



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES PESADOS EN
JALES MINEROS DE CEDRAL, S.L.P: COMPARACIÓN CON OTRAS
LOCALIDADES MINERAS EN MÉXICO**

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

P R E S E N T A

JENY ANGÉLICA HERNÁNDEZ ZÚÑIGA

ASESOR

DRA.OFELIA MORTON BERMEA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2018



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: M. en C. Antonio Huerta Cerdán

VOCAL: M. en M. Juan Manuel De la Rosa Canales

SECRETARIO: Dra. Ofelia Morton Bermea

1er. SUPLENTE M. en C. Blanca Paz Díaz

2º SUPLENTE: I.Q.M. Ilse Irene Hernández Mendoza

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de ICP-MS, Instituto de Geofísica, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

Dra. Ofelia Morton Bermea

SUSTENTANTE:

Jeny Angélica Hernández Zúñiga

Índice

Listado de figuras y tablas.....	V
Resumen.....	VI
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Generalidades.....	1
Capítulo 2 Antecedentes.....	4
2.1 Historia de la industria minero-metalúrgica de Cedral, S.L.P.	4
2.2.1 Proceso de “beneficio de patio”	4
2.2 Estudios previos respecto a metales pesados en otras localidades mineras en México	6
2.2.1 Complejo minero de Taxco de Alarcón, Guerrero	6
2.2.2 Complejo minero de Guanajuato.....	7
2.2.3 Complejo minero de Hidalgo.....	8
2.2.4 Complejo minero de San Luis Potosí.....	8
2.3 Proceso de beneficio de minerales	10
2.3.1 Conminución.....	10
2.3.2 Clasificación.....	11
2.3.3 Métodos de concentración	11
2.3.3.1 Método fisicoquímico: Flotación	12
2.3.3.2 Método físico: Separación gravimétrica	12
2.3.3.3 Método físico: Separación magnética.....	13
2.3.4 Separación Líquido-Sólido	13
2.4 Jales mineros	15
2.4.1 Características de los jales mineros.....	15
2.4.1.1 Tamaño de partícula	15
2.4.1.2 Mineralogía de los jales	15
2.4.2 Impacto ambiental de los jales	16
2.5 Metales pesados contenidos en jales mineros	18
2.5.1 Metales pesados considerados como potencialmente tóxicos en el medio ambiente.....	18
2.5.1.1 Mercurio.....	18
2.5.1.2 Plomo	19
2.5.1.3 Arsénico	20
2.5.1.4 Cadmio	22

2.5.1.5 Cromo	23
2.5.1.6 Cobre.....	24
2.5.1.7 Zinc	25
2.5.1.8 Antimonio	26
2.6 Técnicas analíticas para determinar la concentración de metales pesados contenidos en jales mineros	28
2.6.1 Espectrometría de Absorción Atómica (AAS).....	28
2.6.2 Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS)	29
2.6.3 Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF).....	30
2.6.3.1 Principio del análisis de Fluorescencia de Rayos X	30
2.6.3.2 Instrumentación	30
2.6.3.3 Análisis cualitativo y cuantitativo	31
Capítulo 3 Justificación.....	32
Capítulo 4 Objetivos	33
4.1 Objetivo general	33
4.2 Objetivos particulares	33
4.3 Hipótesis	33
Capítulo 5 Zona de estudio	34
5.1 Área de estudio.....	34
5.1.1 Generalidades de Cedral, S.L.P.....	35
5.1.2 Clima	35
5.1.3 Suelo	35
5.1.4 Jales mineros	35
Capítulo 6 Metodología.....	36
6.1 Muestreo	36
6.2 Análisis químico.....	37
6.3 Análisis estadístico	37
Capítulo 7 Resultados y Discusión.....	39
7.1 Concentración total de metales pesados contenidos en jales mineros de Cedral, S.L.P.	39
7.2 Matriz de correlación de Pearson de las concentraciones totales de los metales pesados analizados en la zona de estudio	42
7.3 Comparación de las concentraciones de metales pesados contenidos en jales de Cedral, S.L.P. con otros sitios mineros en México	45

Capítulo 8 Conclusiones	47
Referencias bibliográficas	49
Anexo I	58
1.1 Prueba de Kolmogorov-Smirnov.....	58
1.2 Correlación de Pearson.....	58

Listado de Figuras

Figura 2.1	Métodos de concentración de minerales.....	11
Figura 2.2	Diagrama general de los pasos del proceso de beneficio de minerales.....	14
Figura 2.3	Diagrama de factores que determinan el potencial de contaminación de los jales mineros.....	16
Figura 2.4	Impacto ambiental de los jales mineros.....	17
Figura 5.1	Mapa de localización de la zona de estudio, Cedral,S.L.P.....	34
Figura 6.1	Diagrama general de los pasos de la metodología.....	38
Figura 7.1	Graficas de caja y bigotes donde se compara las concentraciones de metales pesados contenidos en los jales del El Caballo y Jesús María.....	41

Listado de Tablas

Tabla 6.1	Identificación de las muestras seleccionadas para este estudio.....	36
Tabla 7.1	Concentración total de metales pesados contenidos en jales mineros de Cedral, S.L.P.....	40
Tabla 7.2	Matriz de correlación de Pearson para los datos obtenidos para las muestras de jales analizadas de la localidad El Caballo.....	42
Tabla 7.3	Matriz de correlación de Pearson para los datos obtenidos para las muestras de jales analizadas de la localidad Jesús María.....	43
Tabla 7.4	Comparación de las concentraciones de metales pesados contenidos en jales de Cedral, S.L.P. con otros sitios mineros en México.....	45

Resumen

México, al ser un país con grandes recursos mineros, ha explotado grandes yacimientos de minerales desde la época colonial, lo cual ha generado grandes volúmenes de residuos conocidos como jales mineros. Algunos de ellos con altos contenidos de metales pesados pueden presentar un riesgo potencial para el medio ambiente y la población al estar sujetos a la dispersión eólica e hídrica

El municipio de Cedral, S.L.P. formó parte de un sistema minero/metalúrgico donde se establecieron haciendas de beneficio que procesaban vetas de Ag a través del método de patio (amalgamación con Hg), los jales generados fueron depositados en el sur y noroeste de la zona urbana. Estos residuos producto de la actividad minera pasada pueden representar una fuente de contaminación importante para el municipio.

El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial de riesgo ambiental de los jales mineros en la zona de Cedral, en términos de concentración total de metales pesados y comparar los resultados con los reportados en otras zonas mineras en México.

Se seleccionaron 20 muestras de jales de los cuales 10 son de la Hacienda El Caballo (sur) y 10 de la Hacienda Jesús María (noroeste). Para conocer la concentración total de los metales pesados en los residuos se empleó la técnica de Fluorescencia de Rayos X.

Los resultados de este estudio indican que, en los dos sitios analizados el metal pesado más concentrado es el Pb, con una concentración total de 6433.5 mg/Kg en El Caballo y 10,726 mg/Kg en Jesús María respectivamente. Mientras que los metales menos concentrados son Cr, Cd y Ag. Además el sitio Jesús María presenta las concentraciones más altas de los metales pesados analizados con excepción de Cd.

Por otro lado los resultados fueron comparados con los reportados en otros sitios mineros en México y con la Norma Oficial Mexicana NOM-157-2009. La evaluación de los datos indica que, las concentraciones de Cr (Jesús María y El Caballo) Cu y Ag (Jesús María) son más altas que las reportadas en las localidades de Taxco, Distrito de Guanajuato, La Aurora, Pachuca-Real del Monte, Wadley, Sta. María y Charcas. Además las concentraciones de Pb, Sb, Cd, Cr y Ag (con excepción en El Caballo) en los sitios de Cedral exceden el valor límite recomendado por la norma.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Generalidades

En México, la minería es una actividad económica que genera importantes ingresos la cual se ha desarrollado por casi cinco siglos. México, tiene un potencial minero importante, según datos de la Cámara Minera de México (CAMIMEX) en el año 2017, nuestro país ocupó el primer lugar a nivel mundial en la producción de plata, de igual modo destacó entre los 10 primeros lugares en la producción de cobre, zinc, plomo, fluorita, oro, barita, yeso y celestita. Los principales estados mineros en México son: Sonora, Zacatecas, Chihuahua, San Luis Potosí y Durango. En estos estados se explota principalmente minerales de plomo, cobre, zinc, entre otros.

A pesar de que la minería en México ha sido uno de los pilares para su desarrollo, esta ejerce un impacto ambiental adverso debido a la gran generación de residuos que se produce en la explotación de yacimientos de minerales. Los “jales”, como se conocen en México y “colas” o “relaves” en otros países de América Latina, son apilamientos de residuos que provienen de los procesos de beneficio de las rocas, hasta la obtención del mineral deseado.

Los jales generalmente se depositan en sitios cercanos al lugar donde se realiza la explotación de minerales. En algunos casos, este material es reprocesado para recuperar elementos de interés que no fueron considerados en el primer tratamiento de extracción. Los jales presentan un contenido mineralógico diverso, incluyendo sulfuros, silicatos, óxidos, fosfatos, sales y carbonatos. Frecuentemente los minerales sulfurados contenidos en los jales se encuentran expuestos a procesos de intemperismo tales como reacciones de óxido-reducción, de ácido base, hidrólisis etc. que permite la liberación de elementos potencialmente tóxicos (EPT).

Entre los elementos liberados se encuentran los metales pesados, que no pueden ser degradados biológica ni químicamente. Los metales persisten en el ambiente y en algunos casos se transforman en formas químicas más tóxicas (Méndez, 2017). Cuando los metales pesados se encuentran en forma soluble, estos pueden movilizarse causando diferentes tipos de impacto en el entorno ambiental, por ejemplo:

- En el suelo provocan cambios de alcalinidad, desequilibrio en el contenido de nutrientes fundamentales. Los metales contenidos en la superficie pueden presentarse en forma biodisponible para los seres vivos a través de la cadena trófica.
- Las plantas que crecen en suelos contaminados generalmente absorben metales pesados. La acumulación de metales puede ocurrir en tallo, hoja y fruto causando problemas muy variados como la disminución en el crecimiento, daños en los cloroplastos, y perturbación en el proceso de fotosíntesis.
- El agua contaminada por metales pesados puede exhibir variaciones de pH, conductividad, color, entre otros. Esto implica la pérdida de la calidad del agua.
- La exposición por metales pesados en seres humanos provoca diversos daños. Esto depende mucho de la forma química del elemento.

México estableció unas series de lineamientos encaminados a la protección ambiental relacionada al impacto nocivo de los jales mineros. En el año 2004, fue aprobada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), una norma para la adecuada disposición de jales, la cual solo aplica para nuevos proyectos. Sin embargo, como producto de la actividad minera pasada, existen toneladas de jales de los que no se conocen sus condiciones (Ramos et al. 2006).

En México, el impacto de los jales ha sido estudiado en diferentes regiones mineras (Mendoza et al. 2006; Ramos et al. 2006; Mendel et al. 2008; Romero et al. 2008; Moreno et al. 2009; López, 2009; Romero et al. 2010; Ramos et al. 2012; Corrales et al. 2013; Ramos, 2017), con el fin de obtener información relacionada a la cuantificación, caracterización y evaluación de su potencial tóxico. En algunos casos en estos trabajos se presentan recomendaciones para la protección de la dispersión de contaminantes en la zona.

La localidad minero/metalúrgica de Cedral, S.L.P. representa una problemática dada a su trayectoria como centro de procesamiento de mineral de Ag desde el Siglo XVII.

Se han realizado varios estudios en esta zona referentes a la caracterización mineralógica y geoquímica de jales y suelos en la zona, principalmente relacionados a la evaluación de Hg y Pb, pero no existen estudios respecto a metales pesados. Los autores Flores et al. 2012; Morton et al. 2015; Vargas, 2016; Leura et al. 2017 mencionan que la zona es un ejemplo típico del impacto ambiental generado por los jales mineros derivados del proceso de extracción.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 Historia de la industria minero-metalúrgica de Cedral, S.L.P.

La localidad de Cedral es referida por primera vez en reportes del Siglo XVII cuando es nombrada “Santa María de la Asunción del Cedral” por frailes franciscanos. Estos reportes relacionan a Cedral con el procesamiento de mineral de Ag descubierto en Catorce, dado que la localidad contaba con el agua suficiente para poder establecer haciendas de beneficio.

A principios del siglo XVII se aplicó aquí el método de amalgamación de Ag conocido como “beneficio de patio” (1.2.1). Este proceso siguió operando hasta la escasez de Ag en las minas de Catorce a finales de ese mismo siglo.

Durante el siglo XX (1920 hasta 1980) los residuos generados por este método de extracción fueron reprocesados para recuperar Ag restante. Los jales re TRABAJADOS fueron apilados en dos sitios conocidos como El Caballo y Jesús María (Morton et al. 2015).

2.2.1 Proceso de “beneficio de patio”

El proceso de amalgamación conocido como “beneficio de patio” con Hg fue inventado por Bartolomé de Medina en la Ciudad de Pachuca a mediados del siglo XVI. Este método dio un gran impulso en la minería de la Nueva España permitiendo la explotación de minerales de Ag de menor contenido. (Jiménez, 2013; Leura et al. 2017). El “beneficio de patio” consiste en los siguientes pasos:

- El mineral extraído de las vetas son transportadas a las haciendas de beneficio en donde son trituradas mediante molinos hasta tener un aspecto de polvo fino.

- El mineral pulverizado se lleva a un espacio abierto (patios) donde se coloca en “montones” a los cuales se agrega agua hasta formar una pasta. Posteriormente se adiciona sal (NaCl) y “magistral” como catalizador (sulfato de cobre) con el fin de obtener AgCl, que es más soluble que el Ag₂S.
- Se agrega Hg, la cantidad varía de acuerdo al contenido de Ag. Esta mezcla semilíquida llamada “torta”, se revuelve varias veces al día hasta que el Hg está completamente amalgamado con Ag.
- La amalgama se lleva a tinajas de lavado con agua y esta se agita con la finalidad de separarla de la ganga.
- La amalgama se coloca en moldes de hierro y es comprimida con mazos a fin de introducirla en un horno.
- El horneado tiene dos pasos, el primero es para evaporizar el Hg restante y el segundo paso es para purificar la Ag.

2.2 Estudios previos respecto a metales pesados en otras localidades mineras en México

En los últimos años se han reportado decenas de trabajos sobre jales mineros en México, la gran mayoría enfocados a estudios geoquímicos que evalúan la peligrosidad de los jales en función del contenido de metales pesados y metaloides. A continuación se describe de manera breve un resumen de resultados de estudios previos en zonas mineras seleccionadas.

2.2.1 Complejo minero de Taxco de Alarcón, Guerrero

Desde el siglo XVI se ha llevado a cabo la extracción de metales como Au y Ag en la región de Taxco de Alarcón. Este sitio, es una de las principales zonas mineras de Ag en México, localizado en la parte norte del estado de Guerrero. En el siglo XX, Taxco se convierte en un importante productor de Zn y Pb. Los jales generados de las actividades mineras más estudiados de esta zona son “El Fraile” y “La Concha“, los cuales se localizan aproximadamente a 2 Km del suroeste de la ciudad.

Talavera et al. (2006), realizaron un estudio geoquímico en jales de El Fraile en Taxco, Guerrero, para evaluar la peligrosidad de los jales mineros en función de la generación de drenaje ácido. Los resultados de este estudio indican que los jales por sus características fisico-químicas tienen una gran capacidad para generar ácido. Sin embargo la presencia de calcita en algunas muestras indica que todavía existe una capacidad importante para neutralizar el drenaje ácido a pesar del grado de oxidación de los residuos, por lo tanto los lixiviados en esta localidad son esencialmente neutrales. Los autores concluyen que en un corto período de tiempo los jales pueden saturar la capacidad de neutralizar el drenaje ácido y los metales contenidos en ellos se puedan movilizar en el entorno.

En *Morton-Bermea et al. (2014)*, se presenta el impacto de los metales contenidos en jales mineros (“La Concha”) y en suelos en material vegetal de la zona de Taxco. La evaluación de los resultados de estudios de extracciones secuenciales de metales en jales y suelos de la zona indica que altas concentraciones en las fracciones solubles determinan las altas concentraciones de metales contenidos en el material vegetal estudiado.

2.2.2 Complejo minero de Guanajuato

El estado de Guanajuato ha sido uno de los centros mineros más importantes de producción de Ag en México. Durante la época colonial el estado surgió como uno de los mayores productores de este metal. En el siglo XIX, se establecieron dos compañías británicas que implementaron nuevas tecnologías como cambiar el “proceso de patio” por el método de cianuración que hizo posible la explotación de minerales de baja ley. En el año 2015 la producción de Ag en Guanajuato fue de 169,310 Kg mediante la operación de tres plantas de beneficio en el estado (SGM 2016).

El distrito minero de Guanajuato, ha sido estudiado por diversos autores desde el punto de vista geoquímico y mineralógico (Ramos et al. 2006; Mendoza et al. 2006; Mendel et al. 2008; Ramos et al. 2012). En la región se explota principalmente yacimientos de Au, Ag, Pb y Cu.

Mendel et al. (2008), realizaron una caracterización química de un jal histórico y uno reciente en el distrito minero de Guanajuato. La comparación de los datos revela que no hay diferencia importante en cuanto a la cantidad de metales que contienen. Lo que puede indicar que los metales se lixivian muy poco por factores ambientales. Los autores concluyen que los jales mineros no representan un riesgo ambiental considerando solamente el fenómeno de lixiviación.

Ramos (2017), evaluó la movilidad de algunos metales pesados mediante experimentos de lixiviación en columna durante 13 semanas en muestras de un perfil de jal de la antigua mina La Aurora en Xichú, Guanajuato. Además realizó una caracterización del jal donde reporta concentraciones promedio de Pb ($4858.1 \text{ mg Kg}^{-1}$), Cr (11.3 mg Kg^{-1}), Zn ($3243.3 \text{ mg Kg}^{-1}$), Cd (170.5 mg Kg^{-1}) y Cu (612.7 mg Kg^{-1}). La evaluación de este estudio indica que al empezar el experimento, durante las primeras semanas se tiene altas concentraciones de algunos metales que decrecen con el paso de las semanas. Esto podría indicar que en la localidad se produzca una liberación similar con concentraciones elevadas de metales en las primeras precipitaciones de la temperatura de lluvias, con probable generación de drenaje ácido.

2.2.3 Complejo minero de Hidalgo

El estado de Hidalgo ha sido durante siglos un importante productor de Au y Ag en México. En localidades de la ciudad de Pachuca existen toneladas de jales que resultaron de la acumulación durante más de 200 años de la explotación minera de estos metales. El método de beneficio más empleado para la extracción de Au y Ag fue principalmente por “beneficio de patio” (Hernández et al. 2009).

Moreno et al. (2009), realizaron un estudio geoquímico en jales del distrito minero de Pachuca-Real del Monte. En este distrito existen cuatro presas de jales, localizadas una en la parte sureste (Presa Dos Carlos) dos al suroeste de la ciudad (Presa Sur I y Presa Sur II) y una cuarta al noreste, aproximadamente a 12 Km de la ciudad de Pachuca (Presa Omitlan). Los autores reportan las concentraciones de Cu, Zn, Cd, Pb y Ag entre otros metales para las cuatro presas de jales de los cuales destaca el Pb y Mn. Además evaluaron la movilidad de los metales mediante dos pruebas de lixiviación bajo diferentes condiciones. Los resultados muestran que la concentración de Pb soluble es superior al límite recomendado por la NOM-053-ECOL-1993 en las presas Omitlán y Sur II lo que supone una mayor movilidad de Pb con respecto a los demás metales. Por lo tanto los jales mineros podrían considerarse fuentes importantes de contaminación de Pb para suelos, sedimentos y agua.

2.2.4 Complejo minero de San Luis Potosí

El estado de San Luis Potosí está relacionado con la minería desde el siglo XVI, con el establecimiento de centros mineros que destacaron en la explotación de Au y Ag como Real de Catorce y Charcas. Durante las dos guerras mundiales tuvo gran auge la explotación de minerales de Hg y Sb en Guadalcazar y Wadley. En la década de los 50, se descubrió el yacimiento de fluorita denominado como Las Cuevas. Finalmente en la segunda mitad del siglo XX y hasta el fin de la década de los 80, la minería potosina experimentó un incremento sostenido de las actividades de exploración y beneficio de minerales (SGM ,2016).

En general, la evaluación del impacto ambiental de los jales mineros en matrices como suelos, material vegetal, sangre, y polvos urbanos han sido objeto de estudios en distintas localidades mineras de S.L.P. (Castro- Larragoitia et al. 1997; López, 2008; Luna, 2009; Flores et al. 2012; Morton et al. 2015; Vargas, 2016; Leura et al. 2017). Sin embargo como se mencionó anteriormente no existen estudios referentes a metales pesados en la localidad de Cedral. Por lo

tanto aún falta ampliar más las bases sobre los niveles de contaminación en el municipio dada a su trayectoria como centro de procesamiento de mineral de Ag.

López (2008), realizó un estudio enfocado a conocer la absorción de metales en plantas principalmente de Sb, que se encuentran contenidos en suelo, sedimentos y jales, en los alrededores de la mina de Wadley en S.L.P, México. Los resultados en este estudio demuestran que los jales de la mina de Wadley contienen niveles elevados de Sb junto con Hg. Además menciona que los valores de todas las muestras analizadas (suelo, sedimentos, agua y plantas del entorno del jal) están por arriba de los valores recomendados por la OMS.

Castro-Larragoitia et al. (1997), realizaron un estudio para evaluar el impacto de los jales mineros del distrito minero de Santa María de La Paz ubicado al norte de S.L.P. (cabecera de los municipios de Villa de la Paz y Matehuala) en suelos y material vegetal de la zona. Los resultados de este estudio indican que la fuente principal de contaminación en las cercanías del distrito en un área aproximada de 100 Km es el vertedero de jales Sta. María de La Paz. Los metales transportados por el agua de estos residuos causan la contaminación de los suelos hasta una distancia aproximada de 10 Km que disminuye con la profundidad. Además los jales dispersados por el viento se pueden rastrear aproximadamente a 5 Km al norte y en menor medida al sur. Por otro lado los granos de maíz de esta localidad no exceden las concentraciones permisibles, pero las hojas rebasan hasta 20 veces el límite para Cd y hasta 50 veces para Pb. Los autores recomiendan evitar el uso de hojas de maíz como forraje ya que puede ser una de las fuentes principales en que los elementos tóxicos pueden entrar a la cadena trófica.

Luna (2009), realizó un estudio geoquímico en la unidad minera de Charcas, S.L.P. Las muestras de jales de este estudio proviene de dos sitios denominados “presa activa e inactiva” estos residuos se generaron por el beneficio de minerales de Zn, Pb, Ag y Cu. Los resultados en este estudio indican que los jales de Charcas, se caracterizan por altas concentraciones totales de Cu, Zn, Pb y As, sin embargo el autor menciona que los jales no son peligrosos desde el punto de vista de la capacidad de generación de drenaje ácido. No obstante dada la naturaleza de los jales, estos se pueden dispersar por vía eólica lo cual el autor recomienda evaluar el medio abiótico alrededor a la presa.

2.3 Proceso de beneficio de minerales

La actividad minera consta de diferentes etapas, una de las más importantes es el beneficio de minerales, que es propiamente la concentración del mineral con valor económico. Los principales pasos del beneficio de minerales son:

- 1) Conminución
- 2) Clasificación
- 3) Concentración
- 4) Separación Líquido-Sólido

Dentro de las actividades mineras, la mayor generación de jales proviene del beneficio de minerales. A continuación se describe de manera general los pasos del proceso de beneficio.

2.3.1 Conminución

La conminución es el primer paso del beneficio de minerales. Consta de dos etapas mecánicas: trituración y molienda las cuales tienen como finalidad liberar el mineral valioso de la ganga, por ello es necesario fragmentar el mineral hasta un tamaño óptimo para obtener un buen procesamiento de minerales. La trituración se realiza en seco y tiene como objetivo hacer más fácil el manejo del material para el siguiente paso. Esta etapa consta de un quebrado del mineral por compresión contra superficies rígidas, hasta tener un tamaño que varía entre 1.90 cm (3/4”) a 0.95 cm (3/8”).

Después de la trituración, el mineral pasa a la última etapa que es la molienda, esta se realiza en seco o en húmedo y su principal objetivo es obtener un tamaño de partícula tal que, se libere la mayor parte posible del mineral económico de la ganga sin que se genere un exceso de partículas muy finas. La molienda se realiza por abrasión e impacto del mineral mediante el libre movimiento de barras o bolas de acero y en algunos casos, de la misma mena (molienda autógena). De la molienda el mineral sale hacia los clasificadores, las partículas gruesas regresan al molino y las partículas óptimas pasan a la etapa de concentración.

2.3.2 Clasificación

La clasificación es el segundo paso del proceso de beneficio de minerales y tiene como propósito separar los minerales de acuerdo a su tamaño. Este paso se realiza para determinar el tamaño óptimo de alimentación con la finalidad de obtener una máxima eficiencia en los pasos de conminución y concentración. La clasificación se puede realizar por vía directa e indirecta.

- Por vía directa: También denominado cribado, este método se realiza en seco sobre tamices que presentan unas aberturas de dimensiones dadas, de modo que permite separar los minerales por su tamaño.
- Por vía indirecta: Este método se basa en la clasificación en función de la velocidad con que las partículas caen a través de un medio fluido. En general la clasificación por vía indirecta se emplea en aquellas partículas que se consideran demasiado finas para ser separadas de manera eficiente por cribado (Bustillo, 2000).

2.3.3 Métodos de concentración

El tercer paso y el más importante del proceso de beneficio de minerales es la concentración. En este paso se separan los minerales valiosos de la ganga dentro de unos límites económicos aceptables. Los métodos de concentración dependen de la naturaleza diversa de los componentes de los minerales. Se han desarrollado varios métodos de concentración que aprovechan las diferencias entre las propiedades físicas o químicas para separar los minerales interés. Los métodos de concentración se pueden clasificar en físicos y fisicoquímicos, como se puede observar en la Figura 2.1.

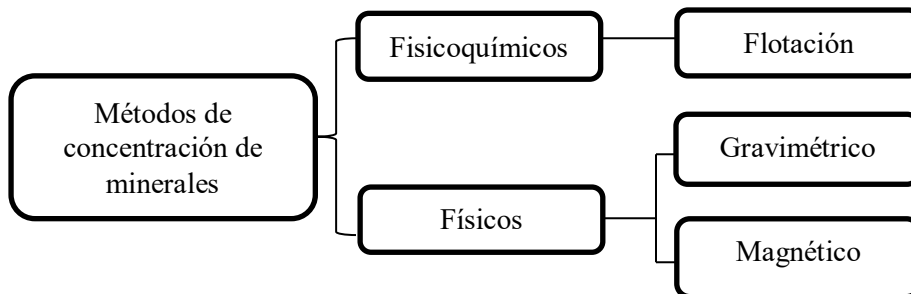


Figura 2.1 Métodos de concentración de minerales

- Los métodos fisicoquímicos utilizan reactivos que modifican las características superficiales de las partículas para lograr la separación de los minerales de interés.
- Los métodos físicos aprovechan las propiedades como magnetismo, densidad, entre otras, para separar los minerales económicos.

En seguida se menciona un ejemplo de cada uno de los métodos de concentración utilizados en la industria minera.

2.3.3.1 Método fisicoquímico: Flotación

La flotación es un método fisicoquímico que aprovecha la diferencia en las propiedades superficiales de las partículas para separar minerales de constitución compleja y de baja ley, que de otra manera no podrían ser separados de forma rentable. Dichas propiedades son específicas para cada mineral, a lo cual este método ofrece una capacidad de separación muy selectiva, por tal motivo la flotación se ha convertido en el método más utilizado en la industria minera (Azañero et al. 1999; Bustillo, 2000; Valderrama et al. 2015). El método consiste en inyectar aire en la celda de flotación para formar burbujas, de igual forma se adicionan reactivos que hacen posible la separación. De esta manera, el mineral se cubre con una capa colectora que cambia las propiedades superficiales. Las partículas de los minerales entran en contacto con el colector y se adhieren a las burbujas de aire, estas flotan hasta la superficie para formar una espuma con el mineral de interés, mientras que la ganga queda en el fondo.

2.3.3.2 Método físico: Separación gravimétrica

La separación gravimétrica es un método físico que aprovecha la diferencia de densidades que existe entre los minerales para separarlos. Los minerales son disgregados por fuerzas de gravedad y centrífugas mediante métodos mecánicos como pulsaciones, giros y movimientos longitudinales, además se utiliza un medio acuoso que facilita la separación entre los minerales (Wills, 1987; Jiménez, 2013).

2.3.3.3 Método físico: Separación magnética

La separación magnética es un método físico que se basa en las propiedades magnéticas de los minerales para separarlos. Según la respuesta del mineral al campo magnético (susceptibilidad magnética) se puede clasificar como:

- Ferromagnéticos: estos minerales son fuertemente atraídos por el campo magnético, el principal mineral ferromagnético es la magnetita (Fe_3O_4).
- Paramagnéticos: estos minerales son débilmente atraídos por el campo magnético. Algunos ejemplos de minerales paramagnéticos son: ilmenita (FeOTiO_2), hematita (Fe_2O_3), cromita (FeOCr_2O_3) y pirrotita (FeS).
- Diamagnéticos: estos minerales son repelidos por el campo y no se pueden concentrar magnéticamente. Algunos ejemplos de minerales diamagnéticos son: galena (PbS), esfalerita (ZnS) y cuarzo (SiO_2) (Wills, 1987; Kelly et al.1990; Subba, 2011).

2.3.4 Separación Líquido-Sólido

La separación L-S es el cuarto paso del proceso de beneficio de minerales, tiene como objetivo eliminar el agua o al menos una parte importante de ella (contenido de humedad $\leq 10\%$) para obtener un producto final seco, esto se realiza generalmente en dos etapas denominadas: espesamiento y filtración (Butillo, 2000).

- **Espesamiento:** El objetivo de esta etapa es permitir que las partículas sólidas se asienten bajo la fuerza de gravedad, durante un tiempo determinado para posteriormente decantar el agua. Este procedimiento puede complicarse si el tamaño de partícula es muy fino, pues cuanto más fino es el tamaño, mayor es el tiempo necesario para su decantación. Para tener una buena sedimentación, se utilizan productos químicos que producen fenómenos de coagulación o floculación disminuyéndose así el tiempo de decantación (Bustillo, 2000; Subba, 2011).
- **Filtración:** El objetivo de la filtración es eliminar la mayor cantidad de agua remanente de la etapa anterior a través de un medio poroso. Dicho medio poroso retiene los sólidos y permite el paso de la fase líquida (Subba, 2011).

A manera de resumen la Figura 2.2 muestra un diagrama general de los pasos del proceso de beneficio de minerales.

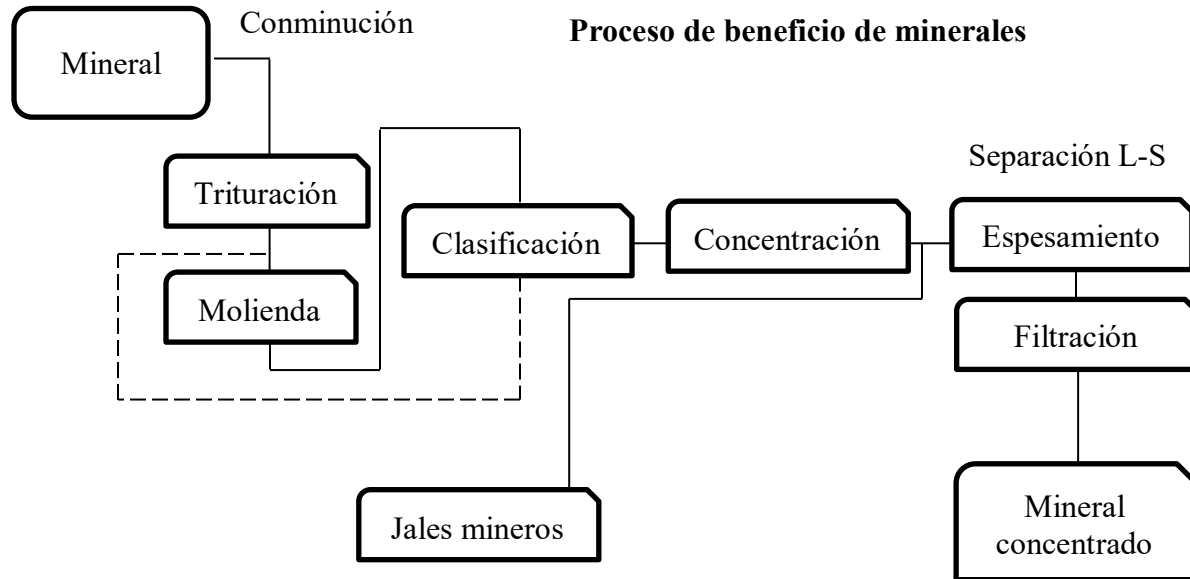


Figura 2.2 Diagrama general de los pasos del proceso de beneficio de minerales

Después de concentrar el mineral, este pasa a un proceso de extracción de metales con la finalidad de obtener un producto de alta pureza. El concentrado se envía a las plantas de tratamiento hidrometalúrgico o pirometalúrgico dependiendo de la ley del mineral, a continuación se describe estos procesos.

- **Hidrometalúrgia:** la extracción del metal por este proceso se realiza mediante una operación denominada lixiviación. Este es un método químico que permite aprovechar minerales de baja ley, el cual consiste en disolver los minerales mediante reactivos químicos con la finalidad de solubilizar a los metales de interés para luego precipitarlos.
- **Pirometalúrgia:** permite aprovechar minerales de alta o mediana ley, esto se realiza mediante la aplicación de calor como es la tostación y calcinación. La tostación consiste en oxidar los minerales sulfurosos con oxígeno para producir óxidos metálicos y dióxido de azufre como subproducto. Por otro lado la calcinación consiste en la descomposición térmica de carbonatos, sulfatos, entre otros en sus óxidos formadores.

2.4 Jales mineros

Según la NOM-141-SEMARNAT-2004, los jales se definen como residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de los minerales. Estos residuos se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos, además presentan características diversas en su composición química, granulometría y mineralógica. La disposición final de los jales mineros se lleva a cabo en una estructura llamada presa de jales, estos son almacenados por largos tiempos (Santos et al. 2013; Valderrama et al. 2015).

2.4.1 Características de los jales mineros

Los jales poseen características particulares, las más relevantes son: el tamaño de partícula y la composición mineralógica. A continuación se describe de forma breve estas características.

2.4.1.1 Tamaño de partícula

Los jales mineros exhiben una gran variabilidad de tamaño, que van desde rangos de mm hasta μm como resultado de los procesos de conminución. En general el tamaño depende del punto al cual los minerales económicos se separan de la ganga, cuando un mineral de baja ley pero de gran interés económico se quiere concentrar, la última etapa de la conminución (molienda) debe ser más fina lo cual provoca residuos de tamaño más pequeños (Lottermoser, 2010; Santos et al. 2013; Pyo et al. 2017).

Esta característica (tamaño de arenas finas) permite a los jales ser dispersados por la acción del viento a través del medio ambiente en forma de partículas de polvo. Este polvo puede contener metales pesados que puede afectar al medio ambiente y a la población aledaña a la zona minera.

2.4.1.2 Mineralogía de los jales

La composición mineralógica de los jales mineros es muy diversa y está en función de la naturaleza del yacimiento de origen. En México las especies mineralógicas que predominan en los jales son sulfuros, silicatos, carbonatos y óxidos. Entre los minerales sulfurados la pirita (FeS_2) es el más abundante en los jales.

2.4.2 Impacto ambiental de los jales

Existen varios factores que determinan el potencial de contaminación de los jales mineros, los más considerables son la mineralogía y las condiciones climáticas prevaletientes en la zona (Romero et al. 2008; De la O et al. 2013; Santos et al. 2013). Los factores climáticos son determinantes en el proceso de dispersión de los jales mineros. En zonas áridas y semiáridas estos residuos son dispersados mediante la acción del viento (dispersión eólica) en forma de polvo, como se mencionó en el punto 2.3.1.1. En zonas húmedas y templadas, los jales mineros son dispersados por medio de precipitaciones pluviales o escurrimientos superficiales (dispersión hídrica), esto provoca la contaminación de sedimentos, suelos, aguas superficiales y subterráneas. La Figura 2.3 muestra un diagrama que resume los factores que determinan el potencial de contaminación de los jales mineros.

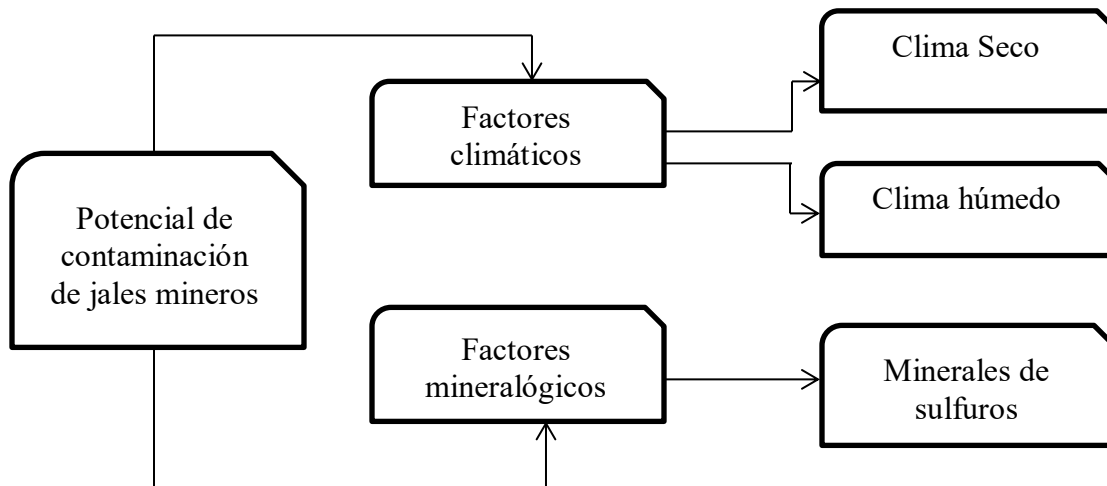


Figura 2.3 Diagrama de factores que determinan el potencial de contaminación de los jales mineros

El factor mineralógico es uno de los más importantes para determinar si un jal minero es potencialmente peligroso para el medio ambiente. A pesar de la aleatoriedad geoquímica de los jales, también existe un relativo consenso que revela un recurrente aumento del potencial de contaminación, en relación con un alto contenido de sulfuros (Corona et al.2017).

La oxidación de algunos sulfuros (especialmente pirita, marcasita o pirrotina) en contacto con agua y oxígeno genera soluciones ricas en ácido sulfúrico. Los ácidos son compuestos extremadamente oxidantes y activos, que provocan la lixiviación de los minerales, el resultado es la liberación de una gran cantidad de metales. En zonas húmedas o templadas, el lixiviado que se caracteriza por un pH ácido, puede ser dispersado por precipitaciones pluviales, la solución acida puede modificar el pH del suelo y del agua que estén cercanos a la zona minera..

Un segundo efecto mayor que la acidez es el hecho de que el bajo pH de la solución incrementa la solubilidad de los metales y metaloides potencialmente tóxicos como Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni, Sb, y As. En general, para que los metales pesados puedan ejercer su toxicidad sobre un ser vivo, éstos deben encontrarse disponibles para ser captados por éste, es decir, el metal debe ser biodisponible. Por lo tanto, el mayor impacto ambiental generado por jales mineros es la posible disponibilidad de los elementos potencialmente tóxicos que son dispersados a través de lixiviados o polvos, Figura 2.4.

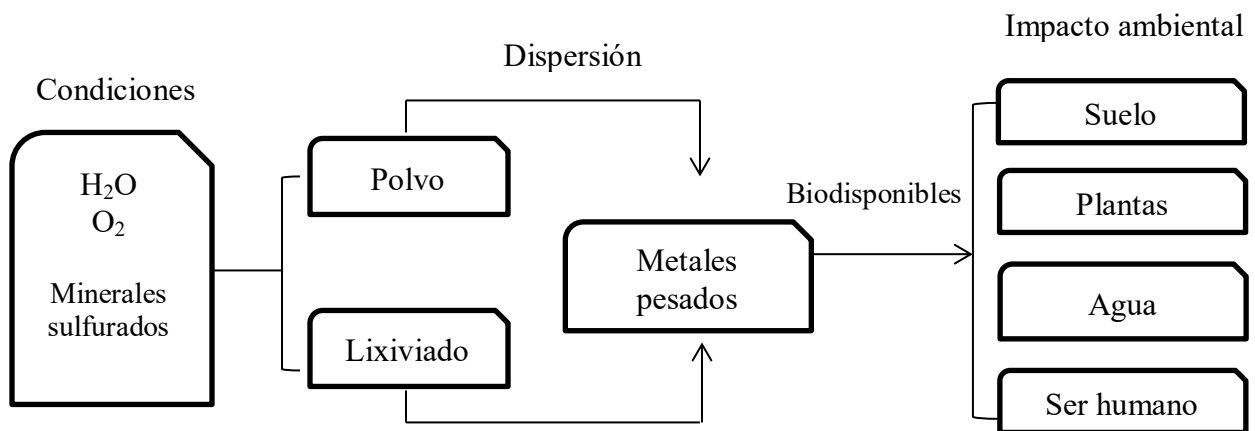


Figura 2.4 Impacto ambiental de los jales mineros

2.5 Metales pesados contenidos en jales mineros

Los jales mineros son una fuente importante de elementos potencialmente tóxicos (EPT), que al estar sujetos a la dispersión eólica e hídrica pueden ocasionar un serio problema ambiental y de salud. Dentro de los EPT se encuentran los metales pesados, que son elementos que tiene una densidad mayor o igual a 5 gr cm^{-3} y cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos), algunos metales pesados son Cd, Co, Cr, Cu, Hg Ni, Pb y Zn (Garcia, 2006). No obstante, dicho término ha sido empleado también con metaloides a pesar de no cumplir con los criterios anteriores, algunos ejemplos son Sb y As, que han sido incluidos en numerosos estudios que evalúan la peligrosidad de los jales por presentarse en diversos complejos mineros.

A continuación se describe de manera general los metales pesados que son más evaluados en los estudios geoquímicos para determinar la peligrosidad de los jales mineros.

2.5.1 Metales pesados considerados como potencialmente tóxicos en el medio ambiente

2.5.1.1 Mercurio

Generalidades

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Hg es uno de los diez elementos químicos con mayor repercusión en la salud humana. Sus propiedades fisicoquímicas son las siguientes: es un metal líquido de color plateado y ligeramente volátil bajo condiciones normales de temperatura y presión e insoluble en agua pero soluble en ácidos como ácido nítrico, ácido sulfúrico y agua regia. Es un elemento químico que tiene una masa molecular de 200.59 g/mol , con número atómico 80 en la tabla periódica y una densidad de 13.5 g/cm^3 a 20 °C .

Minerales de mercurio

El cinabrio (HgS) es el mineral de Hg más importante económicamente, está compuesto de 86.2% de Hg y 13.8% de S. El Hg o azogue se obtiene a través del proceso de tostación el cual consiste en triturar primero el cinabrio para posteriormente hacerlo reaccionar con oxígeno dentro de un horno a una temperatura superior a 500 °C para obtener Hg y dióxido de azufre (SO_2) como subproducto (Tejero et al. 2014).

Efectos en la salud humana

El Hg presenta diversas formas químicas, están son Hg^0 elemental, Hg^{2+} iónico y $(\text{CH}_3\text{Hg})^+$ orgánico. El metilmercurio $(\text{CH}_3\text{Hg})^+$ es más tóxico, afecta al sistema nervioso central y periférico. Los principales órganos donde se acumula son el cerebro y riñones. Los recién nacidos y fetos son sumamente sensibles a sus efectos tóxicos. Por otro lado los síntomas a una exposición aguda de vapores de Hg^0 elemental son descamación en manos y pies, comezón, salpullido, dolores articulares y estomatitis, este se puede acumular en la tiroides en caso de una exposición crónica.

Efectos ambientales

La emisión de Hg como resultado de las actividades humanas ha sido reducida por una buena gestión de información de sus efectos negativos. Sin embargo la actividad minera aún se considera una fuente importante de Hg, a causa de la industria del carbón, la minera artesanal de Ag y los jales mineros históricos depositados como productos de los procesos pasados.

El Hg es un fitóxico para las plantas comúnmente se acumula en las raíces, este afecta la germinación de las semillas e inhibe el proceso de fotosíntesis en algunas especies. En los peces inhibe el crecimiento, el proceso de reproducción, la capacidad de captar alimentos y puede provocar lesiones cerebrales. Numerosos estudios ha demostrado que la frecuencia de comer pescado contaminado es un factor de riesgo para la salud humana (Moreno et al. 2006; Yan et al. 2018).

2.5.1.2 Plomo

Generalidades

El Pb es uno de los metales pesados más evaluados en estudios de jales mineros debido que es un elemento muy tóxico. Sus propiedades fisicoquímicas son las siguientes: es un metal de color gris azulado, insoluble en agua pero soluble en ácido nítrico y ácido sulfúrico (concentración alta) en condiciones oxidantes. Es un elemento químico que tiene una masa molecular de 207.19 g/mol, con número atómico 84 en la tabla periódica y una densidad de 11.4g g/cm^3 a 20 °C.

Minerales de plomo

La galena (PbS) es el mineral de Pb más importante económicamente, este mineral está asociado con esfalerita o blenda (ZnS), pirita (FeS₂), calcopirita (CuFeS₂), fluorita (CaF₂), barita (BaSO₄) y cuarzo (SiO₂) entre otros. De igual forma los minerales de Pb tienen una asociación natural con Au y Ag por ello, el beneficio de Pb a menudo tiene un valor económico añadido. Usualmente las menas complejas (Pb-Zn o Pb-Zn-Cu) de Pb son más abundantes y son concentradas selectivamente por el método de flotación.

Efectos en la salud humana

El Pb se puede absorber en el cuerpo mediante la inhalación e ingestión de polvo, agua o alimentos contaminados. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la población infantil es más vulnerable a los efectos tóxicos del Pb debido a que llega a absorber entre 4 y 5 veces más que los adultos, afectando el desarrollo del cerebro y del sistema nervioso. El Pb⁺² es tóxico y puede afectar funciones renales, neurológicas, hematológicas y cardiovasculares. Este se acumula en hígado, riñones y sistema nervioso central posteriormente se almacena en los huesos en caso de una exposición crónica (Lawrence et al. 2009).

Impacto ambiental

El Pb es un contaminante ambiental peligroso debido a que es nocivo para la mayoría de los seres vivos. El Pb de origen antropogénico generalmente se acumula en las capas superficiales del suelo. Este tipo de acumulación es motivo de preocupación en la producción agrícola, puesto que los efectos son nocivos para la diversidad microbiana, la fertilidad del suelo, el crecimiento de los cultivos y la seguridad alimentaria. El pH del suelo juega un papel importante en la movilidad del Pb, a pH ácido existe como especie iónica libre quedando biodisponible para las plantas (Kushwaha et al. 2018).

2.5.1.3 Arsénico

Generalidades

El As es considerado como uno de los elementos más tóxicos después del Hg. Sus propiedades fisicoquímicas son las siguientes: es un metaloide que presenta varios estados de oxidación como As⁻³, As⁰ (elemental), As⁺³ y As⁺⁵, pero la forma más tóxica y soluble es As⁺³. Es un elemento químico que tiene una masa molecular de 74.92 g/mol, con número atómico 33 en la tabla periódica y una densidad de 5.72 g/cm³ a 20 °C (Lawrence et al. 2009; Mohammad et al. 2017).

Minerales de arsenico

La arsenopirita (AsFeS) es el mineral de As más importante, está asociado con muchos minerales, principalmente con sulfuros de Pb, Zn y Cu. El beneficio de los sulfuros de Cu por el método de flotación comúnmente tienen problemas, ya que a menudo el As (arsenopirita) muestra un comportamiento similar a los minerales de interés y es difícil separar la mena del As, como resultado la industria de la fundición penaliza el concentrado y se vuelve difícil de vender debido a las estrictas regulaciones sobre las emisiones (Long et al. 2017). Por otra parte la fuente principal de As en los jales mineros proviene de la arsenopirita (AsFeS), en condiciones oxidantes se forman las especies arsenito y arseniato. Por último la pirita (FeS_2) también puede contener concentraciones considerables de As, estos dos minerales se encuentran normalmente asociados.

Efectos a la salud humana

Los efectos adversos en la salud se han relacionado con la ingestión de agua contaminada por As, los principales síntomas son lesiones en la piel e incluyen cambios de pigmentación. Estos efectos pueden ser precursores de cáncer de piel si se tiene una exposición prolongada. La intoxicación por As o arsenicosis tiene varios efectos como cáncer de pulmón y vejiga si se tiene una exposición crónica (Lawrence et al. 2009).

Una de las zonas más contaminadas por As en nuestro país es Zimapán, Hidalgo dado que el agua excede hasta 100 veces la concentración permitida por estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Un estudio en la región, señaló que el As en agua subterránea proviene de dos fuentes diferentes, la primera es por las interacciones naturales que tienen los minerales de As dentro matrices calcáreas, la segunda es debido a la existencia de depósitos de jales mineros, el As se dispersa a través de los lixiviados generados por estos residuos (Tovar et al. 2012; Covarrubias et al. 2016).

Efectos ambientales

Los jales mineros se pueden dispersar en aguas subterráneas, que es una de las fuentes principales de exposición en animales. Para el caso de la fauna, los efectos tóxicos del As son similares a los seres humanos, varios estudios indicaron que también es un carcinógeno y se absorbe de manera integral en el tracto gastrointestinal de los animales (Mandal, 2017).

2.5.1.4 Cadmio

Generalidades

El Cd es uno de los mayores elementos tóxicos asociado con efectos adversos en la salud y el medio ambiente, ocupa el lugar 67 en abundancia en la corteza terrestre, su concentración varía en el rango de 0.1 a 0.2 mgKg⁻¹, comúnmente tiene una asociación natural con Zn debido que tienen estructuras iónicas y electronegatividades similares. Sus propiedades fisicoquímicas son las siguientes, es un metal de color blanco-azulado, dúctil e insoluble en agua pero soluble en ácidos. Es un elemento químico con masa molecular de 112.41 g/mol, con número atómico 48 en la tabla periódica y una densidad de 8.64 g/cm³ a 20 °C.

Minerales de Cd

El mineral más común de Cd en la naturaleza es la greenockita (CdS), este mineral no tiene importancia económica debido al bajo contenido de Cd. Sin embargo la mayoría de los minerales de Zn especialmente la esfalerita contiene cantidades importantes de este metal y en menor medida con minerales de Pb y Cu. En varias plantas de Zn y Pb se produce como un subproducto, esto lo hace relativamente barato (Biswal et al. 2012).

Efectos a la salud humana

El cuerpo humano absorbe Cd mediante la inhalación de polvos e ingestión de agua o alimentos contaminados. Varios estudios han demostrado que el Cd se acumula en el hígado, riñones y huesos, una exposición crónica puede provocar daño renal, enfisema y deformación en los huesos (Gad, 2005).

Efectos ambientales

Las plantas en suelos contaminados por Cd, interfiere en el transporte de elementos esenciales (Ca, Mg, P y S) al igual que agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos (Rodríguez et al.2008).

2.5.1.5 Cromo

Generalidades

El Cr se encuentra presente de forma natural en la corteza terrestre su concentración varía en el rango de 0.1 a 0.3 mg/Kg (Shahid et al. 2017). Sus propiedades fisicoquímicas son las siguientes: es un metal de transición de color gris acerado, duro, frágil y resistente a la corrosión. Es un elemento químico que tiene una masa molecular de 51.9 g/mol, con número atómico 24 en la tabla periódica y una densidad de 7.19 g/cm³ a 20 °C. Este metal se utiliza principalmente en la metalurgia para la elaboración de aceros inoxidables y procesos de galvanoplastia. El Cr tiene varios estados de oxidación uno es Cr⁰ elemental que no es tóxico, mientras Cr³⁺ es una especie esencial y se encuentra asociado comúnmente con Fe, el Cr⁶⁺ es tóxico para el hombre y el medio ambiente, sus compuestos son muy reactivos y solubles en medio acuoso (Rangel et al. 2015).

Minerales de Cr

El Cr está presente en muchos minerales en forma de óxidos complejos, sin embargo solo unos pocos tienen importancia económica, la cromita (FeOCr₂O₃), el cual contiene 32 % de óxidos de hierro II y 68 % de óxido de cromo III. Es el mineral de Cr más importante económicamente a menudo contiene hasta 1.5 % de TiO₂. El Cr metálico se obtiene por oxidación de la cromita con aire en medio alcalino para producir Na₂CrO₄, el cual es lixiviado con agua para posteriormente precipitarlo con carbón para obtener Cr. (Parienyatwa et al. 2016).

Efectos a la salud humana

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (EPA), el Cr hexavalente ocupa el cuarto lugar de su lista de sustancias potencialmente carcinogénicas en humanos. Los síntomas a una exposición aguda de Cr son problemas intestinales, enfermedades gástricas e hepáticas. Estudios previos han demostrado que el Cr está relacionado con efectos adversos a una exposición crónica como úlceras cutáneas, necrosis tubular, insuficiencia renal, cáncer de pulmón e incluso puede causar la muerte (Huang et al. 2017).

Efectos ambientales

El Cr³⁺ es la especie más común en el medio ambiente es insoluble e inmóvil, mientras el Cr⁶⁺ es escaso en la naturaleza, es móvil en sistemas acuáticos y suelos, tiene una alta toxicidad en el medio ambiente. En el suelo el Cr³⁺ se puede oxidar a Cr⁶⁺ en condiciones específicas de potencial redox y pH, siendo este último el factor más dominante.

El Cr^{6+} tiene un efecto mutagénico, teratogénico y carcinogénico en animales y plantas, no tiene ninguna función metabólica conocida. Generalmente provoca cambios fisiológicos morfológicos y bioquímicos, sus efectos tóxicos en las plantas puede causar clorosis en hojas, inhibir la germinación de semillas y crecimiento del tallo en algunas especies (Shahid et al. 2017).

2.5.1.6 Cobre

Generalidades

El Cu se encuentra presente de forma natural en la corteza terrestre, sus propiedades fisicoquímicas son las siguientes: es un elemento químico con masa molecular de 63.54 g/mol, con número atómico 29 en la tabla periódica y una densidad de 8.96 g/cm³ a 20 °C. Desde la antigüedad el Cu ha sido utilizado en una gran variedad de aplicaciones dado que, sus características de conductividad eléctrica, térmica, ductilidad, maleabilidad y resistencia a la corrosión son muy óptimas, esto lo convierte en un metal altamente explotado a nivel mundial.

Minerales de cobre

El Cu se encuentra en la naturaleza de diferentes formas, estas son como minerales de sulfuros, óxidos y sulfuros complejos o polimetálicos. Los principales sulfuros y más importantes económicamente son calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4) y covelita (CuS), estos minerales se encuentran asociados comúnmente con pirita (FeS_2) y con sulfuros de As y Pb. La malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) y cuprita (Cu_2O) son los principales minerales óxidos, estos son solubles en ácido sulfúrico (H_2SO_4) y se puede extraer Cu a partir del proceso de lixiviación. Los sulfuros complejos son menas de cobre asociados con esfalerita (ZnS), galena (PbS) y pirita (FeS_2), estos sulfuros metálicos son concentrados a través del proceso de flotación. Los yacimientos porfídicos de Cu son los más abundantes y de mayor interés económico en Latinoamérica. Esta mena contiene calcopirita (CuFeS_2) y está asociada con pirita (FeS_2) a menudo contiene molibdenita (MoS_2), Au nativo y sulfuro de plata (Ag_2S), estos metales (Mo, Au y Ag) se recuperan como subproductos.

Efectos a la salud humana

En la industria minera la exposición de Cu provoca enfermedad pulmonar obstructiva crónica, bronquitis, así como neumoconiosis que son causadas por la inhalación de sus polvos. Estas enfermedades si no se diagnostican a tiempo pueden causar la muerte (Díaz et al. 2009; Cabrera et al. 2014).

Efectos ambientales

Las plantas que se encuentran en suelos contaminado por Cu generalmente exhiben síntomas de intoxicación como disminución del crecimiento y menor producción de hojas, una exposición crónica de Cu provoca manchas tenues de color blanco incluso en algunas especies causa un follaje de color purpura (Brun et al.2000).

2.5.1.7 Zinc

Generalidades

El Zn es el vigésimo cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, sus propiedades fisicoquímicas son las siguientes: es un metal de color plateado, maleable e insoluble en agua pero soluble en ácidos. Es un elemento que tiene una masa molecular de 65.38 g/mol, con número atómico 30 en la tabla periódica y una densidad de 7.14 g/cm³ a 20 °C. Actualmente el Zn es el cuarto metal más utilizado industrialmente después del Fe, Al y Cu. Este metal se utiliza en el galvanizado del acero, otros usos incluyen en la elaboración de latón y aleaciones base Zn.

Minerales de zinc

Hay aproximadamente 55 minerales de Zn conocidos pero solo unos pocos tienen importancia económica. La esfalerita (ZnS) es el mineral de Zn más importante, alrededor del 85 % de la producción de Zn metálico proviene de este sulfuro (Abkhoshk et al. 2014). A menudo la esfalerita (ZnS) se asocia con otros sulfuros como galena (PbS), calcopirita (CuFeS₂) y pirita (FeS₂), este sulfuro complejo (Zn-Pb, Zn-Cu o Zn-Pb-Cu) es concentrado mediante el método de flotación. Por último el Cd está estrechamente asociado con esfalerita por ello, el beneficio del Zn habitualmente tiene un valor económico añadido (Ballester et al. 1984).

Efectos a la salud humana

En comparación con otros metales pesados el Zn tiene una baja toxicidad, los síntomas a una exposición aguda son fiebre, náuseas, vómito y diarrea, por el contrario una exposición crónica puede causar daño hepático (Gad, 2014).

Efectos ambientales

La emisión de Zn como resultado de la actividad minera puede aumentar los niveles en la atmósfera, generalmente se encuentra en forma de polvo y se deposita en el agua y suelo. El agua contaminada por Zn puede acumularse en animales acuáticos o terrestres que beban de ella, esto puede provocar una toxicidad aguda o crónica, en algunos animales afecta su sistema

hematológico e intestinal. Las plantas que se encuentren en suelos contaminados por Zn, inhibe su crecimiento e interfiere con la capacidad de absorber otros metales como Fe, Cu y Mg (Gad, 2014; Tripathi et al. 2016).

2.5.1.8 Antimonio

Generalidades

El Sb está presente de forma natural en la corteza terrestre su concentración varía en el rango de 0.2 a 0.3 mg/Kg. Sus propiedades fisicoquímicas son las siguientes: es un metaloide de color plateado, frágil, además exhibe una pobre conductividad de calor y electricidad. Es un elemento que tiene una masa molecular de 121.76 g/mol, con número atómico 51 en la tabla periódica y una densidad de 6.69 g/cm³ a 20 °C. Presenta varios estados de oxidación como Sb⁻³, Sb⁰ (elemental), Sb⁺³ y Sb⁺⁵, en la naturaleza las especies que predominan son Sb⁺³ y Sb⁺⁵. El Sb se asocia generalmente con As debido que presenta varias similitudes en el comportamiento químico. Sin embargo hay algunas diferencias notables como el grado de toxicidad y disponibilidad (Anderson, 2012; Multani et al.2016).

Minerales de antimonio

En la naturaleza se encuentran más de 200 minerales de Sb, la estibnita (Sb₂S₃) es el mineral económico más importante de Sb, este comúnmente se asocia con pirita (FeS₂), cuarzo (SiO₂), calcita (CaCO₃), barita (BaSO₄), yeso (CaSO₄·2H₂O), Au, arsenopirita (AsFeS) y diversos minerales de Cu, Zn, Pb y Ag (Multani et al. 2016). Al igual que la mayoría de los minerales, la estibnita pasa por un beneficio de minerales, posteriormente se extrae Sb por dos vías, estas pueden ser por pirometalurgia o hidrometalurgia. La vía pirometalurgia consiste en diferentes métodos de acuerdo con el contenido de Sb, los concentrados que contienen entre 5 a 25 % de Sb, se volatilizan a trióxido de antimonio (Sb₂O₃) mediante una tostación a una temperatura de 1000°C, este se recupera como polvo de combustión y se reduce en hornos de reverbero usando carbón como reductor. Los concentrados que contienen entre 25 a 40% se funden en un alto horno y los concentrados entre 45 a 60% se tratan por licuación o precipitación con Fe. Los minerales de baja ley de Sb se pueden procesar por vía hidrometalúrgica, en algunos casos el método más efectivo es la lixiviación alcalina, debido que es muy selectiva comúnmente se utiliza una mezcla de sulfuro de sodio (Na₂S) e hidróxido de sodio (NaOH) como agente lixivante (Anderson, 2012; Multani et al. 2016).

Efectos a la salud humana

La toxicidad del Sb está en función del estado de oxidación, generalmente el Sb^{+3} es más tóxico que Sb^{+5} , la mayoría de los estudios toxicológicos del Sb están relacionados con Sb^{+3} como trióxido de antimonio (Sb_2O_3). Los síntomas a una exposición aguda de Sb son vómitos, diarreas, cólicos y erupciones cutáneas, por el contrario una exposición crónica puede causar problemas carcinogénicos, nefropatía, trastornos respiratorios y reproductivos. La absorción de Sb por vía gastrointestinal es pobre, de esta manera la exposición por inhalación es motivo de preocupación, particularmente en lugares de trabajos donde se transforma Sb, Cu, Pb y Zn como es la industria de la fundición y la minería. La inhalación aguda de Sb produce efectos como rinitis e irritación de la tráquea, mientras que una inhalación crónica produce bronquitis y neumoconiosis (Gad, 2014).

Efectos ambientales

El contenido de Sb en los jales mineros ha recobrado importancia en los últimos años, por ser abundante en algunos complejos mineros. Existen estudios (López, 2009; Pérez et al. 2011) que han evaluado desde diferentes puntos de vista el potencial de contaminación del Sb. En el suelo el Sb puede existir, como Sb^{+5} , que predomina en condiciones oxidantes, en cambio Sb^{+3} predomina en condiciones reductoras. El Sb es relativamente inmóvil en suelos y sedimentos contaminados debido a que, es absorbido por oxihidroxidos de Fe. Sin embargo una pequeña fracción soluble puede ser absorbida por las plantas e incorporarse en la cadena trófica. Varios estudios no han sido concluyentes respecto a la toxicidad del Sb en animales y plantas no obstante se sospecha que puede ser carcinogénico (Gad, 2014).

2.6 Técnicas analíticas para determinar la concentración de metales pesados contenidos en jales mineros

La cuantificación de metales pesados contenidos en jales mineros puede resultar un tanto difícil, puesto que la compleja y variada mineralogía que poseen los residuos da una matriz compleja. Existen estudios mineralógicos (Mendel et al. 2008; Moreno et al. 2009; Romero et al. 2010; Leura et al. 2017) que han determinado cuarzo (SiO_2), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcita (CaCO_3) y feldespatos (KAlSi_3O_8) como los minerales de ganga más predominantes en los jales en México. La matriz de los residuos están constituidos por estos minerales, frecuentemente el más abundante es el cuarzo, que tiene una buena estabilidad térmica y química. Diversas técnicas establecidas como Absorción Atómica (AAS), Espectrometría de Masas con Plasma Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) y Fluorescencia de Rayos X (XRF) han sido utilizadas en diversos estudios geoquímicos para cuantificar metales pesados en jales mineros debido que son técnicas sensibles que pueden cuantificar elementos traza o ultra traza, además presentan resultados precisos y exactos si se tiene una buena preparación de la muestra y si se corrigen los efectos de la matriz. Cada una de estas técnicas ofrece ventajas e inconvenientes, lo importante es evaluar de modo acentuado al momento de elegir una u otra técnica de acuerdo con la naturaleza química del analito y su contenido en el jal. El principio en el cual se basan estas técnicas es la espectrometría atómica que involucra la interacción de la radiación electromagnética con la materia. Así, puede medirse la radiación absorbida, emitida, transmitida dispersada o reflejada de acuerdo con las diferentes técnicas. A continuación se describe de manera general estas técnicas analíticas.

2.6.1 Espectrometría de Absorción Atómica (AAS)

La Espectroscopía de Absorción Atómica es una técnica sensible (ppm) y específica puesto que, las líneas de absorción atómica son estrechas (0.002 a 0.005 nm) y las energías de transición electrónica son únicas para cada elemento. Es una técnica que no cuantifica simultáneamente varios elementos, aunque tiene una adecuada exactitud y precisión con un costo relativamente bajo. (Benomar et al. 2010). Las muestras solidas deben estar en disolución para ser analizadas directamente en el equipo, por lo tanto se someten a una preparación previa. Dentro de los métodos más comunes se incluye los procedimientos de digestión húmeda asistida por

microondas, este método ofrece un ahorro de tiempo además de evitar la pérdida de elementos volátiles. La instrumentación básica de AAS consiste en: una fuente de radiación monocromática específica para cada elemento, un nebulizador que transforma la muestra líquida en gotas pequeñas mediante un flujo oxidante, un atomizador para producir una muestra en estado vapor con átomos excitados, un monocromador para seleccionar la longitud de onda de radiación característica, un detector que transforma la señal de radiación absorbida en una eléctrica y finalmente un procesador de señal. El funcionamiento de la técnica es el siguiente: el haz emitido por la fuente atraviesa el sistema de atomización que contiene la muestra en estado de gas atómico, este llega al monocromador que elimina la radiación que no interesa para el estudio, la señal pasa por un detector, que luego es procesada y amplificada dando como resultado una lectura de salida (Gallegos et al.2012).

2.6.2 Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS)

El ICP-MS es una técnica que se fundamenta en dos métodos establecidos, uno es el plasma acoplado por inducción como fuente generadora de iones y el espectrómetro de masas como sistema de detección. La ventajas que presenta esta técnica, es su capacidad de determinación multielemental, los bajos límites de detección (ppb), así como la posibilidad de determinar varios isótopos del mismo analito (Benomar et al. 2010).

El funcionamiento de la técnica es el siguiente: la muestra líquida se introduce mediante una bomba peristáltica, esta se lleva por un flujo de Ar hasta el nebulizador, con el fin de obtener un aerosol con gotas pequeñas. Las gotas grandes que se forman en el nebulizador son separadas y desechadas mediante una cámara de spray. El aerosol con gotas pequeñas es ionizado por el plasma que alcanza temperaturas entre 8 000 a 10 000 K, este se genera al someter el flujo de gas de Ar a la acción de un campo magnético. Los iones producidos por el plasma son introducidos a una interfase que consiste en dos conos metálicos que poseen un pequeño orificio a través del cual pasan los iones desde el plasma hacia el separador de masas. Dentro de los distintos separadores disponibles uno de los más extendidos es el cuádruplo, que consiste en cuatro cilindros metálicos. De este modo las partículas cargadas eléctricamente se separan en función de su relación masa-carga (m/z). Cada una de las masas sintonizadas llega al detector donde se determina su abundancia en la muestra.

2.6.3 Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF)

La Fluorescencia de Rayos X (XRF) se basa en la detención de rayos X característicos emitidos por los átomos de una muestra irradiada por un haz primario de rayos X, generalmente producido en un tubo de rayos X de Mo o Rh. Es una técnica de análisis multielemental no destructiva de alta sensibilidad, rápida que puede ser aplicada a una gran variedad de muestras, las cuales requieren escasa o nula preparación para su análisis. La XRF puede detectar todos los elementos del sistema periódico, con excepción de aquellos de número atómico menor a 5 (Boro), ya que son considerados elementos ligeros. (Vázquez, 2003; Cervantes et al. 2014).

2.6.3.1 Principio del análisis de Fluorescencia de Rayos X

Un haz primario de rayos X de alta energía incide sobre la muestra, esto provoca que los electrones de las capas más internas sean expulsados, por tanto los electrones de las capas más externas realizan un salto para llenar estas vacancias. Cada transición electrónica o salto constituye una pérdida de energía para el electrón, esta energía emitida en forma de rayos X es característica para cada elemento. Estos rayos X secundarios son detectados y registrados lo cual origina un espectro de líneas que revela los elementos presente en la muestra, además la intensidad de estas líneas (número de fotones de rayos X detectados por unidad de tiempo) se relaciona con la concentración.

2.6.3.2 Instrumentación

Los equipos de XRF consisten de tres partes principales: una fuente de excitación, un espectrómetro y un detector, a continuación se describen de forma general

Fuente de excitación

Las fuentes de excitación pueden ser de dos tipos: tubos de rayos X y radioisótopos. Los tubos de rayos X consisten en un tubo al alto vacío con dos filamentos, uno de tungsteno que es el cátodo y otro metálico que es el ánodo y fuente de rayos X. La fuente de radioisótopos consiste cuando un núcleo inestable decae en diferentes isótopos, durante la transición son emitidos rayos- γ del núcleo o rayos X.

Espectrómetro

El espectrómetro consta de diferentes elementos que tienen como función principal separar y cuantificar los rayos X emitidos por la muestra. Existen dos tipos de espectrómetros de rayos X uno es por dispersión de longitud de onda y otro por dispersión de energía, este último es el más moderno.

Detector

Los detectores convierten los rayos X emitidos por la muestra en una señal electrónica susceptible de ser medida. Los más comunes son los detectores de ionización de gases, detectores de centello y detectores de Si (Li) (Amado, 2009).

2.6.3.3 Análisis cualitativo y cuantitativo

La técnica de Fluorescencia de Rayos X nos permite realizar dos tipos de análisis químicos, estos son cualitativo y cuantitativo a continuación se describen de forma general.

Análisis cualitativo

El análisis cualitativo tiene como objetivo identificar los picos de los elementos presentes en la muestra, también en este análisis se clasifica cada elemento como mayoritario, minoritario o traza en función de la intensidad del pico. Para la identificación de los picos se recurre a los datos espectrales incluidos en los software incluido en el equipo (Ballester et al.1984).

Análisis cuantitativo

El principal objetivo del análisis cuantitativo es minimizar y corregir los efectos químicos de la matriz (efectos de absorción emitida por otro elemento) por medio de estándares con composición química conocida y certificada que se parezca lo más posible a la muestra, de igual modo con uso de métodos matemáticos para corregir estos efectos. Existen otros puntos a tomar en cuenta para obtener resultados confiables como son: el tiempo de exposición de la muestra a la radiación y la preparación de la muestra. La calidad del análisis depende de tiempo de exposición de la muestra a la radiación lo habitual está en el rango de 30 a 600 s. Las muestras con superficies rugosas, tamaño de partícula inadecuado y heterogeneidad pueden conducir a una relación no proporcional entre la intensidad espectral y la composición.

Capítulo 3

Justificación

La determinación del contenido de metales pesados en jales mineros de Cedral S.L.P. permitié evaluar el potencial de riesgo ambiental en la zona y el posible impacto a los habitantes de ella.

Capítulo 4

Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar el impacto ambiental en términos de concentración total de metales pesados contenidos en jales mineros provenientes del distrito minero de Cedral, S.L.P. a través de la técnica de FRX.

4.2 Objetivos particulares

- Determinar la concentración total de metales pesados contenidos en jales mineros provenientes del distrito minero de Cedral, S.L.P.
- Comparar los resultados obtenidos de este estudio con los datos reportados en otras zonas mineras en México.

4.3 Hipótesis

La evaluación del potencial de riesgo ambiental de los jales mineros de Cedral, S.L.P. (en términos de concentración total de metales pesados) permitirá reconocer posibles problemáticas de contaminación derivadas de las actividades mineras pasadas.

Capítulo 5

Zona de estudio

5.1 Área de estudio

El municipio de Cedral se encuentra en el altiplano mexicano en el extremo norte del estado de S.L.P. ($100^{\circ}43'35''$ de longitud oeste y $23^{\circ}49'09''$ de latitud norte), a una altitud de 1,700 msnm (Figura 5.1). Sus límites son: al norte con el Estado de Nuevo León y el municipio de Venegas; al este con el municipio de Matahuala; al sur con el municipio de Villa de la Paz y al oeste con el municipio de Catorce (INEGI, 2017).

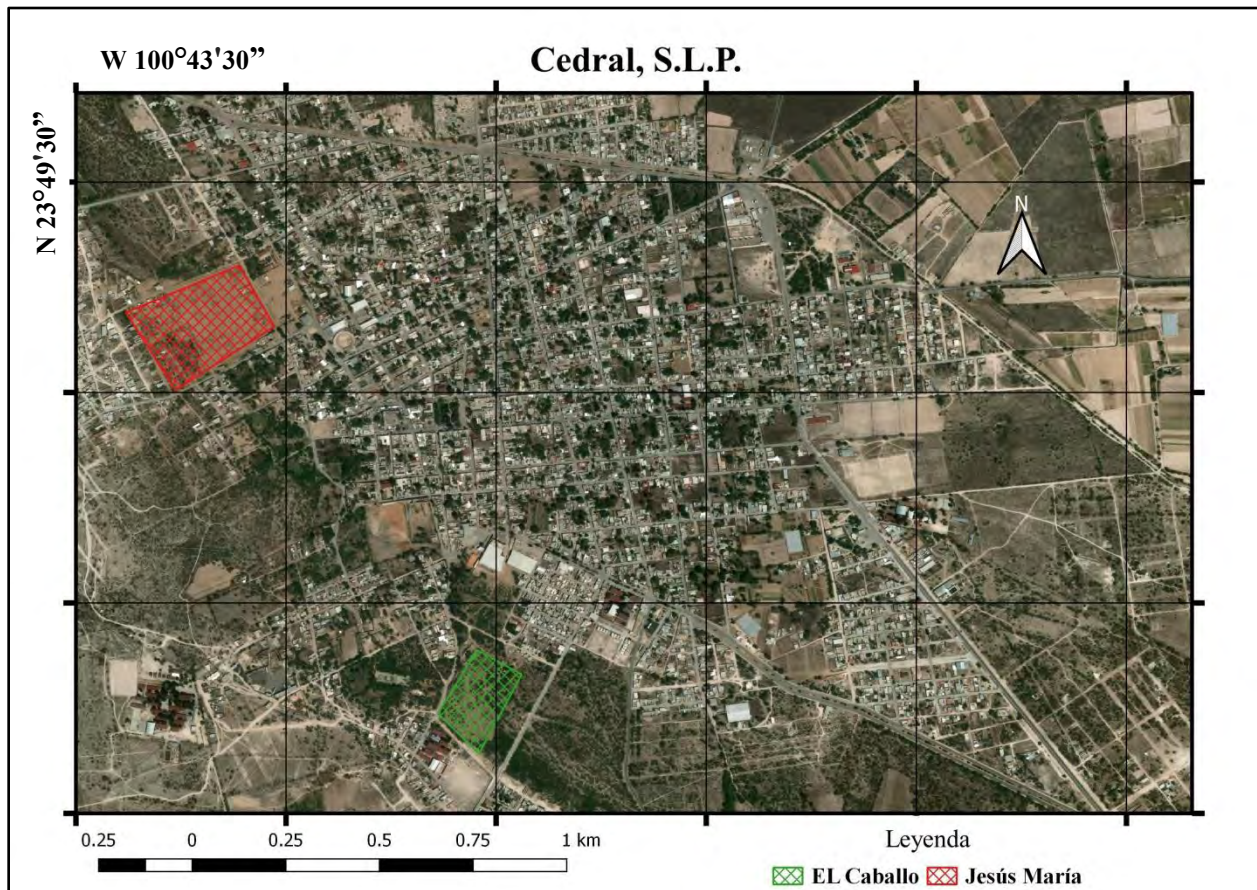


Figura 5.1. Mapa de localización de la zona de estudio, Cedral, S.L.P.

5.1.1 Generalidades de Cedral, S.L.P.

Cedral, cuenta con una superficie de 1,185.06 Km², en el año 2015 el municipio tenía una población de 19,176 habitantes, de los cuales 9,278 son hombres y 9, 898 son mujeres. El 62% de la población se encuentra en situación de pobreza y el 10% en pobreza extrema (Pérez, 2016; INEGI, 2017).

5.1.2 Clima

En Cedral predomina un clima semiárido templado con una temperatura promedio anual de 17°C. Los registros históricos de precipitaciones indican un promedio anual de 359 mm, la máxima precipitación ocurre en el mes de junio y la mínima en febrero. Este municipio se caracteriza por fuertes vientos en dirección S.E y N.W con un rango de velocidades de 16 a 32 km/h (SMN, 2010).

5.1.3 Suelo

El suelo de Cedral está constituido principalmente por unidades de tipo Calcisol, Leptosol, Gypsisol y Regosol. Este tipo de suelo es característico de las zonas áridas y semiáridas que presenta bajo contenido de materia orgánica, además a cierta profundidad tiene yeso acumulado en forma de cristales, así como arcillas en el subsuelo (INEGI 1997; Leura et al. 2017).

5.1.4 Jales mineros

Como se mencionó anteriormente, Cedral cuenta con una historia minero/metalúrgica que data de más de cinco siglos. El municipio formó parte de un complejo industrial llamado La sierra Catorce en la época colonial. Posteriormente en el siglo XX los jales fueron reprocesados mediante el método de lixiviación con tiosulfato de calcio (CaS₂O₃) para recuperar Ag. Como resultado de estas actividades los residuos fueron arrojados en diferentes puntos del municipio. En el sur de Cedral se encuentra los jales denominados la Hacienda El Caballo y al noroeste se encuentra los jales la Hacienda Jesús María, los residuos se fueron acumulando a la intemperie y posiblemente dispersados a través del tiempo (Morton et al. 2015; Leura et al. 2017).

Capítulo 6

Metodología

6.1 Muestreo

Se colectaron un total de 20 muestras de jales del municipio de Cedral, S.L.P. de los cuales 10 son de la Hacienda El Caballo y 10 de la Hacienda Jesús María. Estas muestras se tomaron a diferentes profundidades, desde la superficie hasta los 100 cm. Se almacenaron y etiquetaron en bolsas de propileno y se transportaron al Laboratorio de ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM (Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Identificación de las muestras seleccionadas para este estudio

Zona	Clave	Profundidad (cm)	Zona	Clave	Profundidad (cm)
	TS-1	0-20		TS-11	0-20
	TS-2	20-90		TS-12	20-40
	TS-3	40-60		TS-13	40-60
	TS-4	60-80		TS-14	60-80
El	TS-5	80-100	Jesús	TS-15	80-100
Caballo	TS-6	0-20	María	TS-16	0-20
	TS-7	20-90		TS-17	20-40
	TS-8	40-60		TS-18	40-60
	TS-9	60-80		TS-19	60-80
	TS-10	80-100		TS-20	80-100

6.2 Análisis químico

Las muestras fueron sometidas a un proceso de preparación anterior a su análisis por FRX, estas se pulverizaron hasta una granulometría inferior a la malla 200 ($< 75\mu\text{m}$) con la finalidad de que pudieran ser analizadas por esta técnica. El análisis se desarrolló en el Laboratorio de FRX del Instituto de Geología de la UNAM, con un espectrómetro secuencial de Rayos X modelo Siemens SRS-3000 equipado con un tubo anódico de Rh y ventana de Be de $125\mu\text{m}$. La calidad de los resultados se evaluó mediante el análisis del material de referencia certificado RTS-1 (exactitud) y la precisión del método por medio de triplicados afín de calcular el coeficiente de variación que resultó ser menor a 20 que es analíticamente aceptable. Los metales pesados analizados fueron Cr, Cu, Zn, Cd, Pb y Sb de igual forma se analizó Ag.

6.3 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron sujetos a diferentes pruebas estadísticas con el fin de determinar si provienen de una distribución normal mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov. A partir de esta prueba se determinó que los datos obtenidos en este estudio provienen de una distribución normal y se puede aplicar pruebas paramétricas como es la correlación de Pearson (anexo 1.1). Se aplicó el análisis de Pearson entre las concentraciones totales de los metales analizados tanto para El Caballo como para Jesús María con el propósito de identificar las asociaciones entre los elementos y si se encuentran relacionados a fases mineralógicas comunes. Los valores obtenidos se compararon con la tabla de valores críticos para determinar correlaciones significativas (anexo 1.2).

A manera de resumen la Figura 6.1 muestra un diagrama general de los pasos de la metodología.

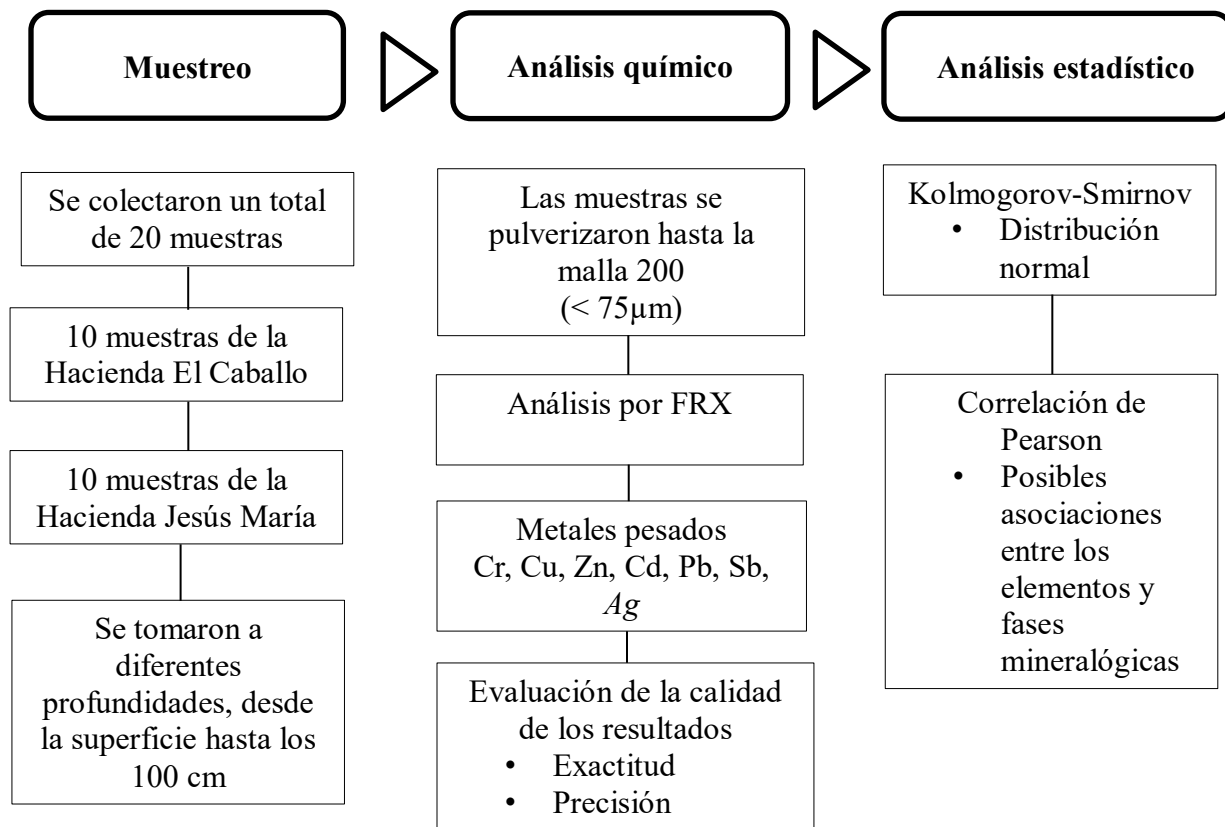


Figura 6.1 Diagrama general de los pasos de la metodología

Capítulo 7

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados de las concentraciones totales de los metales pesados analizados en las muestras de jales provenientes del El Caballo y Jesús María. Además, estos datos se comparan con los reportados en otros sitios mineros en México.

7.1 Concentración total de metales pesados contenidos en jales mineros de Cedral, S.L.P.

La Tabla 7.1 presenta la concentración total de los metales analizados con valores de máximo, mínimo, promedio y desviación estandar. Dentro de los metales pesados analizados del jal El Caballo, el Pb se encuentran en mayor concentración con un valor promedio de 6,433.5 mg/Kg seguido de Zn (4648.1 mg/Kg), Cu (1448.6 mg/Kg), Sb (1183.3 mg/Kg), Cd (131.8 mg/Kg) y Cr (128.1 mg/Kg) de igual modo se observa que el metal menos concentrado en el jal es Ag con una concentración promedio de 84.2 mg/Kg.

Asimismo para las muestras analizadas del jal Jesús María, el Pb se encuentra en mayor concentración con un valor promedio de 10,726.3 mg/Kg seguido de Zn (5286.6 mg/Kg), Cu (2404.3 mg/Kg), Sb (1506.1 mg/Kg), Cr (266.9 mg/Kg) y Cd (122.5 mg/Kg). Por último se observa que la concentración total promedio Ag en el jal es de 197.8 mg/Kg.

Tabla 7.1 Concentración total de metales pesados contenidos en jales mineros de Cedral, S.L.P.

El Caballo							
(mg/Kg)							
	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Sb	Ag
TS-1	175	1690	5450	162	7480	1610	107
TS-2	174	1970	6680	191	8750	1870	164
TS-3	84	1560	5101	174	7154	1132	107
TS-4	89	1640	5450	181	7670	180	135
TS-5	102	1720	5840	184	7531	1410	124
TS-6	101	1520	5050	143	6800	1250	123
TS-7	240	1780	3530	88	5230	1170	22
TS-8	66	847	3110	79	4567	1120	23
TS-9	176	599	2220	41	3292	761	13
TS-10	74	1160	4050	75	5861	1330	24
Max	240	1970	6680	191	8750	1870	164
Min	66	599	2220	41	3292	180	13
Promedio	128.1	1448.6	4648.1	131.8	6433.5	1183.3	84.2
Desviación	58.4	439	1377.2	55.4	1665.9	462.2	57.1
Jesús María							
(mg/Kg)							
T-11	215	2950	5800	130	13500	1970	132
T-12	384	2840	5820	115	13100	1400	120
T-13	127	3060	5570	128	13000	1912	153
T-14	145	2721	5732	157	13000	2202	143
T-15	127	3210	5880	131	14200	1822	147
T-16	424	2802	6512	146	12900	1802	172
T-17	159	2190	7170	144	10200	1280	198
T-18	920	1600	3580	73	6020	854	237
T-19	63	1440	3440	108	6092	974	240
T-20	105	1230	3362	93	5251	845	436
Max	920	3210	7170	157	14200	2202	436
Min	63	1230	3362	73	5251	845	120
Promedio	266.9	2404.3	5286.6	122.5	10726.3	1506.1	197.8
Desviación	258.4	732.3	1343.8	25.7	3564.3	501	93.5

La Figura 7.1 muestra una comparación de las concentraciones obtenidas de los metales analizados en los jales mineros del El Caballo y Jesús María representados en diagramas de caja y bigotes.

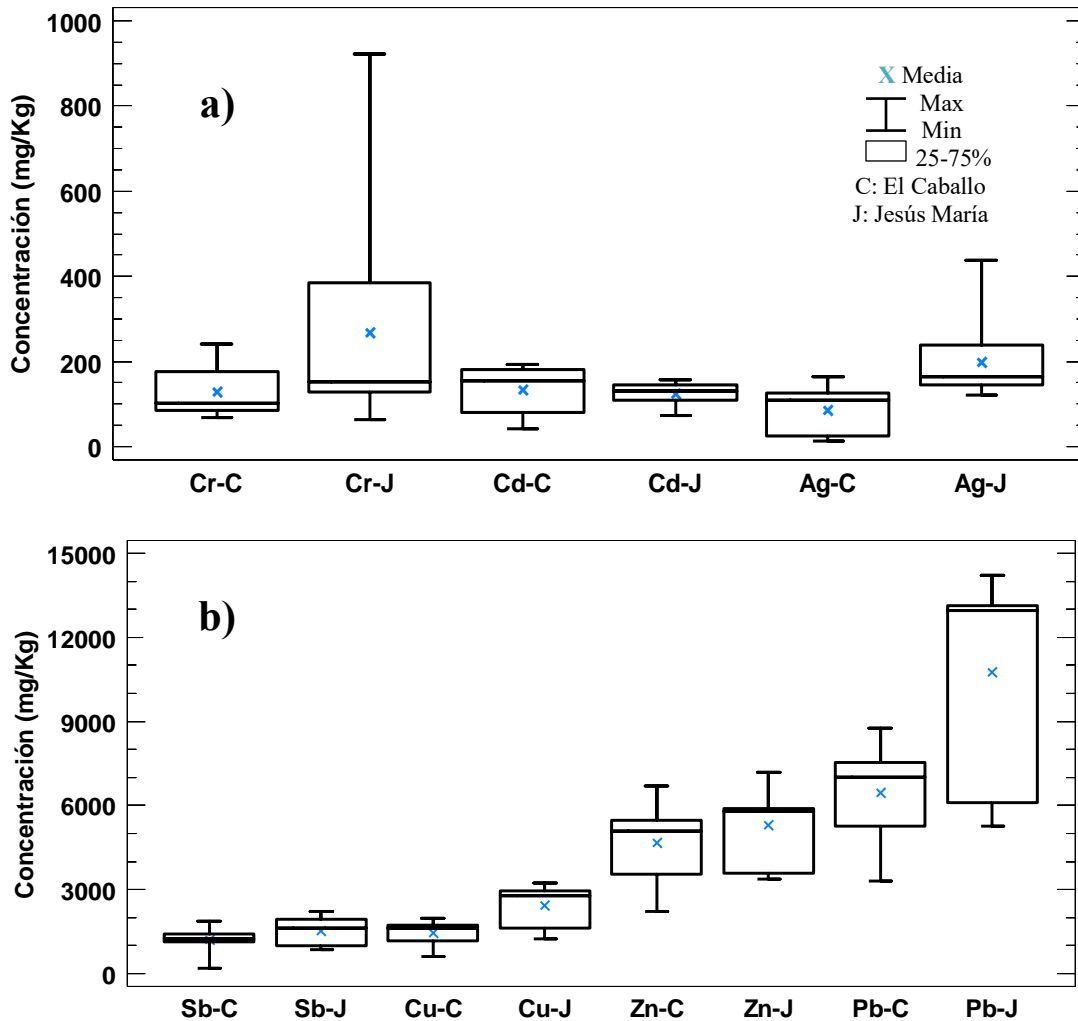


Figura 7.1 Graficas de caja y bigotes donde se compara las concentraciones de metales pesados contenidos en los jales del El Caballo y Jesús María

La Figura 7.1 a), muestra que las concentraciones más altas de Cr y Ag corresponden al sitio Jesús María, asimismo se observa que los valores de Cr en el jal presentan una mayor variabilidad en comparación con los otros metales. Con respecto a las gráficas de caja y bigotes de Cd se observa concentraciones similares entre ambos sitios siendo mayor en El Caballo.

La Figura 7.1 b), muestra que las concentraciones más altas de Sb, Cu, Zn y Pb corresponden al sitio Jesús María. Además se observa que el Pb es el metal pesado más concentrado tanto para El Caballo y Jesús María mientras que Cd y Cr son los metales pesados menos concentrados en ambos sitios. Por lo tanto el sitio Jesús María presenta las concentraciones más altas de Cr, Ag, Sb, Cu, Zn y Pb mientras El Caballo presenta concentraciones más altas de Cd.

7.2 Matriz de correlación de Pearson de las concentraciones totales de los metales pesados analizados en la zona de estudio

Como se mencionó anteriormente (6.3) los datos fueron sometidos a pruebas estadísticas con el fin de identificar si provienen de una distribución normal. Una vez identificada esta característica, se procedió a evaluar la matriz de correlación de Pearson con el propósito de reconocer las asociaciones entre los metales y determinar si se encuentran relacionados a fases mineralógicas comunes de origen.

La Tabla 7.2 muestra la matriz de correlación de Pearson para los datos obtenidos para las muestras de jales analizadas de la localidad El Caballo, las correlaciones significativas se marcan en verde para un total de 10 muestras se utiliza un coeficiente de correlación de $p < 0.549$ con un valor de significancia de $\alpha=0.05$

Tabla 7.2 Matriz de correlación de Pearson para los datos obtenidos para las muestras de jales analizadas de la localidad El Caballo

	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Sb	Ag
Cr	1						
Cu	0.273	1					
Zn	-0.105	0.845	1				
Cd	-0.144	0.813	0.953	1			
Pb	-0.116	0.860	0.993	0.951	1		
Sb	0.245	0.372	0.394	0.210	0.348	1	
Ag	-0.122	0.74	0.942	0.955	0.926	0.21	1

*Correlaciones son marcadas como significativas en $p < 0.549$

La Tabla 7.2 muestra que todos los elementos analizados presentan una correlación positiva entre ellos, con excepción de Sb y Cr. Se puede observar que tanto la relación de Zn con Pb (0.993), Cu con Pb (0.860) y Cu con Zn (0.845) indica que posiblemente están asociados a fases mineralógicas comunes. Estos elementos pueden estar asociados como ZnS-PbS-CuFeS₂ (que es un sulfuro complejo o polimetálico común en muchos yacimientos en México) en este depósito de residuos mineros. La correlación de Zn-Cd podría indicar que Cd se encuentra asociado con esfalerita (ZnS) junto con galena (PbS) Cd-Pb (0.951). Por otro lado la correlación de Pb-Ag (0.926) sugiere que la Ag está asociada con galena de igual forma con esfalerita Zn-Ag (0.942). El hecho de que Sb y Cr no presentan correlación positiva con ningún metal, tal vez se deba a que estos puedan estar asociados con pirita (FeS₂) como elementos traza.

Por otra parte la Tabla 7.3 muestra la matriz de correlación de Pearson para los datos obtenidos para las muestras de jales analizadas de la localidad Jesús María, las correlaciones significativas se marcan en rosa para un total de 10 muestras se utiliza un coeficiente de correlación de $p < 0.549$ con un valor de significancia de $\alpha = 0.05$

Tabla 7.3 Matriz de correlación de Pearson para los datos obtenidos para las muestras de jales analizadas de la localidad Jesús María

	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Sb	Ag
Cr	1						
Cu	-0.160	1					
Zn	-0.185	0.769	1				
Cd	-0.513	0.681	0.833	1			
Pb	-0.216	0.988	0.817	0.758	1		
Sb	-0.310	0.887	0.676	0.818	0.906	1	
Ag	-0.052	-0.843	-0.687	-0.585	-0.837	-0.73	1

**Correlaciones son marcadas como significativas en $p < 0.549$*

La Tabla 7.3 muestra que todos los elementos analizados presentan una correlación positiva entre ellos, con excepción de Cr y Ag. Se puede observar que tanto la relación de Cu con Pb (0.988), Zn con Pb (0.817) y Cu con Zn (0.769) indica que posiblemente estos metales estén asociados

como ZnS-PbS-CuFeS_2 . La correlación de Zn-Cd podría indicar que Cd se encuentra asociado con esfalerita Zn-Cd (0.833) y galena Cd-Pb (0.758). Por otro lado la correlación de Pb-Sb (0.906) sugiere que Sb se encuentra asociado con galena junto con calcopirita Cu-Sb (0.887) y esfalerita Zn- Sb (0.676). El hecho de que Cr y Ag no presentan correlación positiva con ningún metal, tal vez se deba a que estos puedan estar asociados con pirita (FeS_2). Por último la comparación de las correlaciones de Sb y Ag tanto para El Caballo como en Jesús María, sugiere que los jales en los dos sitios son producto de distintas vetas beneficiadas en Cedral.

7.3 Comparación de las concentraciones de metales pesados contenidos en jales de Cedral, S.L.P. con otros sitios mineros en México

Las concentraciones de los metales pesados evaluados en muestras de jales mineros provenientes de Cedral S.L.P., obtenidas en este estudio, se comparan con las reportadas en otros sitios mineros en México (Talavera et al. 2006, Morton et al. 2014, Mendel et al. 2008, Ramos, 2017, Moreno et al. 2009, López, 2009, Castro et al. 1997, Luna, 2008) en la Tabla 4.

La Tabla 7.4 presenta la comparación de las concentraciones de los metales pesados contenidos en los jales de este estudio con las reportadas en otros sitios mineros en México.

Tabla 7.4 Comparación de las concentraciones de metales pesados contenidos en jales de Cedral, S.L.P. con otros sitios mineros en México

Zona minera	Localidad	Referencia	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Sb	Ag
			(mg/Kg)						
Cedral, S.L.P.	El Caballo	Este estudio	128.1	1,448.6	4,648.1	131.8	6,433.5	1,183.3	84.2
	Jesús María	Este estudio	266.9	2,404.3	5,286.6	122.5	10,726	1,506.1	197.8
Taxco, Gro	El Fraile	Talavera et al. 2006	*	225	3,118	39.50	3,677	*	30.50
	La Concha	Morton et al. 2014	*	722.5	24,650	*	12,060	*	*
Guanajuato	Distrito Guanajuato	Mendel et al. 2008	12	*	53	*	17	*	*
	La Aurora	Ramos, 2017	11.3	612.7	3,243.3	170.5	4,858.1	*	*
Hidalgo	Dos Carlos	Moreno et al.2009	*	66.3	688.6	4.1	340	*	43.3
	Sur I		*	139	2,540	13	1,910	*	89.5
	Sur II		*	184.9	2,914.1	14.2	1,205.5	*	44.5
	Omitlan		*	416.9	6,674.6	27.7	3,551.2	*	77
S.L.P.	Wadley	López, 2009	9.9	5.1	56.4	*	5.9	10,374	*
	Sta. Maria de la Paz	Castro et al. 1997	*	400	2,000	30	3,000	*	*
	Charcas Presa activa	Luna, 2008	< LD	489.7	4,615.7	53.7	646.8	*	26
	Charcas Presa inactiva		19.6	2,280	27,853	517.8	7,722	*	40
Límites máximos permisibles NOM-157-2009			100	*	*	20	100	10.6	100

*Elementos no reportados
<LD por debajo del límite de detección

Se observa que las concentraciones de Cu y Ag en Jesús María son más altas que las reportadas para los otros sitios mineros en México. Para el caso de Cr se puede observar que en las localidades de Cedral se encuentran las concentraciones más altas. Por otro lado las concentraciones de Zn, Cd, Pb y Sb reportadas en jales de Charcas (presa inactiva), La Concha y Wadley son más altas a este estudio.

Como se mencionó anteriormente el hecho de que los jales representen un riesgo ambiental llevo a México a implementar unas series de lineamientos encaminados a la protección ambiental. Por lo tanto las concentraciones obtenidas se compararon con la NOM-157 SEMARNAT-2009, que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.

La comparación de las concentraciones de metales encontradas en este estudio con los valores límites recomendados por la norma en la Tabla 7.4, indica que las concentraciones de Pb, Sb, Cd y Cr tanto para el sitio El Caballo como para Jesús María exceden dicho valor.

Para el caso de Ag se observa que la concentración en los jales analizados del El Caballo no rebasa el límite establecido, sin embargo las concentraciones de Ag encontradas en Jesús María excede casi dos veces el límite recomendado por la norma.

Capítulo 8

Conclusiones

Los resultados de este estudio aportan información valiosa respecto al impacto que la actividad minera ha provocado en la zona de Cedral, S.L.P. evaluado en términos de concentración total de metales pesados contenidos en los jales mineros. Esta evaluación permite concluir lo siguiente:

1. De los metales analizados, el metal pesado más concentrado en los sitios de El Caballo y Jesús María es Pb (concentración promedio de 6,433.5 mg/Kg y 10,726.3 mg/Kg respectivamente), mientras que los metales menos concentrados en ambos sitios son Cr, Cd y Ag.

2. El estudio permitió determinar las posibles asociaciones mineralógicas de origen que existen en los jales mineros. Para los dos sitios se determinó que los elementos Cu, Zn, y Pb pueden estar asociados a fases mineralógicas comunes al igual que los elementos Zn-Cd-Pb. La comparación de las correlaciones de Pearson de Ag y Sb en los dos sitios sugiere que los jales son producto de distintas vetas beneficiadas en Cedral.

3. La comparación de los resultados obtenidos de los dos sitios analizados en este estudio permite reconocer que los jales mineros de Jesús María son más concentrados en todos los elementos analizados con excepción de Cd.

4. La comparación de los resultados en este estudio con datos de concentración de metales reportados para otros sitios mineros en México (Taxco, Distrito Guanajuato, La Aurora, Pachuca-Real del Monte, Wadley, Sta. María y Charcas), refleja que los jales mineros estudiados presentan concentraciones más altas de Cr (Jesús María y El Caballo), Cu y Ag (Jesús María). Los elementos Zn, Cd, Pb y Sb se presentan en concentraciones más altas en los jales de Charcas, Sta. María y Wadley.

5. Las concentraciones de Pb y Sb contenidos en los jales mineros de Cedral, exceden casi 100 veces el límite recomendado por la Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009. De igual manera las concentraciones de Cd, Cr y Ag (con excepción en El Caballo) exceden el límite recomendado por la norma.

6. La evaluación de los datos obtenidos en este estudio referente a la concentración de metales pesados en jales de Cedral, pueden representar un riesgo potencial a la salud sobre todo tomando en consideración las condiciones climáticas de la zona. Por lo tanto los jales mineros se pueden dispersar en forma de polvos desde los vertederos hacia la zona urbana. De esta manera los polvos pueden ser una de las principales rutas de exposición para la población y el medio ambiente.

Referencias bibliográficas

- Abkhoshk, E., Jorjani, E., Rashchi, F. & Naazeri, M. (2014). Review of the hydrometallurgical processing of non-sulfide zinc ores. *Hydrometallurgy* Vol. 149 pp. 153-155.
- Álvarez, E., Otones, V., Murciego, A. & Garcia, A. (2013). Evaluation of different amendments to stabilize antimony in mining polluted soils. *Chemosphere*. Vol.90 pp. 2233-2234.
- Amado, J. (2009). Estudio de los mecanismos de cristalización y maduración de fosfatos de calcio en medio biológico usando radiación de sincrotrón. Tesis de doctorado Universidad de Córdoba, pp. 23-255.
- Anderson, G. (2012). The metallurgy of antimony. *Chemie der Erde-Geochemistry*. Vol.72. pp. 3-7.
- Aragón, P., Campos, R., Leyva, R. & Hernández, O. (2006). Influencia de emisiones industriales en el polvo atmosférico de la ciudad de San Luis Potosí. *Rev. Int. Contam. Ambient* Vol. 22, núm.1, pp. 6-11.
- Argota, P. & Argota, C. (2012). Evaluación ambiental del río San Juan de Santiago de Cuba por exposición bioacumulativa a metales pesados. *Medisan*, pp. 1207-1214.
- Armienta, M. (2012). Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del Rio Taxco en Guerrero México. *Revista Mexicana Geológicas*, Vol.29, núm. 2, pp. 450-453.
- Azañero, O. & Valencia, M. (1999). Evaluación de reactivos de flotación. *Revista del instituto de investigación (RIIGEO)*, Vol. 2, núm. 4, pp. 1-4.
- Ballester, A., Vedeja, L. & Sancho, J. (1984) *Metalurgia Extractiva*, Vol. I Fundamentos. pp. 49-58: Síntesis.
- Ballester, A., Vedeja, L. & Sancho, J. (1984). *Metalurgia extractiva*, Vol. II Procesos de obtención. pp. 264- 279, 378-379, 410-413: Síntesis.
- Barrera, G. (2012). El paisaje de Real Catorce: un despojo histórico, *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, p. 113.

- Benomar, M., Moreno, A. & García, V. (2010). Metales pesados en los ecosistemas marinos: Académica Española. pp. 15-20.
- Biswal, A., Padhy, C. & Subbaiah, T. (2012). The effects of magnaflocan zinc on electrowinning of cadmium in sulfate solutions. *Hydrometallurgy*, pp. 13-14.
- Brun, L., Maillet, J., Hinsinger, P. & Pépin, M. (2000). Evaluation of copper availability to plants in copper-contaminated vineyard soils. *Environmental Pollution*, pp. 293-294.
- Burillo, J., Cardona A., Catro, L. & Montes, I. (2017). Caracterización y modelación hidrogeoquímica de lixiviados mineros de San Luis Potosí, S.L.P. México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 69, núm.3, pp. 637-638.
- Bustillo M. (2000). Recursos minerales: Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia, impacto ambiental. pp. 258-295: Arias Montano, S.A,
- Cabrera, M., Velásquez, A. & Vrhovac, B. (2014). Enfermedades profesionales en la industria del cobre: extracción, manufactura y reciclaje. *Medicina y seguridad del trabajo*, pp. 758- 561.
- Cámara minera de México (CAMIMEX) (2018). Informe anual 2018, pp. 40-44, 49-51,56-57, 68, 82-84, 87.
- Castro, L., Kramar, U. & Puchelt, H. (1997). 200 years of mining activities at La Paz/ San Luis Potosí/ Mexico-Consequences for environment and geochemical exploration. *Journal Geochemical Exploration*, Vol.58, pp. 81-91.
- Cervantes, G., Rubalcaba, S., González M. & Avilés M. (2014). Evaluación de la bioacumulación de cobre *Englena gracilis* mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X. Vol. 42, núm. 3, pp. 662-663.
- Clark K. (1986). Precious metal deposits of Taxco, Guanajuato and Pachuca- Real del Monte, México. *Guidebook for field and mine excursions Society of economic geologists*, pp. 27-29, 43-44, 75-76, 105-107.
- Corona, P., Maldonado R., Yann R., Roble J., Lozano, R. & Martínez, M. (2017). Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahuá-El oro, México, y sus aplicaciones de impacto ambiental. *Revista Mexicana de ciencias geológicas*, Vol. 34, núm. 3, p. 251.

- Corrales, P. & Martín, R. (2013). Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 65, núm.3, pp. 427-434.
- Covarrubias, A. & Peña, C. (2016). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Re. Int. Contam. Ambie.* Vol. 33, pp.8-10.
- De la O, V., Meza, D., Maier, R., Moreno, D., Gómez, A. & Del Rio, R. (2013). Procesos erosivos en jales de la Presa I de Nacozari de García, Sonora y su efecto en la dispersión de contaminantes. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 65, núm.1 pp. 28-31.
- Díaz, M., Tesoro, A., Valentín, A., Ocampo, A., Ruggeri, P. & Delfino, R. (2009). Salud y seguridad en trabajo de minería. [En línea] Disponible en: https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/salud_seg_mineria.pdf (Último acceso 08 de Abril de 2008)
- Flores, R., Rico, E., Núñez, M. & Díaz, B. (2012). Exposición infantil al plomo en sitios contaminados. *Revista Salud pública* Vol. 54 núm. 4, pp. 34-386.
- Gad, S. (2014). Reference module in biomedical sciences, encyclopedia of toxicology (Third edition), pp. 274-276, 997-999
- Gaioli, M., Amoedo, D. & González, D. (2012). Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. *Arch Argent Pediatr*, pp. 259-262.
- Gallegos, W., Vega, M. & Noriega, P. (2012). Espectroscopía de Absorción Atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos. *La Grana. Revista de Ciencias de la Vida*, Vol. 14, núm 1, pp 18-25.
- García, J. (2006). Metales pesados en sedimentos en tres lagunas costeras de sur de Tamaulipas y norte de Veracruz. Tesis de Maestría, IPN, pp. 8-12.
- Gómez, B., Santana C., Martín R., Armienta M., Morton, B. & Ruiz, H. (2010). Plantas de sitios contaminados con desechos mineros en Taxco, Guerrero, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, núm. 87, pp. 131-133.
- Hassan, Z., Ali, S., Rizwan, M., & Abbas, F. (2017). Role of zinc in alleviating heavy metal stress. Chapter 14, book *Essential Plant Nutrients: Uptake, use efficiency and management*, pp.351-356.

- Hernández, A., Mondragón, R., Rubiños, P. & Robledo, S. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente vol. 15 núm. 2 Chapingo, pp. 110-113.
- Hong, Y. & Wadsworth, M. (1986). Cinética de los procesos de la metalurgia extractiva. pp. 167-171: Trillas.
- Huang, S., Xia, W., Li, Y., Zhang, B., Zhou, A., Zheng, T., Qian, Z., Huang, Z. & Xu, S. (2017). Association between maternal urinary chromium and premature rupture of membranes in the Healthy Baby Cohort study in China. Environmental Pollution, pp. 53-54.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (1997). Cuaderno estadístico municipal, Cedral estado de San Luis Potosí, pp 3-7.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2017). Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí 2017, pp.17, 87, 203-204, 283, 303, 363, 411.
- Jiménez, G. (2013). Impacto ambiental del Hg contenido en residuos mineros en una zona minera abandonada en la cercanía de Cedral, San Luis Potosí. Tesis de maestría, UNAM, pp 21-29.
- Kelly E. & Spottiswood, D. (1990). Introducción al procesamiento de minerales. pp. 307-314: Limusa.
- Kushwaha, A., Hans, N., Kumar, S. & Rani, R. (2018). A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies. Ecotoxicology and Environmental Safety. Vol. 147, pp. 1035-1037.
- Lang M. El monopolio estatal del mercurio en el México colonial (1550-1710). pp. 46-51: Fondo de Cultura Económica.
- Lawrence, K., Jiaping, P., Yung-Tse, H. & Shammas, N. (2009). Heavy metals in the environment. pp. 14-27: CRC Press.
- Leura, V., Carrizales, Y. & Raza, S. (2017). Mercury pollution assessment of mining wastes and soils from former silver amalgamation area in north- Cedral Mexico. Rev. Int. Contam. Ambie. Vol. 33, pp.657-660.

- Long, G., Peng, Y. & Bradshaw, D. (2017). Flotation separation of copper sulphides from arsenic minerals at Rosebery copper concentrator. *Minerals Engineering*. Vol.66. pp.207-209.
- López, D. (2009). Distribución y fitodisponibilidad de metales pesados (Sb, Hg, As) en los jales de la mina de antimonio de Wadley, estado de San Luis Potosí. Tesis de maestría, UNAM pp.17-18; 70, 143.
- Lottermoser, G. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and environmental impacts*. pp. 205-2017: Springer.
- Luna (2008). *Mineralogía y Geoquímica de los jales de la unidad minera Charcas, San Luis Potosí*. Tesis de licenciatura UNAM, pp.10-15, 50.
- Mandal, P. (2017). An insight of environmental contamination of arsenic on animal health. *Emerging Contaminants*. Vol.3 pp.17-21.
- Mendel, A., Ramos, S., Avelar, F., Godóñez, L. & Rodríguez, F. (2008). Caracterización de jales mineros y evaluación de su peligrosidad con base en su potencial de lixiviación. *Conciencia tecnológica*, núm. 35, pp. 32-35.
- Méndez, R. (2017). Movilidad de Zn, Pb, Fe, Cd y As en el río Taxco en Guerrero, México. Tesis de doctorado, UNAM, pp. 11-16.
- Méndez, R. Movilidad de Zn, Pb, Fe, Cd y As en el río Taxco en Guerrero, México. Tesis de doctorado, UNAM 2017, pp. 11-16.
- Mendoza, A., Armienta, M., Ayora, C. & Ramírez, A. (2006). Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas* vol.23 núm.1, pp. 75-76.
- Mohammad A., Radzinski, R. & Ghareman, A. (2017). Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic. *Hidrometalurgia*. Vol.174. pp 258-261.
- Monroy, C. & Calvillo, U. Breve historia de los Estados de la República Mexicana/San Luis Potosí. [En línea] Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/estados/libros/sanluis/html/sec_41 (Último acceso 30 de Abril de 2018).

- Montejo, R. & Aguiñaga. El real de minas de la Purísima Concepción de los Catorce, S.L.P. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, pp. 29-35.
- Moreno E., Gamarra, R., Carpena, R., Millan, R., Peñalosa, J. & Esteban, E. (2006). Mercury bioaccumulation and phytotoxicity in two wild plant species of Almaden area. *Chemosphere*. Vol. 63), pp.1969-1971.
- Moreno, R., Monroy, M. & Castañeda, P. (2009). Evaluación Geoquímica de residuos mineros (jales o colas) de mineralización de tipo epitermal, Hidalgo, México. *Revista Geológica de América Central*, Vol. 41, pp 79-81.
- Moreno, T., Barbanson, L. & Cereño, A. (2009). Neoformación mineralógica en residuos minero (jales) del distrito minero Zimapán estado de Hidalgo, México. *Revista Minería y Geología*, Vol.25 núm.9, p. 3.
- Morton, B. (2015). Anthropogenic impact of the use of Hg in mining activities in Cedral SLP Mexico. *Environmetal Earth Sciences*, Vol.74, pp. 1161-1168.
- Morton, B. (2014). Metal accumulation by plant species growing on a mine contaminated site in Mexico. *Environmetal Earth Sciences*, Vol. 71, pp. 5207-52013
- Multani, R., Feldmann, T. & Demopoulos, G. (2016). Antimony in the metallurgical industry: A review of its chemistry and environmental stabilization options. *Hydrometallurgy*. Vol. 164.pp.141-145.
- Norma Oficial Mexica NOM-157-SEMARNAT-2009. Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
- Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperacion de presas de jales.
- Organización Mundial de la Salud. Arsénico. [En línea] Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/> (Último acceso 1 de Abril de 2018).
- Organización Mundial de la Salud. El mercurio y la salud. [En línea] Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/> (Último acceso 31 de Marzo de 2018).

- Organización Mundial de la Salud. Intoxicación por plomo y salud. [En línea] Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>(Último acceso 31 de Marzo de 2018).
- Parienyatwa, S., Escudero, L., Sánchez, S., Hara, Y. & Jha A. (2016). Comparative study of alkali roasting and leaching of chromite ores and titaniferous minerals. *Hydrometallurgy*. Vol. 165, pp. 213-125.
- Pérez, C. Martínez, M., Martínez, S. & Hernández, M. (2011). Antimony distribution in soils and plants near an abandoned mining site. *Microchemical Journal*. Vol. 97 pp. 52-55.
- Pérez, G. & Azcona, C. (2012). Los efectos del cadmio en la salud, *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, Vol. 17, núm.3, pp. 199-2001.
- Pérez, R. (2016). Identificación de fuentes y rutas de exposición en sitios contaminados por plomo, usando métodos isotópicos. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, pp 74-83.
- Prieto, M., González, R., Román, G. & Prieto, G. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, pp.29-31.
- Pyo, S., Tafesse, M., Kim, B. & Kim, H. (2017). Effects of quartz-based mine tailings on characteristics and leaching behavior of ultra- high performance concrete. *Construction and building materials*, pp 111-112.
- Ramos Gómez, M., Avelar, J., Mendel, R., Yamamoto, L., Godínez, L. Ramírez. & Rodríguez, F. (2012). Movilidad de metales en jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, México. *Revista internacional de contaminación ambiental* Vol.28 núm.1, pp. 50-51.
- Ramos, A. & Desiréé, S. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista de ciencias geológicas*, Vol.23 núm.1, pp 55-57.
- Ramos, V. (2017). Evaluación de procesos de oxidación reducción y movilidad de metales y metaloides en jales mineros de Xichú, Guanajuato: Experimentos de lixiviación en columna, Tesis de maestría, UNAM.
- Rangel, C., Sánchez, I. & Vega, M. (2015). Caracterización y recuperación de sales de cromo hexavalente de una pasivo ambiental. *Rev. Int. Contam. Ambie.* , pp. 428-430.

- Reyes, Y., Vergara I. & Torres, O. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y desarrollo*, Vol. 16, núm.2, pp. 67-69.
- Rodríguez, M., Martínez, N., Romero, M. & Sandalio, L. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente* Vol.17, núm. 3pp. 139-142.
- Rodríguez, R. (2016). Identificación de fuentes y rutas de exposición en sitios contaminados por plomo, usando métodos isotópicos. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, pp. 74-83.
- Romero, M., Armienta, A. & Gutiérrez, R. (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*, pp.44-45.
- Romero, M., Armienta, A. & Gutiérrez, R. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Rev.Int. Contam. Ambient*, pp.45-46.
- Salas, M. (2014). Geoquímica y mineralogía de jales en mina Aurora, Xichú, Guanajuato. Tesis de maestría, UNAM.
- Santos, J., Coria, J., Huezco, J. & Rodríguez, G. (2013). Influencia de jales mineros sobre el río Maconí, Querétaro, y evaluación del proceso de atenuación natural por dispersión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 65, Núm.3, pp. 646-647.
- Santos, M., C. (2006). Determinación de la peligrosidad de jales minero con base en la normatividad ambiental mexicana y su efecto potencial en el ambiente, Tesis de licenciatura, UNAM, pp.16-26.
- Servicio Geológico de México (SGM) (2016). *Panorama Minero Del Estado de Guanajuato*, pp. 1-7.
- Servicio Geológico de México (SGM) (2016). *Panorama Minero Del Estado de San Luis Potosí*, pp. 1-6.
- Servicio Metrológico Nacional (SMN) (2010). *Cedral, San Luis Potosí, periodo 1981-2010*. [En línea] Disponible en:
<http://smn.cna.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales8110/NORMAL24007.TXT>
(Último acceso 5 de Mayo de 2018).

- Shahid, M., Shamsad, S., Rafiq, M., Khaid, S., Bibi, I., Khan, N., Dumat, C. & Rashid M. (2017). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere*. Vol. 178 pp.513-524.
- Spitz, K. & Trudinger, J. (2008). *Mining and the Environment from ore to metal*, pp. 720-727: CRC Press.
- Subba, D. (2011). *Mineral Benefication*. pp. 130-134: CRC Prees.
- Talavera, O., Armienta, A., Garcia, A. & Flores, M. (2006). Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, southern Mexico. *Rev. Environmental Geochemistry and Health*, Vol. 28, pp. 243-255.
- Tejero, J., Garrido, I., Mata, F. & Rubio. (2014). La metalurgia del mercurio en Almadén: desde los hornos de aludeles a los hornos Pacific. *Revista metalúrgica*, Vol. 50, Núm. 4, pp 34-36.
- Tovar M., Téllez J. & Monroy, M. (2012). Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Rev. Int. Contam. Ambient* Vol.28, pp. 204-205.
- Tripathi, N., Choppala, G. & Singh, R. (2016). Evaluation of modified chitosan for remediation of zinc contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, pp, 180-182.
- Valderrama, Z. (2015). *Desulfuración de relave mediante la flotación de sulfuros de hierro*. Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama.
- Vargas. J. (2016). *Determinación de mercurio en material vegetal: comparación de una zona urbana con una zona minera*. Tesis de licenciatura, UNAM, pp. 1-5.
- Vázquez, C. (2003). *Análisis de sistemas de polímeros por Fluorescencia de Rayos X con geometría de reflexión total*. Tesis de doctorado, Universidad de Buenos Aires, pp.3-5.
- Wills, B. (1987). *Tratamiento de menas y recuperación de minerales*. pp. 170-175,280-284: Limusa.
- Yan, Z., Ming, M., Wang, J., Can, C. & Huai, C. (2018). Blood mercury concentration, fish consumption and anthropometry in Chinese children: A national study. *Environment Internation*. Vol. 110, pp. 14-15.

Anexo I

Las pruebas estadísticas se realizaron por medio del paquete estadístico Statgraphics Centurion XVI, el principio se describe a continuación.

1.1 Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Muchas pruebas paramétricas requieren que las variables se distribuyan de forma normal. La prueba de Kolmogorov-Smirnov se puede utilizar para comprobar que una variable se distribuye normalmente.

Tabla 1.1 Valores de la prueba Kolmogorov-Smirnov para la hacienda El Caballo y Jesús María

Valor P	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Sb	Ag	Ba	Sr
El Caballo	0.456	0.496	0.745	0.784	0.875	0.582	0.549	0.060	0.146
Jesús María	0.420	0.482	0.402	0.884	0.229	0.704	0.687	0.726	0.615

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

1.2 Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente.

Tabla 1.2 Valores críticos de Pearson para una prueba unilateral, grados de libertad (N-2)

N-2	0.05	0.025	0.01	0.005
1	0.988	0.97	0.9995	0.9999
2	0.9	0.95	0.98	0.99
3	0.805	0.878	0.934	0.959
4	0.729	0.811	0.882	0.917
5	0.669	0.754	0.833	0.874
6	0.622	0.707	0.789	0.834
7	0.582	0.666	0.75	0.798
8	0.549	0.632	0.716	0.765
9	0.521	0.602	0.685	0.735
10	0.497	0.576	0.658	0.708

De acuerdo con los grados de libertad para un total de 10 muestras con un valor de significancia de $\alpha = 0.05$ el valor crítico para este estudio es de 0.549.

