	94.57	0.049
CP3J-04	5.59	3.40	0.11	3.29	102.87	0.054
CP3J-05	3.36	3.00	0.17	2.83	88.38	0.038
CP3J-06	4.36	2.80	0.08	2.72	85.04	0.051
CP3J-07	4.11	2.40	0.14	2.26	70.54	0.058
CP3J-08	6.09	2.70	0.08	2.62	81.79	0.074
CP3J-09	7.33	2.80	0.08	2.72	85.03	0.086
CP3J-10	4.11	2.20	0.12	2.08	64.90	0.063

### 3.5.2 PN en roca caliza

El PN (tabla 19) de la roca caliza presenta un valor de 938.33 [Kg CaCO<sub>3</sub>/ton jal], el cual es muy alto, por lo que el nivel de material neutralizante para prevenir la generación de drenaje ácido de mina es alto, y brinda resultados fiables para optimizar su cantidad en la formación de un tecnosuelo.



Tabla 19. Resultado de la prueba de potencial de neutralización de la roca caliza.

Potencial de Neutralización (PN)	
Clave de la muestra	[kg CaCO <sub>3</sub> /t jal]
Roca caliza agua prieta	938.33

### 3.6 Resultados de la prueba de fertilidad en muestras de jales, suelo y abono orgánico

En la tabla 20, se encuentran los resultados de la prueba de fertilidad para los jales, suelo, y abono orgánico, los valores con mayor relevancia para el balance de carga es el %MO, y los elementos K, P, N. Que posteriormente se toman en cuenta para el balance de requerimientos en el tecnosuelo propuesto.

Tabla 20. Resultados promedio de la prueba de fertilidad para Jales, suelo y enmienda orgánica.

Fertilidad				
	Jales	Suelo	Abono Orgánico	Unidades
MO	0.38	2.25	72.00	%
P-Bray	37.00	31.26	1200.00	ppm
K	114.27	226.00	20900.00	ppm
Ca	1896.67	2059.33	21300.00	ppm
Mg	55.73	219.33	6000.00	ppm
Na	78.53	12.86	200.00	ppm
Fe	37.17	8.33	3811.00	ppm
Zn	9.71	5.00	24.17	ppm
Mn	15.63	22.87	126.00	ppm
Cu	25.83	16.99	7.51	ppm
B	0.10	0.22	8.94	ppm
S	700.33	3.59	13000.00	ppm
N-NO <sub>3</sub>	1.04	21.61	25500.00	ppm

### 3.7 Desarrollo del Tecnosuelo

La formulación y el desarrollo de los diferentes tecnosuelos implicó definir las fracciones a utilizar de cada uno de sus componentes, considerando primero la

cantidad de jal a utilizar, y posteriormente la cantidad necesaria de roca caliza para neutralizar el Potencial de Acidez del correspondiente jal. Considerando, además un factor de protección debido a la posible acidez de la capa de jal oxidado en la presa de jales. A partir del correspondiente balance de masa se determinó la cantidad necesaria de cada componente.

### 3.7.1 Cantidad de roca caliza para neutralizar los jales

A partir del potencial de acidez de los jales (punto 3.5.1) y el potencial de neutralización de la caliza (punto 3.5.2), se calcula la cantidad de caliza necesaria que neutralizará la acidez producida por los jales, manteniendo una relación de  $PN/PA = 3$ .

A pesar de que la NOM-141-SEMARNAT-2003 indica que el valor límite es de 1.2, en este trabajo se recomienda que la relación de  $PN/PA$  sea igual 3, esta relación brindará una mayor capacidad para que el tecnosuelo no sea un potencial generador de drenaje ácido de mina. Se considera este valor al prevenir que en años posteriores la normatividad cambie dicha relación y ahora se considere una relación de 3.

De acuerdo con punto 3.5.2, el porcentaje de carbonato de calcio presente en la caliza es del 93.83%, a partir de este dato se obtiene la cantidad de caliza necesaria a partir del  $PN$  necesario para neutralizar los jales. Hay que recordar que el jal ya cuenta con material neutralizante, por lo que también se toma en cuenta.

Para obtener la cantidad de roca caliza necesaria para neutralizar el jal, se realiza con formula de la ecuación (13)

$$(PN_{jal} + PN_{caliza})/PA_{jal} = 3 \quad (13)$$

Al despejar  $PN_{caliza}$ , determinamos la cantidad necesaria de roca caliza para neutralizar el jal. La roca caliza estudiado no es puro, por lo que es necesario determinar la cantidad de roca caliza real para neutralizar el jal, se obtiene la cantidad necesaria de roca caliza al 93.83% de pureza, tal como se muestra en

la tabla 21 en la columna 5, donde el PA del jal en promedio es de 85.81, y para este valor se necesitan 268.43 kg CaCO<sub>3</sub> por cada tonelada de jal.

Tabla 21. Cantidad de caliza necesaria para neutralizar los jales

Clave de la muestra	Potencial de Neutralización <sub>Jal</sub> (PN) [kg CaCO <sub>3</sub> /t jal]	PA <sub>Jal</sub>	PN <sub>Jal</sub>	PN CALIZA 93.83 %
		[kg CaCO <sub>3</sub> /t jal]	[kg CaCO <sub>3</sub> /t jal]	[kg CaCO <sub>3</sub> /t jal]
CP3J-01	2.37	96.49	287.10	305.97
CP3J-03	4.6	94.57	279.11	297.45
CP3J-04	5.59	102.87	303.02	322.94
CP3J-05	3.36	88.38	261.78	278.99
CP3J-06	4.36	85.04	250.76	267.24
CP3J-07	4.11	70.54	207.51	221.15
CP3J-08	6.09	81.79	239.28	255.01
CP3J-09	7.33	85.03	247.76	264.04
CP3J-10	4.11	64.9	190.59	203.12
Promedio	4.65	85.51	251.88	268.43

La cantidad de roca caliza obtenida para neutralizar el jal, solo se considera en cuenta el jal presente en el tecnosuelo, de manera que es necesario agregar una cantidad extra de roca caliza para la protección de los jales que se encuentran en la parte inferior de la capa del tecnosuelo, ya que se ha observado que el espesor oxidado en varias presas de jales alcanza en promedio 30 cm. Como se observa en la figura 25, la capa A representa el tecnosuelo, la cual se considera con una altura de 25 cm, y la capa B es la altura de protección hacia los jales, la cual se considera con un espesor de 30 cm. Conociendo la densidad de los jales presentes, la altura y los kg de jal como base de cálculo, podemos determinar la cantidad de caliza extra que se tiene que agregar al tecnosuelo, la cual brindará protección extra en caso de que el jal que se encuentra en la capa de protección presente oxidación y esta oxidación avance hacia los jales que se encuentran por debajo de la capa de tecnosuelos.

La cantidad de jal que se consideró como base es de 500 kg, y la densidad de los jales es de 1.244 g/cm<sup>3</sup> (dato brindado en las hojas de fertilidad). Con ello se obtuvo el área que ocupa esta cantidad de jales en una altura de 25 cm; el

cual es de 1.6 m<sup>2</sup>. Al obtener el área, posteriormente se obtuvo la cantidad de jales que hay en 30 cm, y esta cantidad de jales nos brindaran la cantidad extra de roca caliza a agregar al tecnosuelo como método de prevención en la capa inferior al tecnosuelo.

La cantidad extra de roca caliza a agregar para el tecnosuelo con una altura de 25 cm, es de 295.3 kg. Como ya se mencionó antes, tomando en cuenta una relación de 3 entre el PN/PA, y la capa de protección extra de 30 cm en el jal.



Figura 25. Perfil de Tecnosuelo: A) Tecnosuelo, B) Altura de protección, C) Jales

### 3.7.2 Fracciones de Tecnosuelo por medio de balance carga.

Con el uso de una base de cálculo y la información generada en la etapa de caracterización de los diferentes materiales, se obtuvieron las diferentes fracciones para realizar el tecnosuelo. El cálculo toma como referencia las características del suelo de la zona. Estas características fueron el % de Materia Orgánica (%MO) y los macronutrientes NPK.

Concretamente, para el balance de carga, se tomó una base de cálculo, en la cual, dos valores son fijos, estos son la cantidad de jal y la cantidad de roca

caliza para agregar. De tal forma que solo se calculó la cantidad de suelo y el % MO que satisfacen los requerimientos establecidos.

Para las pruebas se determinó una base de cálculo de 1000 kg total de tecnosuelo. Se definió una cantidad de 500 kg de jal, a la cual le corresponden 295.3 kg de roca caliza (tomando en cuenta la capa de protección), de manera que el restante de suelo es 204.7 kg. Sin embargo, al mezclar el jal, roca caliza y suelo, teóricamente no alcanzan los valores de % MO de los suelos de referencia, por lo que fue necesario ajustar la carga con la enmienda orgánica.

La cantidad de enmienda orgánica se obtiene desarrollando la siguiente ecuación (14)

$$\frac{A(\%MO_{jal,caliza,suelo})}{100} + \frac{X(\%MO_{eo})}{100} = \frac{(A+X)(\%MO_{ref})}{100} \quad (14)$$

Al desarrollar la fórmula, la cantidad de enmienda orgánica a agregar queda expresada por la ecuación (15)

$$X = \frac{A(\%MO_{ref} - \%MO_{jal,caliza,suelo})}{(\%MO_{eo} - \%MO_{ref})} \quad (15)$$

Donde

A: kg de Jal+ kg Caliza + kg Suelo

*% MO jal, caliza, suelo*: suma de % MO presente en la mezcla de jal, caliza y suelo.

X: kg de Abono Orgánico.

*% MO eo*: % MO en la enmienda orgánica.

*% MO ref*: %MO en el suelo de referencia.

A partir de la masa de jal, roca caliza, suelo y enmienda orgánica, se obtiene el porcentaje que aporta cada uno de ellos al tecnosuelo.

Utilizando la hoja de cálculo se llegó a formular 3 tipos de tecnosuelos, los cuales fueron preparados experimentalmente para estudiar las mejores condiciones y cantidad de enmienda orgánica necesaria para que permita la germinación y desarrollo de especies vegetales. Concretamente, para nuestros experimentos se utilizó el pasto Ray Grass *Lolium perene sp.*

Las tres condiciones de tecnosuelo varían en la cantidad de materia orgánica agregada, el primero de ellos se tomó como testigo, sin agregar materia orgánica, el segundo tecnosuelo se formuló con la cantidad de materia orgánica de los suelos de referencia. Mientras que el último tecnosuelo se formuló con doble de materia orgánica, con respecto al suelo de referencia.

Los porcentajes de acuerdo con las tres variantes se muestran en la tabla 22.

**Tabla 22.** Porcentaje de cada componente en el tecnosuelo, de acuerdo con el balance de carga realizado.

	Tecnosuelo	Tecnosuelo + MO	Tecnosuelo + 2MO	Unidades
Jal	50.00	48.95	47.37	%
Caliza	29.53	28.91	27.98	%
Suelo	20.47	20.04	19.40	%
Enmienda orgánica	0.00	2.09	5.25	%
Total	100.00	100.00	100.00	%

Con las cantidades de cada formulación se determinó la fertilidad teórica de los elementos presentes en cada tecnosuelo. Estos resultados se presentan en la tabla 24. Estos valores se obtuvieron al tomar como base de cálculo 1000 kg, entre el jal, roca caliza y suelo.

Al adicionar la enmienda orgánica para cubrir los requerimientos de materia orgánica similares al suelo de referencia, la concentración teórica de los macroelementos NPK, resultó ser mayor que la del suelo de referencia, por lo que se espera que el tecnosuelo tenga mejores propiedades para el desarrollo de una cubierta vegetal

Tabla 23. Comparación de elementos en fertilidad en los 3 tecnosuelos estudiados con el suelo de referencia.

Nutriente	Suelo de Referencia	Tecnosuelo	Tecnosuelo+ MO	Tecnosuelo + 2MO	Unidades
MO	2.25	0.76	2.25	4.51	%
P-Bray	31.26	35.82	58.23	97.00	ppm
K	226.00	137.14	552.91	1228.14	ppm
Ca	2059.33	1929.97	2259.63	2947.78	ppm
Mg	219.33	89.22	205.97	399.81	ppm
Na	12.86	65.09	65.72	72.18	ppm
Fe	8.33	31.26	106.75	229.87	ppm
Zn	5.00	8.75	8.78	9.56	ppm
Mn	22.87	17.11	18.76	22.84	ppm
Cu	16.99	24.02	22.91	23.15	ppm
B	0.22	0.12	0.30	0.59	ppm
S	3.59	557.70	791.49	1211.49	ppm
N-NO3	21.61	5.25	521.05	1344.89	ppm
Al	131.00	26.82	25.41	25.41	ppm

### 3.8 Caracterización de los Tecnosuelos formados

#### 3.8.1 pH y CE en los Tecnosuelos

El pH en el tecnosuelo se encuentra entre 6.27 y 6.77 (tabla 24), de manera que el pH aumenta cuando disminuye la cantidad de jales en el tecnosuelo, lo cual es congruente ya que se incrementa la proporción de la roca caliza. Y además el pH también aumenta cuando se agrega una cantidad mayor de materia orgánica.

Al tener una menor cantidad de jales, se controla mejor la acidez del tecnosuelo, por que presenta una cantidad menor de pirita en los jales, los cuales producen la acidez. Además, se tiene reportado en la literatura (Cardona, 1996), que la materia orgánica aporta una capacidad buffer o amortiguadora, resistiendo cambios bruscos en el pH, como es el caso en la oxidación de la pirita.

La CE sigue el comportamiento inverso al pH, ya que, al presentarse un pH mayor, la conductividad eléctrica es menor, como es el caso del tecnosuelo +2MO, mientras que la conductividad eléctrica en el tecnosuelo, con un pH menor, la conductividad eléctrica aumenta.

Al realizar la comparación con el pH del suelo de referencia, se observa que los valores son muy parecidos. Sin embargo, la conductividad eléctrica en los tecnosuelos es mayor a los suelos de referencia, pero es menor a la CE que presentan los jales oxidados (3111.91 CE [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]), e incluso a los jales que aún no se encuentran oxidados como las muestras compuestas (1291.10 CE [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]).

**Tabla 24. Resultados de pH y CE en los Tecnosuelos**

Muestras	pH	CE [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
Tecnosuelo	6.27	845.00
Tecnosuelo + MO	6.47	991.33
Tecnosuelo + 2MOref	6.77	784.33

### 3.8.2 Balance Ácido-Base en los Tecnosuelos

Debido a que uno de los componentes principales del Tecnosuelo es el jal de la presa de Cananea, es necesario verificar que no presente un problema de generación de acidez. Concretamente, se buscaba que el Tecnosuelo presente una relación de PN/PA mayor a 3: Los resultados que se presentan en la tabla 25 muestran que la relación es superior a 3 en todos los casos evaluados.

El valor más alto se presentó en la muestra de Tecnosuelo + 2MO, esto se debe principalmente que en el tecnosuelo sin abono orgánico presenta una mayor cantidad de jales, y esto representa un valor mayor en el PA; mientras que la muestra de Tecnosuelo + 2MO contiene una menor cantidad de jales y además el abono orgánico brinda una función de amortiguamiento, por ello que presenta un valor mayor en el PN y menor en el PA; en donde la relación de PN/PA es el doble del esperado.



En cada uno de los tecnosuelos, la relación de PN/PA es mayor a 3, brindando una seguridad en que este tecnosuelo no producirá drenaje ácido de mina.

**Tabla 25. Resultados de PN y PA de los diferentes tecnosuelos, así como la relación de PN/PA.**

Clave de la muestra	Potencial de Neutralización (PN) [kg CaCO <sub>3</sub> /t jal]	Potencial de Acidez (PA)				Balance Ácido Base (PN/PA) Adimensional
		% S <sub>total</sub>	%S SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	% S <sup>2-</sup>	PA [kg CaCO <sub>3</sub> /t jal]	
<b>Tecnosuelo</b>	238.23	1.84	0.03	1.81	56.53	<b>4.21</b>
<b>Tecnosuelo +MO</b>	250.15	1.66	0.04	1.62	50.55	<b>4.95</b>
<b>Tecnosuelo + 2MO</b>	260.60	1.43	0.04	1.39	43.46	<b>6.00</b>

### 3.8.3 Concentración total de elementos químicos en los Tecnosuelos

En la tabla 26 se presenta la concentración total de elementos claves de los diferentes Tecnosuelos formados.

Se observa que los elementos como As, Mn y Fe, se encuentran en una concentración menor a los valores en los suelos de referencia, esto se debe a la dilución debido a la incorporación de roca caliza, que no contiene este tipo de elementos.

Elementos como Cu y Zn, presentan una concentración mayor, en comparación a los suelos de referencia, lo cual es congruente ya que el jal adicionado contiene estos elementos. Por otra parte, elementos regulados por la NOM-147-SEMARNAT-2004, como el Ba y el Pb presentan concentraciones por arriba de los valores del suelo de referencia; sin embargo, no superan los criterios establecidos en dicha norma para suelos de uso agrícola/residencia/comercial de 5400 mg/Kg y 400 mg/Kg respectivamente.

Es decir, las concentraciones observadas en los diferentes Tecnosuelos para elementos normados, no representan riesgo ambiental.

**Tabla 26. Concentración de elementos químicos en los tecnosuelos, y comparación con valores de fondo de suelos de referencia.**

	As	Ba	Cu	Mn	Pb	Zn	%Fe
	mg/Kg						%
Valores de Fondo en Suelos	26.60	249.17	128.47	985.97	51.74	131.03	3.08
Tecnosuelo	26.55	337.33	788.07	763.43	71.2	269.82	1.70
Tecnosuelo + MO	24.474	377.24	689.40	717.78	65.34	241.83	1.54
Tecnosuelo + 2MOref	25.408	363.67	668.42	647.44	58.00	235.69	1.43

### 3.8.4 Geodisponibilidad de EPT en los Tecnosuelos

Para asegurar que los diferentes Tecnosuelos no generarán un problema ambiental se evaluó su peligrosidad al ambiente a través de la prueba de geodisponibilidad establecida en la NOM-147-SEMARNAT-2004. Los resultados indican que los elementos potencialmente tóxicos se encuentran por debajo de los límites de detección (tabla 27), con ello se asegura que el tecnosuelo en cada uno de los casos cumpla con los criterios establecidos de acuerdo con la geodisponibilidad de EPT, asegurando que los tecnosuelos no presentan problemas hacia el ambiente.

**Tabla 27. Resultados de Geodisponibilidad de EPT en los diferentes tecnosuelos.**

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Se
LD (mg/L)	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.06
Clave de muestra	mg/L						
Tecnosuelo	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Tecnosuelo +MO	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Tecnosuelo +2MO	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

### 3.9 Evaluación de los diferentes Tecnosuelos a partir de experimentos de germinación de pastos (Experimentos en invernadero)

La eficiencia de los Tecnosuelos se evaluó en función del desarrollo de una cubierta vegetal. La especie utilizada para el experimento fue el pasto Ray Grass *Lolium perene* sp.

La dosis de pasto sembrado fue de 100 semillas en macetas de 500 cm<sup>3</sup>. La cantidad de tecnosuelo utilizada fue de 375 g y se utilizaron duplicados para cada tecnosuelo.




Los resultados indicaron que a los 10 días se observa una buena germinación de pastos para los 3 tecnosuelos, como se puede observar en la tabla 28.

Tabla 28. Porcentaje de germinación de pasto en tecnosuelos

Tecnosuelo	Semillas	% Germinación
Tecnosuelo	100	93
Tecnosuelo + MO	100	87
Tecnosuelo + 2MO	100	95




A los 30 días se evaluó el desarrollo en cada maceta mediante la medición de la altura de cada pasto. Se observa el efecto de la adición de materia orgánica, a mayor contenido, mayor altura (Tabla 29).

Tabla 29. Evaluación de la altura de pasto después de 30 días.

Memoria Fotográfica			
Tecnosuelo	Tecnosuelo	Tecnosuelo + MO	Tecnosuelo + 2 MO
Altura a 30 días	6 cm	10 cm	13 cm

Finalmente, a los 60 días se evaluó el crecimiento de los pastos, figura 30, el Tecnosuelo al que no se le agregó MO, mostró un crecimiento similar al Tecnosuelo con MO, con 50 cm de altura; sin embargo, comenzó a secarse, posiblemente por falta de nutrientes. Mientras que en el Tecnosuelo + 2 MO, el pasto presentó un desarrollo adecuado alcanzado hasta 60 cm de altura.

Tabla 30. Evaluación de crecimiento en tecnosuelos a los 60 días.

Memoria Fotográfica			
Tecnosuelo	Tecnosuelo	Tecnosuelo + MO	Tecnosuelo + 2 MO
Altura a 60 días	50 cm	50 cm	60 cm

#### 4. Hoja de cálculo en Excel para determinar fracciones de cada componente en un tecnosuelo.

En el desarrollo de los diferentes tecnosuelos mencionados anteriormente, se emplearon varias fórmulas, para determinar paso a paso lo que necesita el tecnosuelo, como fue la cantidad necesaria de roca caliza para prevenir el drenaje ácido de mina, de acuerdo con una relación de PN/PA igual a 3, así como la cantidad de roca caliza extra que forma la capa de protección, entre los jales y el tecnosuelo. También se emplea un balance en el %MO, para que el tecnosuelo formado por jal, roca caliza y suelo, alcance por medio de la adición de enmienda orgánica, valores semejantes a los suelos de referencia.

El objetivo de contar con una hoja de cálculo es simplificar el proceso desarrollo. Para obtener de manera rápida, precisa y exacta la cantidad de cada componente a utilizar.

La figura 26, muestra los valores datos necesarios para obtener la fracción de cada componente en el tecnosuelo, como es la relación de PN/PA buscada, %Pureza en la roca caliza, %Pureza de la roca caliza de acuerdo con el dato

de PN, Densidad de los jales obtenida en hojas de fertilidad, altura la capa de tecnosuelo, altura de la capa de seguridad, kg de tecnosuelo como base de cálculo y kg de jal que se implementara en el tecnosuelo.

Datos		Unidades
Relacion PN/PA	3	
%(PN)Pureza roca caliza	93.83	
Densidad Jal	1.244	g/cm <sup>3</sup>
h Tecnosuelo	0.25	m
h de seguridad	0.35	m
Kg de Tecnosuelo	1000	Kg
Kg de Jal en Tec	500	Kg

Figura 26. Datos necesarios para realizar el balance y obtener las fracciones del tecnosuelo en la hoja de cálculo.

Además, la hoja de cálculo que cuenta con 3 apartados, donde se agregan datos obtenidos durante la caracterización de los materiales, como PA y PN de los jales y resultados de fertilidad de los componentes. En la última hoja se emplea, ya con todos los datos y parámetros establecidos, el balance de elementos y %MO de manera teórica, comparando dichos valores con el suelo de referencia. Por último, se presenta la fracción de cada componente, y con esto se puede realizar el tecnosuelo para así caracterizarlo y ponerlo a prueba en invernaderos (figura 27).

Datos		Unidades		Datos Obtenidos		Unidades		Maceta experimental									
Relacion PN/PA	3			Caliza Nec	322.13	Kg		Maceta	Jal	Caliza	Suelo	Iono Organi	Total Kg				
Caliza	93.93			Suelo	177.87	Kg		Maceta	Jal	Caliza	Suelo	Iono Organi	Total Kg				
Densidad								Tecnosuelo + 1	0.4892	0.3162	0.1740	0.0293	1.01				
Jal	1.244	g/cm3						Tecnosuelo + 2	0.4734	0.3050	0.1684	0.0723	1.02				
h	0.25	m															
h de seguridad	0.35	m															
Kg de Tecnosuelo	1000	Kg															
Kg de Jal en Tec.	500	Kg															

Tecnosuelo		Tecnosuelo		Tecnosuelo + MO		Tecnosuelo + MO		Tecnosuelo + 2MO/af		Tecnosuelo + 2MO/af			
Jal	50.00	%	Nutriente	Tecnosuelo	Suelo de Fiel	Unidades	Jal	43.32	%	Nutriente	Tecnosuelo	Suelo de Fiel	Unidades
Caliza	32.21	%	MO	0.71	2.21	%	Caliza	21.92	%	MO	2.25	2.25	%
Suelo	17.79	%	P-Bras	35.98	31.26	ppm	P-Bras	58.15	31.26	ppm	P-Bras	97.82	31.26
Abono Org	0.00	%	K	194.14	226.00	ppm	K	583.95	226.00	ppm	K	1228.18	226.00
Total	100.00	%	Ca	1825.60	2098.33	ppm	Ca	2284.44	2098.33	ppm	Ca	2864.98	2098.33
			Mg	84.83	218.33	ppm	Mg	206.76	218.33	ppm	Mg	389.60	218.33
			Na	66.85	12.86	ppm	Na	67.48	12.86	ppm	Na	73.94	12.86
			Fe	32.04	8.33	ppm	Fe	100.00	8.33	ppm	Fe	223.13	8.33
			Zn	8.87	5.00	ppm	Zn	8.31	5.00	ppm	Zn	9.69	5.00
			Mn	8.92	22.87	ppm	Mn	18.85	22.87	ppm	Mn	22.72	22.87
			Cu	24.28	16.50	ppm	Cu	23.12	16.50	ppm	Cu	22.37	16.50
			B	0.12	0.22	ppm	B	0.30	0.22	ppm	B	0.58	0.22
			S	576.40	3.59	ppm	S	817.52	3.59	ppm	S	1237.51	3.59
			NANOS (NH)	4.70	21.61	ppm	NANOS (NH)	527.51	21.61	ppm	NANOS (NH)	126.11	21.61
			Al	23.30	191.00	ppm	Al	22.06	191.00	ppm	Al	22.06	191.00

Figura 27. Hoja de cálculo que brinda las fracciones de cada componente en el tecnosuelo

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

Los jales estudiados no presentan un problema de geodisponibilidad de EPT's actualmente; sin embargo, son catalogados como peligrosos por su potencial generación de drenaje ácido. Esto implica que al paso del tiempo estos jales se pueden oxidar y presentar un gran problema de generación de drenaje ácido de mina; esto se predice al saber que la relación de PN/PA de los jales es mucho menor a 3, así como el tamaño de partícula pequeño (405.72  $\mu\text{m}$ ). La gran cantidad de este material que existe en la presa de jales de Cananea y el hecho que ha llegado prácticamente al límite de su capacidad de almacenamiento, hacen que la presa tenga importancia ambiental, por lo que se justifica trabajar en un plan de abandono estratégico que incluya el desarrollo de una cubierta, la cual aísle los jales aun no oxidados, previniendo el drenaje ácido de mina y cumpliendo con la regulación de la NOM-141-SEMARMAT-2003.

La cubierta propuesta en este trabajo, presento las siguientes características:

Brinda una relación de PN/PA mayor a 3, lo cual asegura el control de pH en caso de generación de drenaje ácido.

Por medio de un balance se puede optimizar cada uno de los componentes utilizados en la cubierta, la cual ayuda de manera favorable al conocer la

fracción de cada componente, este dato se obtiene a partir del balance realizado en la hoja de cálculo, que al proporcionar datos concretos de caracterización de los componentes como el jal y roca caliza, se optimiza la fracción cada componente en el tecnosuelo de acuerdo a los requerimientos que establece la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Los componentes empleados para el tecnosuelo son aledaños a la zona, esto baja los costos que implica su formación.

El tecnosuelo estudiado cumple con el control óptimo de pH y CE, presentando valores cercanos al suelo de referencia.

La materia orgánica agregada al tecnosuelo ayuda de manera eficaz al proporcionar los micronutrientes necesarios (similar al suelo de referencia) para que se lleve a cabo el crecimiento de flora.

Elementos como Ba y Pb se encuentran en una concentración mayor a los suelos de referencia; sin embargo, cumplen la concentración de suelo de uso agrícola/residencial/comercial bajo norma NOM-147-SEMARNAT-2004.

Los 3 tipos de tecnosuelos estudiados son favorables en cuanto a las características geoquímicas presentadas, sin embargo cuentan con algunas diferencias: una mayor cantidad de materia orgánica brinda un mejor control de pH y una relación de PN/PA mayor. Estas condiciones favorables en el tecnosuelo se ven reflejadas en el pasto germinado, ya que a mayor cantidad de materia orgánica también se presenta una mayor cantidad de pasto germinado y una mayor altura de crecimiento.

Dada las dimensiones de la presa de jales, es óptimo el uso de un tecnosuelo a base de jales, ya que se logra disminuir el uso de otros componentes como suelo y roca caliza, que sin duda disminuye considerablemente los costos.

Como trabajos posteriores para el estudio de los tecnosuelos, se recomienda utilizar estos tecnosuelos a nivel laboratorio, donde se evalúen sus características como retención y filtración de agua, porosidad, crecimiento de flora endémica y llevar esta evaluación a nivel de campo. Así también, con la ayuda de la hoja de cálculo realizada, buscar otras alternativas de tecnosuelos,



donde diferentes presas de jales presenten problemas similares, y encontrar de manera sencilla la cantidad de cada componente para llegar a crear el tecnosuelo, buscado e implementarlo como cubierta geoquímica en el abandono seguro de una presa de jales.

## 6. Referencias

- Agustin, M. A. (2005). *DIAGNÓSTICO DEL IMPACTO AMBIENTAL DE JALES MINEROS SOBRE TERRENOS DEL MUNICIPIO EL ORO DE HIDALGO, ESTADO DE MÉXICO*. Atizapan de Zaragoza : INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY .
- Instituto de Geología . (2019). *Informe de Resultados Cananea 2019*. Instituto de Geología , Geología . México: Instituto de Geología UNAM.
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina, generación y tratamiento*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España, pp 31-44.
- Barriga, F. M. (2016). Creación de tecnosuelos a partir de residuos mineros para favorecer el desarrollo de la vegetación y conseguir una rehabilitación paisajista. En F. B. Serrato, *Cuestiones sobre Paisaje, patrimonio natural y Medio Ambiente en el Sureste Ibérico* (págs. 234-240). Murcia: Universidad de Murcia .
- Bijvoet, J. M. (1972). *Early Papers on Diffraction of X-rays by Crystals. II Utrecht* . Oosthoek's N.V, pp 28-30.
- Cardona, A. (1996). Capacidades de amortiguamiento ácido de diversos suelos forestales del sistema central. *Ecología*, 63-69.
- Castells, X. E. (2012). *Reciclaje de Residuos Industriales*. Madrid, España: Díaz de Santos, pp 639-641
- COMMISSION, U. S. (2015). *Southern Copper Corporation*. Washington, DC, pp 30-32
- Gil, J. A. (2016). *Drenaje ácido de mina en la faja Pirítica Ibérica*. (2. 192, Trad.) Huelva, España: Alonso Barba, pp 192, 213.
- GRUPO-MÉXICO. (2018). *Annual Report 2018*. México: SOUTHERN COPPER, pp 62-63
- INEGI, I. N. (2015). *Encuesta Intercensal Sonora*. INEGI. Sonora: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- Martínez, I. P. (2015). Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1), 1-12.
- Macías F. (2013). Tecnosuelos. Suelos a la carta, Departamento de Edafología y Química Agrícola, pp 18-19.
- Morales, L. N. (2016). Tesis: *Comportamiento ambiental de residuos minero*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Pp 33-44.
- Moreno, J. L. (s.f.). *Las Presas de Jales en Cananea*. Recuperado el 14 de 08 de 2021, de El Colegio de Sonora: <https://www.colson.edu.mx/coldetalle.aspx?cx=338>
- Muñoz, J. O. (2008). *Planes de Cierre Mineros*. Chile: Ingeniería de Minas Universidad de La Serena, pp 8-10.
- Puga, S. (2006). Contaminación por metales pesados en el suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada* , 1-2.
- NOM-052-SEMARNAT, S. d. (2005). *Norma Oficial Mexicana (NOM-052-SEMARNAT)*. México: Diario Oficial de la Federación.
- NOM-141-SEMARNAT, S. d. (2003). *Norma Oficial Mexicana (NOM-141-SEMARNAT)*. México: Diario Oficial de la Federación.
- NOM-147-SEMARNAT, S. d. (2004). *Norma Oficial Mexicana (NOM-147-SEMARNAT)*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Pérez, D. C. (2013). Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 427-446.
- Rico, I. V. (2018). *LOS TECNOSUELOS COMO ALTERNATIVA PARA LA GESTIÓN DE PROBLEMAS DE DEGRADACIÓN AMBIENTAL*. Madrid: UNIVERSIDAD COMPLUTENSE. pp 16-17

- Ríos-Esparza, A. M. (9 de Marzo de 2018). ESTABILIZACIÓN DE JALES MINEROS UTILIZANDO BIOCARBÓN Y COMPOSTA PARA PROMOVER EL CRECIMIENTO DE PASTOS E INMOVILIZAR ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS. *XLII Congreso Nacional De La Sociedad Mexicana De La Ciencia Del Suelo*, pág. 142.
- Rodríguez, M. A. (1997). *Tesis: Diseño de una planta de tratamiento para el drenaje ácido de una mina en el Estado de México*. Estado de México, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, pp 76-79.
- Romero, F. M. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 43-53.
- Ruiz, M. G. (Agosto de 2007). Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México. *Revista Mexicana de ciencias geológicas*, 24(2).
- Santibáñez, C. (2011). *Fitoestabilización de depósitos de relaves en Chile*. Chile: InnovaChile. Pp 9-13.
- Santos, J. E. (2013). Influencia de jales mineros sobre el río Maconí, Querétaro, y evaluación. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 645-660.
- Sepúlveda, T. V. (2004). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp 34-36, 121-131.
- SGM, Servicio Geológico Mexicano. (2011). *INVENTARIO FÍSICO DE LOS RECURSOS MINERALES DE LA CARTA CANANEA H12-B53*. México: Inventarios Mineros 2011.
- Valdebenito, A. (1998). *Tesis: Aspectos Técnicos y Ambientales de un Tranque de Relaves*. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica De Valparaíso, pp 69-80.

VERDYOL, E. (s.f.). *Verdyol Biotic Earth™*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2021, de Verdyol Biotic Earth™: <https://www.bioticearth.com/es/products/enmiendas-bioticas-para-suelos/verdyol-biotic-earthtm>

Zaragoza, V. D. (2019). Implicaciones ambientales y restauración de las presas de jales de la minería. *Ciencias biológicas y químicas.*, 32-44.

Zúñiga, F. B. (1999). *Introducción al Estudio de la Contaminación del Suelo por Metales Pesados*. Mérida, Yucatán, México: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán, pp 41

## 7. ANEXO

### 7.1 Difractograma en muestra de jales

Difractograma obtenido, todas las muestras compuestas de Jales presentan el mismo difractograma.

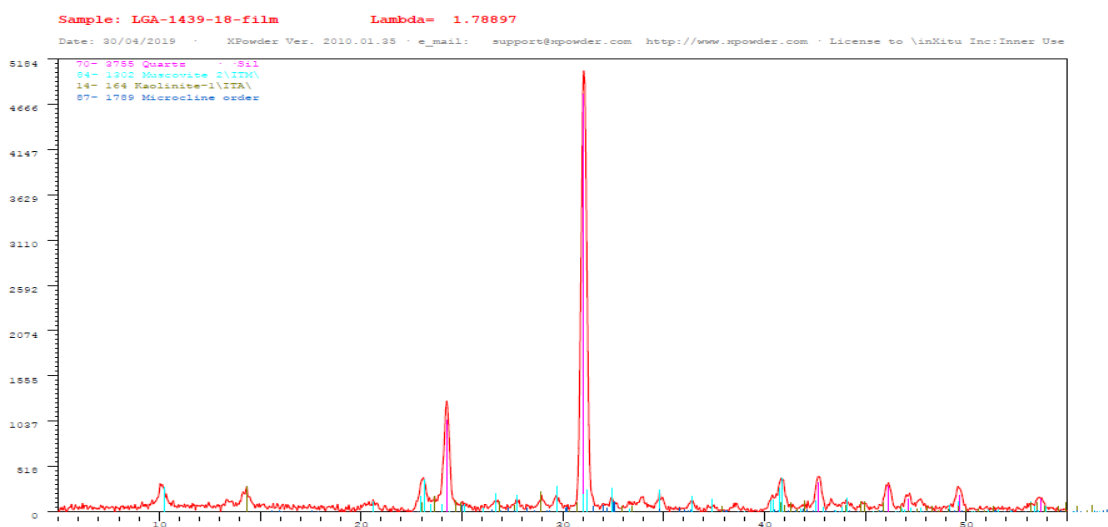


Figura 28. Difractograma de la muestra de Jales.

### 7.2 Controles de calidad en las pruebas realizadas durante la experimentación

#### 7.2.1 Precisión y exactitud en resultado de pH, CE, Potencial de neutralización, determinación de azufre de sulfatos, Análisis de extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>.

Para verificar la calidad de los análisis, se evaluó el 20% de las muestras por duplicado y con los resultados se calculó la diferencia porcentual relativa (DPR) entre las muestras. Se considera aceptable un DPR en el intervalo de  $\pm 20\%$ . A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

## Precisión, Potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE)

*DPR de la medición de pH y CE*

Clave de la muestra	pH	CE
		(uS/cm)
CP3J-02	4.69	2020
CP3J-02 Dup	4.60	2020
<b>DPR (%)</b>	<b>1.94</b>	<b>0.00</b>
CP3J-07	7.84	1315
CP3J-07 Dup	7.84	1316
<b>DPR (%)</b>	<b>0.00</b>	<b>0.08</b>

## Precisión, Potencial de Neutralización

*DPR de la determinación de Potencial de Neutralización*

Clave de la muestra	PN
CP3J-10	4.11
CP3J-10 Dup	4.35
<b>DPR (%)</b>	<b>5.89</b>

## Precisión, Determinación de azufre de sulfatos

*DPR de la determinación de azufre como sulfatos*

Clave de la muestra	% S SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
CP3J-01 Dup	0.20
CP3J-01	0.21
<b>DPR (%)</b>	<b>7.02</b>
CP3J-02 Dup	0.28
CP3J-02	0.27
<b>DPR (%)</b>	<b>5.70</b>
CP3J-06 Dup	0.08
CP3J-06	0.08
<b>DPR (%)</b>	<b>5.48</b>
CP3J-07 Dup	0.14
CP3J-07	0.14
<b>DPR (%)</b>	<b>0.11</b>

### Exactitud, Determinación de azufre de sulfatos

La exactitud se evaluó con el material de referencia Multi-elemental Cat #IC-2 preparado a una concentración de 10 mg/L para sulfatos aniones. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

*Exactitud de la determinación de azufre como sulfatos*

<b>Estándar</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>
10mg/L	10.09
<b>Exactitud (%)</b>	<b>99.09</b>

### Precisión, Análisis por Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X

Para determinar la precisión de los análisis de FRX, las mediciones se realizaron por triplicado. Se considera aceptable un coeficiente de variación (CV) menor al 20%.

#### **CV de FRX Cananea, Presa 3 Jales**

*Coefficiente de variación de los triplicados del análisis mediante FRX*

Analito	Mo	Pb	Se	As	Hg	Zn	Cu	Mn	Cr	Ba	Sb	Cd	Ag	Ca	Fe
Clave de la muestra	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)														
CP3J-01	23.31	6.33	NA	3.48	NA	9.32	13.44	9.30	6.34	2.18	NA	NA	NA	4.03	2.49
CP3J-02	13.55	11.55	NA	15.68	NA	6.23	4.20	0.81	6.93	2.05	NA	NA	NA	2.15	2.40
CP3J-03	76.17	5.45	NA	4.18	NA	8.51	4.55	11.15	3.39	5.31	NA	NA	NA	3.48	2.91
CP3J-04	6.61	12.41	NA	7.43	NA	2.85	4.23	6.59	1.17	6.90	NA	NA	NA	3.33	8.11
CP3J-05	19.82	8.07	NA	6.76	NA	4.71	3.45	1.26	3.94	1.91	NA	NA	NA	3.67	3.47
CP3J-06	47.77	2.15	NA	11.54	NA	4.39	9.89	2.91	6.86	6.77	NA	NA	NA	1.33	4.09
CP3J-07	66.36	2.80	NA	14.42	NA	6.97	6.51	3.65	1.98	4.16	NA	NA	NA	2.44	1.93
CP3J-08	34.27	9.13	NA	17.26	NA	15.06	1.79	3.75	0.64	3.96	NA	NA	NA	0.93	1.53
CP3J-09	20.34	6.51	NA	9.94	NA	10.89	15.63	2.96	1.34	4.24	NA	NA	NA	1.38	2.91
CP3J-10	12.15	14.81	NA	13.09	NA	3.98	11.12	3.00	5.80	5.98	NA	NA	NA	3.49	1.57

NA: No aplica



## Exactitud del Análisis de Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X

Con el propósito de identificar alguna contaminación inducida, se analizó un blanco de óxido de silicio. Para determinar la exactitud en FRX se analizó el estándar certificado NIST-2710<sup>a</sup>, como control analítico cada 20 muestras. Se considera aceptable la exactitud con un intervalo de 100±20%.

*Exactitud del análisis de FRX*

Analito	Mo	Pb	Se	As	Hg	Zn	Cu	Mn	Cr	Ba	Sb	Cd	Ag	Ca	Fe
LD (mg/kg)	15	13	20	11	10	25	35	85	85	100	10	12	10	500	0.00%
Blanco (SiO <sub>2</sub> )	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1676.08	<LOD
Valor de referencia	NA	5520	1	1540	9.88	4180	3420	2140	23	792	52.5	12.3	40	9190	4.32
SRM Montana 2710a	NA	5207.88	<LOD	1559.95	<LOD	4066.97	2906.36	1885.55	<LOD	298.7	<LOD	12.31	28.04	7462.83	3.99
Exactitud (%)	NA	94.18	<LOD	101.29	<LOD	97.26	83.76	87.36	<LOD	9.55	ND	100.08	64.84	79.26	92.06

LD: Límite de detección de fábrica  
<LOD: Menor al límite de detección, ND: No detectado

## Precisión del Análisis de extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>

Analito	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Se
λ (nm)	328.10	193.70	233.50	226.50	267.70	220.30	196.00
LD (mg/L)	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
LC (mg/L)	0.02	0.08	0.03	0.03	0.03	0.08	0.11
Blanco	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
CP3J-09	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
CP3J-09 DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
DPR (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA: No aplica