



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA AMBIENTAL – SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR ARSÉNICO,
PLOMO Y MERCURIO EN LA ZONA DE PRESA DE JALES DE MINA
LA PRIETA EN HIDALGO DEL PARRAL, CHIHUAHUA.

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

PRESENTA:
I.Q. LUIS ADRIÁN BARRAZA TORRES

TUTOR PRINCIPAL
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR
DRA. IRMA CRUZ GAVILÁN GARCÍA, FACULTAD DE QUÍMICA
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

México, D.F., Octubre de 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ

SECRETARIO: DR. FRANCISCO MARTÍN ROMERO

VOCAL: DR. CARLOS A. LUCHO CONSTANTINO

1 ER. SUPLENTE: DRA. IRMA CRUZ GAVILÁN GARCÍA

2 D O. SUPLENTE: DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

LUGAR O LUGARES DONDE SE REALIZÓ LA TESIS: Facultad de Ingeniería UNAM, Facultad de Química UNAM, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa UPC y en Hidalgo del Parral, Chihuahua.

TUTOR DE TESIS:

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

FIRMA

*Dedico esta tesis a la persona cuya ayuda ha sido fundamental,
dado que has estado conmigo incluso en los momentos más difíciles.*

*Este momento de nuestras vidas no fue fácil, pero estuviste
motivándome y ayudándome hasta donde tus alcances lo permitían.*

Te lo agradezco infinitamente, amor.

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a mi madre y mis hermanos, así como a mis cuñados, por apoyarme en esta travesía, yo sé que no es lo que quieren para mí pero agradezco que no me corten las alas para seguir volando, gracias.

A mis amigos Abril, Elva, Isabel, Karen, Alicia, Jessica, Héctor, Eduardo, Joseph y Simón; por permanecer a mi lado aún con la distancia que nos separa, gracias, porque su apoyo es crucial para seguir cumpliendo mis sueños, gracias por ser esa familia que la vida me tenía preparada.

A mis nuevos amigos, Daniela, Cristina, Jairo, Bernardo y Víctor, gracias por formar parte de este proceso de principio a fin, por darme la oportunidad de conocerlos y conocerme, por compartir las frustraciones y agonías de los proyectos de investigación, pero más por las alegrías y bellos recuerdos que forjé a su lado.

Un agradecimiento especial a la Dra. Georgina Fernández Villagómez, gracias por su apoyo, ayuda y motivación incondicional cuando más lo necesite al principio del Posgrado, gracias a usted se realizó esta tesis. Gracias por los consejos técnicos, académicos y sobre todo personales, los cuales en conjunto me hicieron madurar y ver la vida diferente.

Al Dr. Enrique César, por enseñarme que todavía existe gente comprometida con la justicia, la educación y la investigación. Gracias por la confianza depositada en mí y por la que usted me otorgó, por la honestidad y los consejos y pláticas que sostuvimos.

A la Dra. Irma Gavilán, por esa energía, por ese compromiso y esa dedicación hacia la investigación, los cuales influyeron en mí para culminar esta maestría, por ese voto de confianza para difundir el tema y no solo conformarse con un trabajo más.

A los doctores Carlos Lucho y Francisco Romero, aunque el tiempo que convivimos con el proyecto fue poco, sus sabios consejos, su gran interés por el tema y su ayuda inmediata hicieron que creciera una confianza hacia ustedes y este trabajo estuviera mejor complementado.

Un cariñoso agradecimiento a Pura Alfonso y Abigail Jiménez, por recibirme con los brazos abiertos en tierras españolas durante mi corta estancia, ya que además de lo académico y la complementación de la tesis, me hicieron sentir como en casa.

A mis compañeros de piso, Alejandra, Aldo, Abel y Alejandra, porque aunque con algunos conviví poco, nos peleamos y gritamos, me enseñaron que no somos perfectos, y que aunque tenemos puntos de vista diferentes, siempre estuvieron presentes mostrándome su apoyo y dándome consejos cuando los necesité. Gracias.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Simón González, ya que mostró un panorama muy distinto al que estaba acostumbrado y me hizo darme cuenta que estaba en la línea de investigación equivocada, gracias por abrirme los ojos y no dejarme dar por vencido con mis metas personales.

Gracias al Posgrado de Ingeniería de la UNAM por abrirme sus puertas y dejarme culminar una meta más de mi vida, un pequeño escalón más en mi crecimiento profesional, gracias por dejarme conocer gente estupenda y comprometida con el cuidado del medio ambiente tanto en México como a nivel mundial.

A Presidencia Municipal de Hidalgo del Parral, Chihuahua, en especial al alcalde el Ing. Miguel Jurado Contreras y al Lic. Samuel Martínez, por su apoyo incondicional y su interés por resolver el problema ambiental que se estudió, gracias por las facilidades otorgadas y por la confianza para realizar esta investigación en pro de un cambio en Parral.

Y por último, gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada para realizar estos estudios, así como de la beca mixta otorgada para realizar la estancia académica en España.



ÍNDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 8 |
| 1.1.1 | <i>Objetivo general</i> | 8 |
| 1.1.2 | <i>Objetivos específicos</i> | 8 |
| 1.2 | ALCANCES Y LIMITACIONES | 8 |
| 2 | HISTORIA DE LA MINERÍA EN LA REGIÓN SUR DE CHIHUAHUA..... | 9 |
| 2.1 | PERIODO PREHISPÁNICO | 9 |
| 2.2 | PERIODO COLONIAL DEL SIGLO XVI | 9 |
| 2.3 | PERIODO COLONIAL DEL SIGLO XVII | 10 |
| 2.4 | PERIODO COLONIAL DEL SIGLO XVIII..... | 11 |
| 2.5 | PERIODO DE INDEPENDENCIA Y REFORMA..... | 12 |
| 2.6 | PERIODO DE INVERSIONES EXTRANJERAS..... | 12 |
| 2.7 | PERIODO DE LA ÉPOCA MODERNA..... | 13 |
| 3 | CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MEDIO NATURAL Y SOCIOECONÓMICO | 14 |
| 3.1 | UBICACIÓN GEOGRÁFICA | 14 |
| 3.2 | CLIMA | 15 |
| 3.3 | GEOLOGÍA..... | 17 |
| 3.4 | EDAFOLOGÍA | 18 |
| 3.5 | DEMOGRAFÍA | 19 |
| 3.6 | AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS | 20 |
| 4 | CONTAMINACIÓN DEL SUELO | 22 |
| 4.1 | LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR METALES Y METALOIDES | 23 |
| 4.2 | IMPACTO DE LOS METALES PESADOS EN EL SUELO | 25 |
| 4.3 | IMPACTO DEL ARSÉNICO, MERCURIO Y PLOMO EN LA SALUD | 26 |
| 4.3.1 | <i>Arsénico</i> | 26 |
| 4.3.2 | <i>Mercurio</i> | 27 |
| 4.3.3 | <i>Plomo</i> | 27 |
| 4.4 | LEGISLACIÓN MEXICANA | 28 |
| 5 | METODOLOGÍA | 32 |
| 6 | MATERIALES Y MÉTODOS | 34 |
| 6.1 | PLAN DE MUESTREO..... | 34 |
| 6.2 | TRABAJO DE CAMPO | 40 |



| | | |
|-----------|--|-----------|
| 7 | RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN | 44 |
| 7.1 | TRABAJO DE CAMPO | 44 |
| 7.2 | ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO | 54 |
| 7.3 | TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS | 56 |
| 7.4 | ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA PARA EL PLOMO | 59 |
| 7.5 | ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA PARA EL ARSÉNICO | 63 |
| 7.6 | ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA PARA EL MERCURIO | 67 |
| 7.7 | GRANULOMETRÍA | 68 |
| 7.8 | DIFRACCIÓN DE RAYOS X | 80 |
| 7.9 | FLUORESCENCIA DE RAYOS X | 82 |
| 7.10 | pH EN PASTA | 85 |
| 8 | MEDIDAS DE MITIGACIÓN | 87 |
| 9 | CONCLUSIONES | 89 |
| 10 | REFERENCIAS | 91 |
| | ANEXO 1 | 94 |
| | ANEXO 2 | 95 |
| | ANEXO 3 | 96 |
| | ANEXO 4 | 98 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1. Ubicación geográfica de Hidalgo del Parral, Chihuahua (INEGI, 2009). | 15 |
| Figura 3.2. Crecimiento demográfico de la zona de estudio (INEGI, 2010). | 20 |
| Figura 5.1. Diagrama de flujo de la metodología a empleada en el trabajo. | 33 |
| Figura 6.1. Delimitación del área del muestreo preliminar en Hidalgo del Parral, Chihuahua. | 37 |
| Figura 6.2. Ubicación de los puntos de intersección determinados por la ecuación 6.1 en Hidalgo del Parral, Chihuahua. | 38 |
| Figura 6.3. Ubicación del cuadrículado secundario en Hidalgo del Parral, Chihuahua. | 39 |
| Figura 6.4. Datos geo-referenciados del muestreo teórico en Hidalgo del Parral. | 39 |
| Figura 6.5. Puntos de muestreo enumerados para la recopilación de muestras. | 40 |
| Figura 6.6. Jales en la zona de estudio; a) Jales “Rojos”, b) Jales “Blancos”, c) Jales “Nuevos”. | 42 |
| Figura 6.7. Proceso general del muestreo en Hidalgo del Parral. | 43 |
| Figura 7.1. Humedad relativa en los puntos de muestreo. | 46 |
| Figura 7.2. Velocidad del viento en los puntos de muestreo. | 48 |
| Figura 7.3. Conductividad eléctrica en los puntos de muestreo. | 49 |
| Figura 7.4. pH en los puntos de muestreo. | 52 |
| Figura 7.5. Temperaturas en los puntos de muestreo. | 54 |
| Figura 7.6. Usos del suelo en el interior y exterior de la zona de estudio. | 56 |
| Figura 7.7. Proceso general para la absorción atómica en las muestras recolectadas. | 57 |
| Figura 7.8. Proceso general para las técnicas analíticas efectuadas los laboratorios de la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de Barcelona. | 58 |
| Figura 7.9. Puntos de muestreo en suelo con concentraciones mayores a 400 ppm de plomo (rojo). | 60 |
| Figura 7.10. Vista general de las concentraciones de plomo de los puntos de muestreo en la zona de estudio (SURFER). | 62 |
| Figura 7.11. Puntos de muestreo en suelo con concentraciones mayores a 22 ppm de arsénico (rojo). | 64 |
| Figura 7.12. Vista general de las concentraciones de arsénico de los puntos de muestreo en la zona de estudio (SURFER). | 66 |
| Figura 7.13. Puntos de muestreo seleccionados para la granulometría. | 68 |
| Figura 7.14. Histograma de la granulometría del punto HP1. | 69 |
| Figura 7.15. Histograma de la granulometría del punto HP2. | 70 |
| Figura 7.16. Histograma de la granulometría del punto HP3. | 72 |
| Figura 7.17. Histograma de la granulometría del punto HP4. | 73 |
| Figura 7.18. Histograma de la granulometría del punto HP5. | 74 |
| Figura 7.19. Histograma de la granulometría del punto HP7. | 75 |



| | |
|---|----|
| Figura 7.20. Histograma de la granulometría del punto HP8. | 77 |
| Figura 7.21. Histograma de la granulometría del punto HP16. | 78 |
| Figura 7.22. Histograma de la granulometría del punto HP17. | 79 |
| Figura 7.23. Correlación entre el arsénico y el zinc. | 84 |
| Figura 7.24. Correlación entre el plomo y el zinc. | 85 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1. Censo poblacional de la Nueva Vizcaya en el año 1788..... | 12 |
| Tabla 3.1. Comparación de los diferentes tipos de climas existentes en la zona de estudio. | 16 |
| Tabla 3.2. Periodos geológicos en la zona de estudio. | 17 |
| Tabla 3.3. Tipos de rocas en la zona de estudio. | 18 |
| Tabla 3.4. Tipos de suelo existentes en la zona de estudio. | 18 |
| Tabla 3.5. Hidrografía en la zona de estudio. | 21 |
| Tabla 4.1. Etapas principales de la actividad minera..... | 24 |
| Tabla 6.1. Ordenamiento de los puntos de muestreo..... | 41 |
| Tabla 7.1. Humedad relativa en los puntos de muestreo. | 45 |
| Tabla 7.2. Velocidad del viento en los puntos de muestreo..... | 47 |
| Tabla 7.3. Conductividad eléctrica en los puntos de muestreo. | 49 |
| Tabla 7.4. pH en los puntos de muestreo. | 50 |
| Tabla 7.5. Clasificación del pH. | 51 |
| Tabla 7.6. Temperaturas en los puntos de muestreo..... | 53 |
| Tabla 7.7. Concentraciones de plomo en las muestras recolectadas. | 59 |
| Tabla 7.8. Concentraciones totales de plomo en distintas minas de México..... | 61 |
| Tabla 7.9. Concentraciones de arsénico en las muestras recolectadas. | 63 |
| Tabla 7.10. Concentraciones totales de arsénico en distintas minas de México. | 65 |
| Tabla 7.11. Concentraciones de plomo en las muestras recolectadas. | 67 |
| Tabla 7.12. Modas de las partículas de la muestra HP1. | 70 |
| Tabla 7.13. Modas de las partículas de la muestra HP2. | 71 |
| Tabla 7.14. Modas de las partículas de la muestra HP2. | 72 |
| Tabla 7.15. Modas de las partículas de la muestra HP4. | 73 |
| Tabla 7.16. Modas de las partículas de la muestra HP5. | 75 |
| Tabla 7.17. Modas de las partículas de la muestra HP7. | 76 |
| Tabla 7.18. Modas de las partículas de la muestra HP8. | 77 |
| Tabla 7.19. Modas de las partículas de la muestra HP16. | 78 |
| Tabla 7.20. Modas de las partículas de la muestra HP17. | 80 |
| Tabla 7.21. Caracterización mineralógica de las muestras seleccionadas. | 81 |
| Tabla 7.22. Comparación de los resultados obtenidos en EAA vs XRF para arsénico..... | 82 |
| Tabla 7.23. Comparación de los resultados obtenidos en EAA vs XRF para plomo..... | 83 |
| Tabla 7.24. Datos estadísticos descriptivos de la concentración total de los EPT. | 84 |
| Tabla 7.25. Valores de pH en pasta de los jales. | 86 |



1 INTRODUCCIÓN

El contenido natural de metales pesados en suelo no representa amenaza para la flora, la fauna o el hombre. Sin embargo, en algunas zonas al desarrollarse un auge minero, los residuos denominados “jales” generados durante el proceso han sido tradicionalmente depositados en el suelo, en estos residuos el contenido de metales ha provocado su acumulación en los primeros horizontes del suelo, poniendo en riesgo la movilización de los mismos. La extracción minera en el área de estudio del presente informe de investigación data del año 1600, desde entonces se han provocado impactos severos al medio ambiente, entre ellos la afectación de suelos causándoles alteraciones físicas, químicas y biológicas para el crecimiento de vegetación y sus consecuentes riesgos a la salud de la población. Es necesario reconocer que la actividad minera genera diferentes contaminantes que de una u otra forma llegan al suelo, agua y aire (Puga *et.al.*, 2006; Bartkowiak *et.al.*, 2013).

Los metales acumulados en la superficie del suelo se reducen lentamente mediante la lixiviación, la absorción por las plantas y la erosión, procesos mediante los cuales se puede propiciar la contaminación de acuíferos, riesgo a la salud humana al consumir alimentos contaminados y afectación a la calidad del aire por la presencia de los metales pesados desprendidos del sitio por arrastre eólico y aerotransportados a diferentes puntos fuera del sitio de acumulación original, lo que puede sobredimensionar el impacto al tener una mayor área de influencia. En el municipio de Hidalgo del Parral, Chihuahua, y sus alrededores la minería fue la más importante actividad económica (durante alrededor de 300 años), desde la fundación de la Ciudad de Santa Bárbara, localidad del municipio que colinda con Hidalgo del Parral. Como resultado de esta actividad a lo largo de muchos años en la región, se acumularon importantes cantidades de jales propios del proceso, con alto contenido de metales pesados. Los residuos mineros, o jales, son altamente tóxicos para los organismos y son inhibidores del crecimiento de las plantas y el desarrollo de la vida en general (Vargas y Barraza, 2010).



Los metales y minerales empleados por los indígenas fueron extraídos en explotaciones mineras artesanales, lo que implica un conocimiento mínimo adquirido a prueba y error, cuyas técnicas se les niegan y se pretende que les llegaron de Europa (Muñoz, 1986). La extracción de los metales pesados en la época de la Colonia la llevaban a cabo los indígenas y su tratamiento consistía en fundir la piedra para recolectar el metal precioso, por lo que los residuos generados de esta actividad se fueron depositando a lo largo del tiempo que duró este tipo de actividad. La industria minera progresó haciéndose más eficiente la obtención de metales preciosos, por lo que los residuos de antaño quedaron atrapados en el fondo de las presas de jales. Las características del suelo juegan un papel fundamental en la disminución o reducción de la toxicidad de los metales que se encuentran acumulados en la superficie así como su distribución en los perfiles del suelo (Puga *et.al.*, 2006).

La remediación de suelos contaminados con metales pesados y metaloides es en particular importante debido a que son tóxicos, persistentes y bioacumulables éstos en el ambiente por lo que el presente estudio se enfocó a determinar la concentración de metales pesados (mercurio y plomo) y metaloide (arsénico) que están depositados en los jales generados hace más de 300 años y en el suelo adyacente con el propósito de determinar si su concentración es perjudicial para las comunidades adyacentes.



1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Evaluar la contaminación del suelo por metales pesados y metaloides en la zona de Hidalgo del Parral, Chihuahua, a partir de un muestreo exploratorio.

1.1.2 Objetivos específicos

- Diseñar el muestreo de residuos mineros en la zona de la presa de jales de mina La Prieta en Hidalgo del Parral, Chihuahua, tomando en cuenta la norma mexicana para suelos NMX-AA-132-SCFI-2006.
- Ejecutar el muestreo en la zona, considerando su historial de contaminación.
- Realizar el análisis de las muestras mediante técnicas instrumentales.
- Proponer medidas para la reducción de peligro, dependiendo de la concentración de metales pesados y metaloides presentes en las muestras analizadas de las zonas estudiadas.

1.2 Alcances y limitaciones

- Las muestras recolectadas tuvieron un peso aproximado de 300 gramos y fueron tomadas a 30 centímetros de la superficie, en un área aproximada de 158.43 ha.
- El análisis se realizó utilizando las técnicas de espectrofotometría de absorción atómica, difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X.
- Se cuantificó el contenido de los elementos arsénico, plomo y mercurio, como aquellos contaminantes del suelo de acuerdo con la normatividad mexicana.



2 HISTORIA DE LA MINERÍA EN LA REGIÓN SUR DE CHIHUAHUA

El estado de Chihuahua nace de las exploraciones realizadas por los españoles en la época de la conquista atraídos por la gran cantidad de metales preciosos que se encontraban en la Nueva España, la recopilación de datos históricos de acuerdo a COREMI (1994) y Márquez (1995) se resume a continuación considerando las épocas donde la minería estuvo presente en la región sur del estado de Chihuahua.

2.1 Periodo Prehispánico

El territorio de Chihuahua, estuvo habitado por numerosos grupos de nativos que contaban con un bagaje cultural muy primitivo, estos grupos se subdividían en nómadas y subnómadas, pero todos ellos insumisos ante una autoridad. La mayoría desaparecieron por el mestizaje durante la dominación española. Entre los restos arqueológicos de una de las zonas con una mayor jerarquía cultural, Paquimé, se encuentran entre otros minerales, artesanías trabajadas con obsidiana, cobre nativo, hierro y manganeso, que se encuentran presentes en yacimientos no muy lejos de la zona de Paquimé. Estos hallazgos son los únicos indicios de protominería autóctona dentro de la entidad.

2.2 Periodo Colonial del siglo XVI

Cuando da inicio la colonización de la Nueva España, siglo XVI, surgió la leyenda de Nuevo México “El Fénix de los conquistadores”, donde se hablaba de siete ciudades cuya riqueza era extraordinaria, esto dio pie a aventurarse hacia el norte; después de varios intentos fallidos por encontrar estas siete ciudades, en 1546 se descubrió la mina de Zacatecas, desde donde se organizaron las siguientes expediciones. En 1554, Francisco de Ibarra, encabezó un grupo explorador hacia el norte, después de varios años, en 1562, se estableció en lo que hoy es la sierra de Durango, el virrey premió a Ibarra con su ascenso a Capitán por este hallazgo,



y la capitulación para que fundara y gobernara una nueva provincia a la que puso por nombre Nueva Vizcaya. Ibarra prosiguió su búsqueda hacia el norte, y fue entonces cuando llegaron a lo que hoy es el territorio de Chihuahua; en el año de 1567 comisionó al Capitán Rodrigo del Río de Losa para repoblar el mineral de Indehé y poblar el Valle de los Conchos, a finales de ese año, los soldados que remontaron por la plateada hebra del río del Valle de San Bartolomé llegaron hasta el verde dosel de la sierra y trajeron buenas nuevas, después de tentaduras hallaron paninos de metales, a lo cual él abrió minas cerca del valle fundando el Real de Santa Bárbara o Santa Bárbola, como lo decían los soldados españoles, el 4 de diciembre. La villa de Santa Bárbara, sin llegar a ser opulenta atrae a colonos que combinan la minería con la agricultura y la ganadería, todo apoyado por la caza de esclavos que servían para trabajar en las minas; el avance de la minería en Santa Bárbara fue lento, siempre sujeto al crecimiento paulatino de los colonos.

2.3 Periodo Colonial del siglo XVII

Durante los últimos años del siglo XVI y principios del siglo XVII, el grupo original de pobladores se encuentra muy arraigado y acuden cada vez nuevos colonos españoles, se despueblan Reales o bien se abandonan tierras que son atacadas constantemente por los nativos y se abren otras que no están demasiado expuestas a estos peligros. Así las cosas, fue un día del mes de julio de 1631 cuando Juan Rangel de Biezma, posiblemente vecinado en la cercana hacienda de su cuñado Bartolomé de Urbaneja, descubre una veta virgen entre los relices de un cerrillo a la que puso “La Prieta” dado que al estar humedecida la roca de plata su color es negro; informando de inmediato ante el justicia mayor de Santa Bárbara el Capitán Juan Esguerra de Rosas, mismo que dio informe al nuevo gobernador de la Nueva Vizcaya Gonzalo Gómez de Cervantes Casaús, ante el nuevo descubrimiento de estas minas se da inicio al primer auge del Real de Minas de San José del Parral, que fue el más importante centro minero de la provincia durante el siglo XVII, y que rivalizó en prestigio con la famosa Zacatecas; el Real se consolida en pocos años y se transforma en la población más floreciente de Nueva Vizcaya, además fue la sede permanente de su gobierno por un siglo y de hecho



capital de la provincia. La actividad minera se acelera en todo el territorio del actual estado de Chihuahua, internándose en las profundidades de la Sierra Tarahumara. Unos años después del descubrimiento de las minas en Parral, a mediados del siglo XVII por el año de 1658, Francisco Molina, minero de Parral, registró ante el alcalde mayor del Real de Minas de San José del Parral, una mina a la que puso por nombre San Francisco del Oro, misma que resultó ser abundante en metales ricos de plata y que dio origen a una bonanza tan prometedora que se optó por dotar al nuevo yacimiento de su propio ayuntamiento y separar al mineral del de Santa Bárbara que pasaba por un periodo de decadencia.

2.4 Periodo Colonial del siglo XVIII

Este nuevo siglo, presenta a una Santa Bárbara distinta en que la minería ha cedido terreno muy amplio a las actividades agropecuarias de sus pobladores, así como a la elaboración de carbón y venta de leña, aquí la población se parece más al Valle de Bartolomé que al de su gemela Parral. En semejanza, el Real de Minas del Parral, empezó una década de decadencia, la llegada del brigadier don Pedro de Rivera a Parral en 1726 por mandato del virrey Marqués de Casafuerte, sirvió para confirmar que durante cuatro años Parral entró en franca decadencia, por el año de 1726; para 1750, cesó la bonanza en las minas de Santa Eulalia (cerca de lo que hoy es la capital de Chihuahua) y simultáneamente se descubren nuevas vetas en la zona de Parral junto a una mejor provisión de azogue y cese de las hostilidades de los indios provocando un resurgimiento de la población; para 1767 Parral había cambiado de fisonomía sin dejar de ser Real de Minas, se había convertido en un centro comercial al que convergían rutas que llevaban a Sinaloa, Sonora y Nuevo México. Durante 1788 se levantó un censo de la provincia de Nueva Vizcaya que registró la cantidad total de 124 000 habitantes correspondientes a las cifras de los centros mineros de más arraigo, que se muestran en la Tabla 2.1.



Tabla 2.1. Censo poblacional de la Nueva Vizcaya en el año 1788.

| Centro Minero | Población (habitantes) |
|----------------------|-------------------------------|
| Chihuahua | 10 752 |
| Parral | 5 193 |
| Santa Bárbara | 1 186 |
| Cusihuirachi | 10 752 |
| Batopilas | 7 874 |

Fuente: COREMI, 1994

2.5 Periodo de Independencia y Reforma

El final del dominio de España dejó un vacío enorme de poder que provocó inestabilidad política por largos años en el país. En 1828, el gobierno expulsó a todos los españoles del país dejando a la minería descapitalizada, sin empresarios de larga experiencia y con espíritu de riesgo. En 1832, Parral al igual que en todo el estado, sufrió la invasión de los apaches dejando varios muertos y una baja en la producción minera, después de este golpe, sobrevino la invasión norteamericana; los conflictos de la guerra de Reforma también tuvieron eco en Parral, sobre todo en 1859, donde se vivió una feroz batalla en el Valle de Allende, generando muertes en la población chihuahuense; por último en 1866 llegó al estado la invasión francesa. El fin de siglo, presenta una panorámica más satisfactoria de Parral, referente a la minería, para 1880 hay reportadas 400 minas que fueron trabajadas durante toda la historia del mineral y habían producido hasta 60 millones de pesos.

2.6 Periodo de Inversiones Extranjeras

Durante la década de 1880, Chihuahua tiene grandes cambios; la amenaza apache que estaba sufriendo desaparece y la tranquilidad queda restablecida. En 1884, se concluyó el Ferrocarril Central Mexicano, que intercomunica el sur del país con el norte y a su vez con el país vecino, Estados Unidos, este país requiere además de metales preciosos, grandes cantidades, y los más beneficiados son Chihuahua y Sonora. Para 1907 la crisis pega en el país, por lo que varias compañías mineras cierran definitivamente. Para 1908 la Familia Guggenheim, que tenía negocios en Santa Eulalia y Sierra Mojada, cerca de lo que hoy es Chihuahua, expandió sus operaciones a Parral.



2.7 Periodo de la época moderna

Chihuahua fue durante el siglo XIX, el estado minero por excelencia, destacando el primer lugar principalmente en la obtención de plata hasta los años ochenta, y parte de esta distinción fue la zona minera de Parral, que comprende a Parral-Minas Nuevas, Santa Bárbara y San Francisco del Oro. Para el año de 1920, la flotación selectiva alcanzó el suficiente grado de perfeccionamiento y se inició el auge de grandes plantas de beneficio, que permitieron la extracción de mineral de bajo costo y con ello un ritmo de beneficio más elevado. En el año de 1944, el Grupo México, entra a la mina de Santa Bárbara, estableciéndose hasta la actualidad; en 1961, ASARCO (perteneciente al Grupo México) compra la Mina La Prieta y en la actualidad tiene parte del terreno a su nombre, lo demás es del municipio. En los años noventa, La Minera Reforma, renta la mina La Prieta para realizar exploraciones y una mala exploración hace que se desgaje el cerro y la mina cierra sus operaciones definitivamente; y en el año de 1982, la compañía Minera Frisco se crea en San Francisco del Oro, teniendo un cese de actividades de los años noventa hasta mediados del año 2010 que se volvieron a realizar nuevas exploraciones y se realizó una expansión de la minera Frisco.



3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MEDIO NATURAL Y SOCIOECONÓMICO

El estudio de una zona con probabilidad de estar contaminada por metales pesados y metaloides, se debe obtener un panorama más completo del medio en el cual se encuentra la fuente de contaminación. La zona de Hidalgo del Parral, como se mencionó anteriormente, es una zona minera desde hace más de 300 años, por lo que la acumulación de los residuos mineros fue en aumento.

Para la evaluación del sitio se requiere conocer sus características generales como son:

- a. Ubicación geográfica.
- b. Clima. Conocer la climatología del lugar ayuda para saber cómo las condiciones ambientales interactúan con el pasivo ambiental.
- c. Geología. Al conocer el tipo de roca en la cual está situada la zona de estudio, se puede si las condiciones geológicas pueden ayudar en la atenuación o magnificación del problema.
- d. Edafología. Las características del tipo de suelo presente en el sitio son de suma importancia, ya que proporcionan información de la posible ruta de contaminación del mismo.
- e. Demografía. Al tener conocimiento de la cantidad de personas que pueden resultar afectadas por la posible contaminación a la que están expuestas, se pueden proponer soluciones para que el daño en un futuro sea el mínimo.
- f. Aguas superficiales y subterráneas. Saber si en el área de estudio se encuentra cerca de una corriente de agua o sobre un pozo de agua, y conocer si existe posible migración de contaminantes hacia el agua.

3.1 Ubicación geográfica

El municipio de Hidalgo del Parral se encuentra al sur del Estado de Chihuahua, entre los paralelos 26°51' y 27°23' de latitud norte; los meridianos 105°23' y 105°59' de longitud



oeste, con una altitud entre 1,300 y 2,400 metros. Colinda al norte con los municipios de Valle de Zaragoza y Allende; al este con el municipio de Allende; al sur con los municipios de Allende, Matamoros, Santa Bárbara y San Francisco del Oro; al oeste con los municipios de San Francisco del Oro, Huejotitán y Valle de Zaragoza. Ocupa el 0.8% de la superficie del estado, Figura 3.1 (INEGI, 2009).

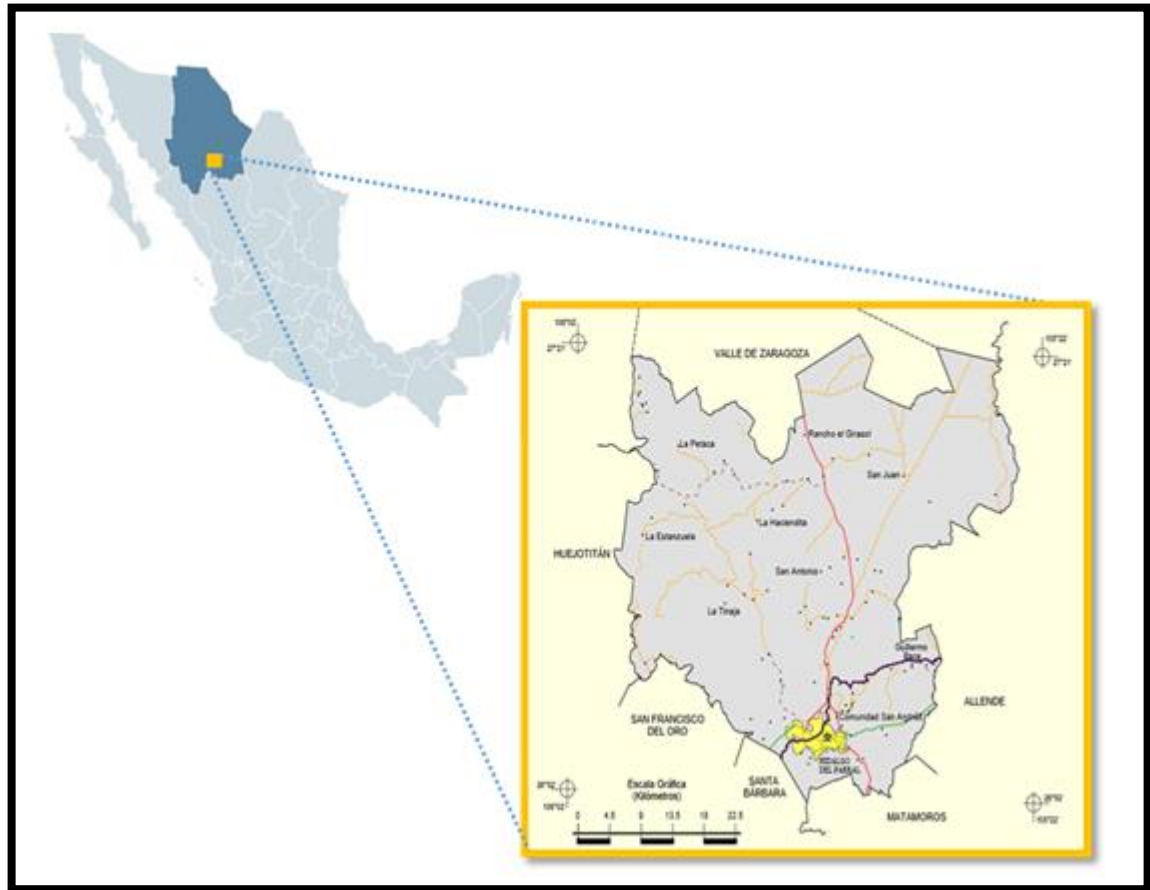


Figura 3.1. Ubicación geográfica de Hidalgo del Parral, Chihuahua (INEGI, 2009).

3.2 Clima

El clima en el municipio de Hidalgo del Parral, comprende varias categorías como se muestra en la Tabla 3.1, donde se muestran los climas existentes en la zona. El clima predominante en el sitio de interés es el denominado Semiseco Templado, los climas secos



se extienden en la mayor parte del norte del país. En estos climas las temperaturas son extremas, durante el día llegan a estar por arriba de los 40 °C y durante la noche puede disminuir por debajo de los 0 °C. Además sus lluvias son tan escasas que se encuentran entre los 300 y 500 mm anuales (CONEVyT, 2014).

Tabla 3.1. Comparación de los diferentes tipos de climas existentes en la zona de estudio.

| PARÁMETRO | VALOR |
|---|--------------|
| Clima (%) | |
| Semiseco Templado | 85.3 |
| Semiseco semicálido | 11.2 |
| Seco semicálido | 3.5 |
| Templado subhúmedo con lluvias en verano | NI |
| Semifrío subhúmedo con lluvias en verano | NI |
| Rango de Temperatura (°C) | 14-20 |
| Precipitación (mm) | 300-600 |

NI= No Información.

Fuente: INEGI, 2009

Durante el año el clima es variante al extremo, ya que alrededor de 6 ó 7 meses se encuentra en la época gélida, por lo que es común que en este tiempo se presenten vientos helados y lleguen a ocurrir nevadas, ya que se encuentra cercano a la Sierra Tarahumara, estos meses incluyen desde noviembre hasta mayo aproximadamente, llegando a temperaturas menores a cero grados Celsius. Los meses restantes se identifican como calurosos, y es cuando las temperaturas suben hasta alcanzar los 40°C o más, en esta época del año se llegan a presentar las llamadas insolaciones, ya que al estar en el clima Semiseco Templado, la región se alcanza a comportar como un desierto, por los meses de junio a agosto, es la temporada de lluvias en la región, en Hidalgo del Parral disminuye un poco este rango de precipitación ya que se encuentra más cercano a la zona desértica del estado de Chihuahua.



3.3 Geología

La información acerca del origen, clasificación y edad de las rocas, indica la existencia de minerales metálicos y no metálicos que se pueden explotar económicamente, por lo que es útil en la exploración minera, petrolera y de aguas subterráneas, ubicación de explotación de minerales y rocas, construcción de obras civiles, planeación, ordenamiento territorial e investigación (INEGI, 2014).

En la Tabla 3.2 se observa que en Hidalgo del Parral el periodo del que datan las rocas del sitio es del Neógeno, perteneciente a la Era Cenozoica, por lo que la roca existente en la zona es de aproximadamente 23 millones de años.

Tabla 3.2. Periodos geológicos en la zona de estudio.

| PERIODO GEOLOGICO | VALOR |
|------------------------------|--------------|
| Terciario | 27.1 % |
| Neogéno | 33.7 % |
| Cuaternario | 6.8 % |
| Cretácico | 30.2 % |
| Paleógeno | 0.9 % |

Fuente: INEGI, 2009

La zona de estudio de Hidalgo del Parral está situada sobre roca ígnea del Terciario y rocas sedimentarias del Cretácico y del Neógeno, en la Tabla 3.3 se observan los diferentes tipos de rocas que comprenden a la sedimentaria e ígnea, presentes en Parral; sobre áreas originalmente ocupadas por suelos denominados Leptosol y Phaeozem (INEGI, 2009).



Tabla 3.3. Tipos de rocas en la zona de estudio.

| TIPO DE ROCAS | PORCENTAJE DEL TERRITORIO |
|-------------------------------|--|
| Sedimentaria | |
| Conglomerado | 28.7 |
| Caliza-lutita | 22.8 |
| Caliza-lutita-arenisca | 7.0 |
| Arenisca-conglomerado | 1.2 |
| Arenisca | 0.4 |
| Ígnea Extrusiva | |
| Riolita-toba ácida | 3.5 |
| Basalto | 3.7 |
| Andesita | 3.0 |

Fuente: INEGI, 2009

3.4 Edafología

En el municipio de Hidalgo del Parral, el suelo predominante es el de tipo Calcisol, pero en el área de estudio el suelo que está presente es el denominado Phaeozem; en la Tabla 3.4, se puede observar los porcentajes de estos distintos tipos de suelo existentes en el área de estudio.

Tabla 3.4. Tipos de suelo existentes en la zona de estudio.

| SUELOS DOMINANTES | PORCENTAJE DEL TERRITORIO |
|------------------------------|--|
| Calcisol | 39.4 |
| Phaeozem | 24.4 |
| Leptosol | 23.5 |
| Vertisol | 4.0 |
| Kastañozem | 2.9 |
| Chemozen | 2.5 |
| Durisol | 1.9 |
| Luvisol | 0.1 |

Fuente: INEGI, 2009

En la Base Mundial de Referencia para los Recursos del Suelo (FAO, 2006) y en el Informe Anual (SEMARNAT, 2008), se describe al suelo tipo Phaeozem (del griego *phaios*,



oscuro y del ruso *zemlja*, tierra) como un suelo de pastizales húmedo, cuyos horizontes son ricos en humus oscuro, este tipo de suelo carece de carbonatos secundarios, tienen un horizonte mólico, es decir, más delgado y a veces menos oscuro) y se presenta con más frecuencia durante un cámbico u horizonte subsuperficial árgico, son suelos porosos, fértiles y por consiguiente excelentes para el cultivo.

De igual forma se describe al Leptosol (del griego *leptos*, delgado) como un suelo muy somero sobre la roca, muy ásperos y/o pedregosos, es un suelo azonal y por lo regular presente en regiones montañosas, algunas de sus características, es que es poco profundo, se encuentran en todas las zonas climáticas y en particular en zonas fuertemente erosionadas, tienen un potencial como recurso de pastoreo y tierras forestales en épocas de lluvia.

3.5 Demografía

La presa de jales de la mina La Prieta está cerca de asentamientos humanos, esto data desde que las minas empezaron su funcionamiento, ya que es común que la población esté cerca del área de trabajo.

De acuerdo con datos del INEGI (2010), cuando fue el último censo de la población en México, en Hidalgo del Parral existía una población de 107,061 habitantes, de los cuales 51,883 son hombres y 55,178 son mujeres, asentados en una extensión territorial de 1,750 kilómetros cuadrados, lo que da una densidad de 61.17 habitantes por kilómetro cuadrado.

En comparación, la población del estado de Chihuahua, tenía una población de 3,406,465 habitantes, de los cuales 1,692,545 son hombres y 1,713,920 son mujeres, asentados en una extensión territorial de 247,455.29 kilómetros cuadrados, dando una densidad de 13.76 habitantes por kilómetro cuadrado.

Como se observa en la Figura 3.2 en Hidalgo del Parral la población ha ido en crecimiento, esto debido principalmente a las nuevas fuentes de empleo que están llegando a



la ciudad, y se corrobora con el crecimiento poblacional que ocurre en el Estado de Chihuahua, que va a la par en crecimiento.

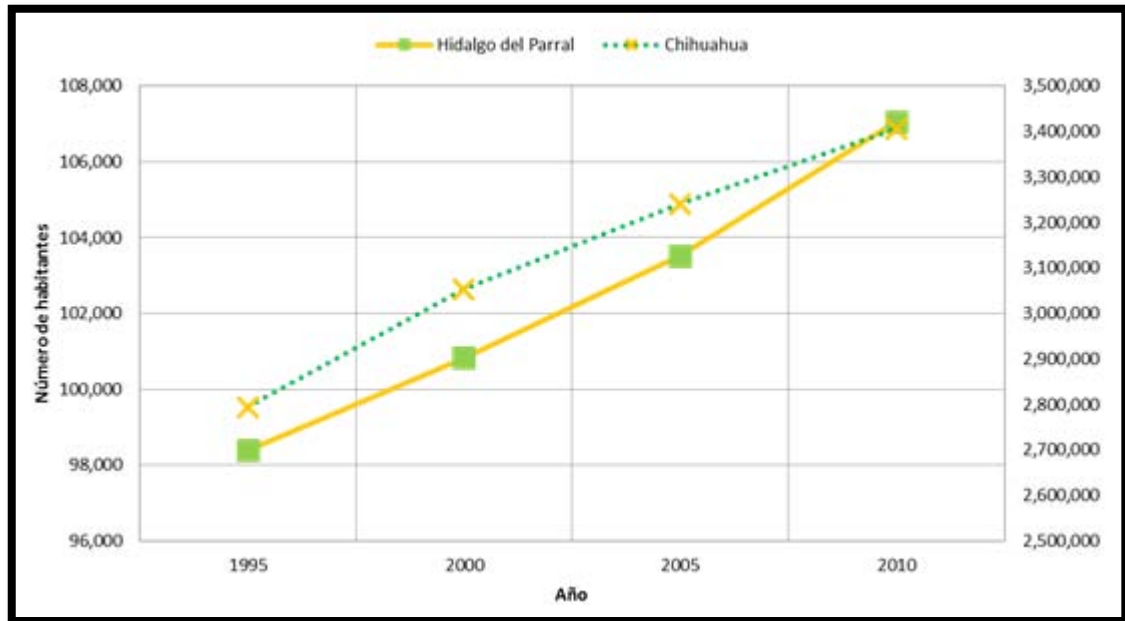


Figura 3.2. Crecimiento demográfico de la zona de estudio (INEGI, 2010).

3.6 Aguas superficiales y subterráneas

Hidalgo del Parral se encuentra ubicado en la región hidrológica Bravo Conchos, en la cuenca Río Conchos-Presa de la Boquilla y el Río Florido, en la subcuenca Río Molinas Nuevas, Río Parral, Río Conchos-Valle de Zaragoza, Río Valle de Allende y Presa de la Boquilla. Existen corrientes de agua perennes, como es el caso del Río Parral, y aguas intermitentes, Arroyo Grande, Santa Cruz de Villegas, El Mogote, Puerco, Zapién, Valerio y Quintana (INEGI, 2009). En la Tabla 3.5, se observan los porcentajes de la hidrografía en el municipio.



Tabla 3.5. Hidrografía en la zona de estudio.

| HIDROGRAFÍA | | PORCENTAJE |
|---|---|-------------------|
| Región Hidrológica | | |
| | Bravo Conchos | 100 |
| Cuenca | | |
| | Río Conchos-Presa de la Boquilla | 74.9 |
| | Río Florido | 25.1 |
| Subcuenca | | |
| | Río Molinas Nuevas | 52.4 |
| | Río Parral | 23.8 |
| | Río Conchos-Valle de Zaragoza | 22 |
| | Río Valle de Allende | 1.3 |
| | Presa de la Boquilla | 0.5 |
| Corrientes de agua perennes | | |
| | Río Parral | - |
| Corrientes de agua intermitentes | | |
| | Arroyo Grande | - |
| | Santa Cruz de Villegas | - |
| | El Mogote | - |
| | Puerco | - |
| | Zapién | - |
| | Valerio | - |
| | Quintana | - |

Fuente: INEGI, 2009



4 CONTAMINACIÓN DEL SUELO

La constitución del suelo se relaciona con la geoquímica de la parte de la corteza terrestre que está en contacto con la atmósfera y ligada a las influencias bióticas. La corteza terrestre proporciona minerales que los organismos asimilan y los incorporan al componente orgánico del suelo, creándose así la fase sólida de los suelos, la materia orgánica y la materia mineral. Esta proporción de la fase sólida es muy variable respecto al tipo de suelo, y frecuentemente constituye aproximadamente 50% del volumen del suelo, el otro porcentaje lo conforman la solución y el aire del suelo (Durán, 2004).

El incremento en la industria y la extracción de recursos naturales han dado lugar a la contaminación del medio ambiente a gran escala. Las grandes cantidades de residuos tóxicos se han dispersado en miles de sitios contaminados repartidos, lo que puede provocar alteraciones tanto en el ambiente como en la salud humana, ya que estos contaminantes atacan a las esferas ambientales (aire, agua, suelo) y es donde puede afectar directamente a los seres vivos (Prasad, 2011).

En estudios de evaluación de la contaminación del suelo realizados en España se establecieron cinco categorías de contaminación en suelos:

1. Ligera.
2. Moderada.
3. Considerable.
4. Muy contaminados.
5. Extremadamente contaminados.

En cada una de estas categorías se incluyen tres grupos de suelos según su textura y pH, además dependiendo del área de estudio cambian los componentes del suelo. En la clase 3, los suelos están considerablemente contaminados, lo que representaría un riesgo potencial de contaminación para cosechas. Para la clase 4, son suelos que no deben utilizarse para la producción de plantas destinadas a la alimentación, y menos aún si se trata de suelos con un



alto índice de acidez y de textura ligera. Por otra parte, la clase 5 debería descartarse para el uso agrícola y empezar, lo antes posible, la remediación (Pérez *et.al.* 2000).

Tanto las fuentes de contaminación puntuales (emisiones, vertidos y descargas de sólidos de las industrias, metales de fundición y minería) como las fuentes no puntuales (uso de agroquímicos), tienen sus propios efectos en la vegetación, la fauna y por último en los seres humanos, pero las fuentes que liberan metales pesados en el suelo son de gran preocupación debido a que su persistencia en el medio ambiente es muy alta y el riesgo de carcinogenicidad para los seres humanos aumenta. Los metales pesados no pueden ser destruidos biológicamente como sucede con otros contaminantes, pero se pueden llegar a transformar, ya sea por medio de oxidación o de algún otro fenómeno. En virtud de lo anterior, la contaminación por metales pesados plantea una amenaza para el medio ambiente y la salud humana.

Los metales pesados que se han podido identificar en suelos contaminados varía dependiendo del tipo de fuente que los produce, pero en general se ha encontrado arsénico, cobre, cadmio, plomo, cromo, níquel, mercurio y zinc. Estos metales pesados pueden ser absorbidos por las plantas en grandes cantidades, consecuentemente pueden causar un daño a la salud humana, o en otras circunstancias los metales pesados pueden afectar negativamente el crecimiento de los cultivos, ya que interfieren en las funciones metabólicas de las plantas, la fotosíntesis y la respiración; en grandes concentraciones, causan la muerte de las plantas. Asimismo la contaminación por metales pesados, puede provocar cambios en la composición de los microorganismos del suelo, lo que perjudica a las características del suelo (Iqbal *et.al.* 2008).

4.1 La contaminación del suelo por metales y metaloides

El uso de recursos líticos siempre ha jugado un papel importante en el desarrollo de la humanidad. Desde la prehistoria hasta la era moderna, los humanos han ido desarrollando nuevas técnicas para solventar las necesidades de su tiempo. Estos recursos se obtienen



principalmente por medio de las actividades minero-metalúrgicas, a su vez estos recursos están formados por minerales los cuales en sus moléculas pueden contener metales pesados y metaloides, por mencionar algunos, se encuentran el arsénico, hierro, cadmio, oro, plomo y plata. La obtención de estos metales, se lleva a cabo en las excavaciones de minas, lo que puede llevar a causar daños ambientales y en el peor de los casos a destruir ecosistemas (Volke et.al. 2005).

Una de las principales fuentes de contaminación por metales y metaloides, es la minería, durante todo el proceso metalúrgico se pueden generar contaminantes al ambiente. En la Tabla 4.1, se ilustra el proceso general de la actividad minera.

Tabla 4.1. Etapas principales de la actividad minera.

| ETAPA | DESCRIPCIÓN | IMPACTO AL AMBIENTE |
|--------------------------------|---|--|
| Prospección | Es la exploración del subsuelo basada en el examen de los caracteres del terreno para descubrir yacimientos tanto minerales o de otro tipo. | No se generan impactos ambientales significativos. |
| Exploración | Se compone por barrenación, obras y perforaciones, construcción de caminos e instalación de campamentos. | Se observa claramente en la destrucción de la vegetación. |
| Explotación y beneficio | Descapote, construcción, acumulación de material, transporte de material, extracción y concentración de minerales, reducción del tamaño del mineral por trituración y molienda, así como tratamientos previos a una fusión primaria o electro-depositación. | Destrucción de la capa del suelo y la vegetación, afectación a cuerpos de agua, generación de terreros inestables, generación de jales, drenaje ácido, descarga de lixiviados que contienen iones metálicos y reactivos tóxicos. |
| Fundición y refinación | Se obtienen los metales y sus aleaciones con el uso de hornos industriales y se eliminan impurezas en los metales para alcanzar una ley más alta en el contenido. | Se generan aguas residuales, residuos peligrosos y emisiones a la atmósfera. |

Fuente: Volke *et.al.* 2005



4.2 Impacto de los metales pesados en el suelo

El impacto de los metales pesados en el medio ambiente ha sido notado desde la época de Plutarco, el historiador griego hace más de 1900 años, donde relataba los efectos de la contaminación, toxicidad y ecotoxicidad atribuidos a ciertos metales y a algunos de sus compuestos, los cuales eran provocados por la exposición que experimentaban los trabajadores de las minas y las fundiciones (Schinitman, 2004).

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre, los cuales se pueden convertir en contaminantes si su distribución se altera mediante actividades antropogénicas (INECC, 2009). Como se mencionó anteriormente una de las actividades generadoras de estos contaminantes es la minería, además de las industrias que liberan al ambiente efluentes industriales y las emisiones vehiculares.

De acuerdo a Lillo (2011) los residuos mineros tienen un alto impacto en el ambiente, en el ámbito del terreno, los residuos provocan:

- Desertización, debido a la deforestación, erosión y pérdida de suelo fértil.
- Modificación del relieve, impacto visual, alteración de la dinámica de los procesos de ladera.
- Peligros geotécnicos, desestabilización de las laderas a causa de las sobrecargas y alteraciones en el nivel freático.

En referencia al suelo, este sufre la pérdida de varias propiedades físicas:

- Variaciones en la textura (porosidad, permeabilidad) por procesos de deposición.
- Pérdida de la estructura edáfica por compactación, mezcla de horizontes, deposición de partículas.
- Variaciones en el régimen hídrico.
- Pérdida de los horizontes superficiales por erosión inducida.

Así mismo, el suelo pierde propiedades químicas representativas del sitio geográfico en el que se localiza el vertido de residuos mineros, estas son:



- Contaminación por metales pesados y metaloides.
- Acidificación por acumulación y oxidación de sulfuros y drenaje ácido.
- Adición de sales al suelo (sulfatos).

Existe bioacumulación de metales pesados, en especial del mercurio, el cual durante su paso por la cadena trófica, además de la acumulación sufre de biotransformación, es decir que el mercurio puede ser depositado al ambiente en forma metálica y los procesos de biotransformación lo convierten en metil-mercurio (INECC, 2009).

4.3 Impacto del arsénico, mercurio y plomo en la salud

Los metales y metaloides al introducirse en el medio ambiente y contaminarlo, pueden llegar a la población y ocasionarles alteraciones a la salud; dependiendo de la especie que se ingrese en el organismo será el tipo de enfermedad y la gravedad con que ésta afecta al hombre.

4.3.1 Arsénico

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2012) el arsénico se encuentra en forma natural en varias partes del mundo, entre ellas México, cuando el arsénico inorgánico entra al organismo humano se pueden dar dos tipos de efectos:

- Efectos agudos. Los síntomas inmediatos de intoxicación aguda por arsénico incluyen vómitos, dolor abdominal y diarrea. Seguidamente, aparecen otros efectos, como entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies o calambres musculares y, en casos extremos, la muerte.
- Efectos a largo plazo. Los primeros síntomas a altos niveles se observan en la piel, tras aproximadamente 5 años de exposición, son la pigmentación, lesiones cutáneas, durezas, callosidades en las palmas de las manos y en las plantas de los pies. Además el arsénico es considerado precursor de diferentes tipos de cáncer en el ser humano, como el de piel, vejiga, pulmón.



4.3.2 Mercurio

El mercurio es un metal que se encuentra en forma natural en el ambiente, la exposición a este metal pesado puede causar graves problemas de salud, en las embarazadas es muy peligrosa dicha exposición ya que impide el desarrollo intrauterino y en las primeras etapas de vida; de igual manera es tóxico (incluso en pequeñas dosis) a las personas que se encuentran expuestas, afectando los sistemas nervioso e inmunitario, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, riñones y ojos (OMS, 2013). De acuerdo con el INECC (2009), además de todos los potenciales daños que puede ocasionar el mercurio, se reporta que a una exposición breve, puede causar pérdida de memoria, temblores, inestabilidad emocional, insomnio e inapetencia; a exposiciones moderadas, se observan desórdenes mentales más importantes y perturbaciones motoras; y a exposiciones breves a altos niveles de vapor de mercurio, además del daño de pulmones puede provocar la muerte.

4.3.3 Plomo

El plomo es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública. Es una sustancia tóxica que se va acumulando en el organismo afectando a diversos sistemas, con efectos especialmente dañinos en los niños de corta edad. El plomo se distribuye por el cuerpo hasta alcanzar el cerebro, el hígado, los riñones y los huesos y se deposita en dientes y huesos, donde se va acumulando con el paso del tiempo; no existe un nivel de exposición al plomo que se pueda considerar seguro (OMS, 2014). Los intoxicación aguda se presenta acompañada con alteraciones digestivas, dolores epigástricos y abdominales, vómitos, alteraciones renales y hepáticas, convulsión y coma; mientras tanto, la intoxicación crónica puede involucrar neuropatías, debilidad y dolor muscular, fatiga, cefalea, alteraciones del comportamiento, parestesias, alteraciones renales, aminoaciduria, hiperfosfaturia, glucosuria, nefritis crónica, encefalopatía, irritabilidad, temblor, alucinaciones con pérdida de memoria, cólicos, alteraciones hepáticas, entre varios más (INECC, 2009).



La Secretaría de Salud informa que en el área donde se encuentra la zona de estudio, no se tiene registrado ningún ingreso, complicación o fallecimiento a causa de los metales pesados, ya que tienen conocimiento de que la zona es minera y se encuentran monitoreando en caso de que llegue algún paciente con síntomas provocados por metales pesados.

4.4 Legislación mexicana

En la República Mexicana se dispone de una amplia legislación aplicable al medio ambiente, a continuación se destacan las disposiciones relativas a la prevención de la contaminación del suelo:

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en el Título Cuarto “Protección al Ambiente” Capítulo IV “Prevención y control de la contaminación del suelo”, correspondiente al artículo 134; establece quienes son los responsables de la prevención de la contaminación del suelo, así como de llevar las acciones necesarias para recuperar o restablecer las condiciones del sitio para su posterior aprovechamiento.

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental, en el capítulo II “De las obras o actividades que requieren autorización en materia de impacto ambiental y de las excepciones”, artículo 5 “Quienes pretendan llevar a cabo alguna de las siguientes obras o actividades, requerirán previamente la autorización de la Secretaría en materia de impacto ambiental”, inciso L “exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la federación”:

- I. Obras para la explotación de minerales y sustancias reservadas a la federación, así como su infraestructura de apoyo;
- II. Obras de exploración, excluyendo las de prospección gravimétrica, geológica superficial, geo-eléctrica, magneto telúrica, de susceptibilidad magnética y densidad, así como las obras de barrenación, de zanjeo y exposición de rocas,



siempre que se realicen en zonas agrícolas, ganaderas o eriales y en zonas con climas secos o templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinares, ubicadas fuera de las áreas naturales protegidas, y

- III. Beneficio de minerales y disposición final de sus residuos en presas de jales, excluyendo las plantas de beneficio que no utilicen sustancias consideradas como peligrosas y el relleno hidráulico de obras mineras subterráneas.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) en el Título Tercero “Clasificación de los residuos” Capítulo Único “Fines, criterios y bases generales “, artículo 17 establece lo siguiente:

“Los residuos de la industria minera-metalúrgica provenientes del minado y tratamiento de minerales tales como jales, residuos de los patios de lixiviación abandonados, así como los metalúrgicos provenientes de los procesos de fundición, refinación y transformación de metales, que se definirán en forma genérica en el reglamento según lo estipulado en el artículo 7 fracción III de esta Ley, son de regulación y competencia federal. Podrán disponerse finalmente en el sitio de su generación; su peligrosidad y manejo integral, se determinará conforme a las normas oficiales mexicanas aplicables, y estarán sujetos a los planes de manejo previstos en esta Ley. Se exceptúan de esta clasificación los referidos en el artículo 19, fracción I de este ordenamiento.”

Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, en Título Tercero “Residuos provenientes de la industria minero metalúrgica” establece lo siguiente:

En el **Artículo 32.-** Los residuos provenientes de los procesos metalúrgicos, en los términos de la fracción III del artículo 7 de la Ley, son de competencia federal.

En el **Artículo 33.-** Los residuos minero-metalúrgicos se manejarán de acuerdo a los planes de manejo que elaboren los responsables de los procesos que los generen. Estos planes de manejo podrán elaborarse en las modalidades previstas en el presente Reglamento.



Y en el **Artículo 34.-** Para los efectos del artículo 17 de la Ley, por sitio de generación debe entenderse tanto el predio en el que se desarrolle el proceso que da origen a los residuos como aquél en donde se encuentran las instalaciones, en términos de la fracción X del artículo 2 de este Reglamento.

Además de las leyes y reglamentos antes mencionados, se encuentran las Normas Oficiales Mexicanas y las Normas Mexicanas, de las cuales las siguientes son aplicables a la contaminación del suelo por metales pesados y metaloides.

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 post-operación de presas de jales, y tiene como objetivo establecer las especificaciones para la caracterización del jal y la caracterización del sitio, así como los criterios para la mitigación de los impactos ambientales por la remoción de la vegetación para el cambio de uso del suelo. Asimismo, señala especificaciones y criterios ambientales para las etapas de preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales, y para el monitoreo.

Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009. Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros, y tiene por objetivo establecer los elementos y procedimientos que se deben considerar al formular y aplicar los planes de manejo de residuos mineros, con el propósito de promover la prevención de la generación y la valorización de los residuos, así como alentar su manejo integral a través de nuevos procesos, métodos y tecnologías que sean económica, técnica y ambientalmente factibles.

Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio; la cual tiene por objetivo establecer los criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico,



bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio y sus componentes inorgánicos; así como los criterios de remediación.

Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006. Referente al muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra y tiene como objetivo establecer las especificaciones técnicas para la obtención y el manejo de muestras, que permitan la caracterización de suelos en el sitio de estudio, a través de la identificación y cuantificación de metales y metaloides, entendiéndose por éstos el arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio.



5 METODOLOGÍA

Con este trabajo de investigación se pretende la evaluación de la contaminación por metales pesados en la zona de Parral, Chihuahua, como resultado de la actividad minera que se ha efectuado en la zona, en la Figura 5.1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología.

Como primer paso, se planteó el problema del trabajo de investigación; para tal efecto, se realizó una investigación somera para determinar la viabilidad y la problemática del estudio, especificando los objetivos del trabajo.

Una vez planteados los objetivos del estudio, se realizó una visita a la zona de estudio, para conocer el panorama actual de la situación en que se encuentran los jales de la región; así mismo, se entrevistó tanto a funcionarios públicos, personal del archivo histórico de la ciudad y personas que laboran actualmente en la mina.

Obtenida la información en el reconocimiento del sitio, se redactaron los capítulos correspondientes a los antecedentes y marco teórico del trabajo, esto con ayuda de la información encontrada en fuentes digitales, impresa y por medio de entrevistas. Después se hizo el planteamiento del tipo de muestreo a efectuar en la zona de estudio, tomando como base las normas mexicanas existentes que estén relacionadas con la investigación en proceso.

Realizado el plan de muestreo teórico, se realizó una segunda visita a la zona de estudio, donde se solicitaron los permisos necesarios en la alcaldía, dado que son los dueños de los jales, así como con la empresa asociada, para realizar la toma de muestras. Conseguido el permiso, se procedió a muestrear los puntos propuestos teóricamente, teniendo una holgada libertad en modificar esta red de muestreo de acuerdo a las circunstancias ambientales y técnicas que se encuentren al momento de estar efectuando el muestreo.

Al término del muestreo, se trasladaron las muestras recolectadas de acuerdo a las especificaciones que marcan la norma al laboratorio encargado de darles tratamiento para la determinación de los metales tóxicos a estudiar. Los resultados arrojados de la determinación se estudiaron y se realizaron las recomendaciones y conclusiones pertinentes a las autoridades competentes.

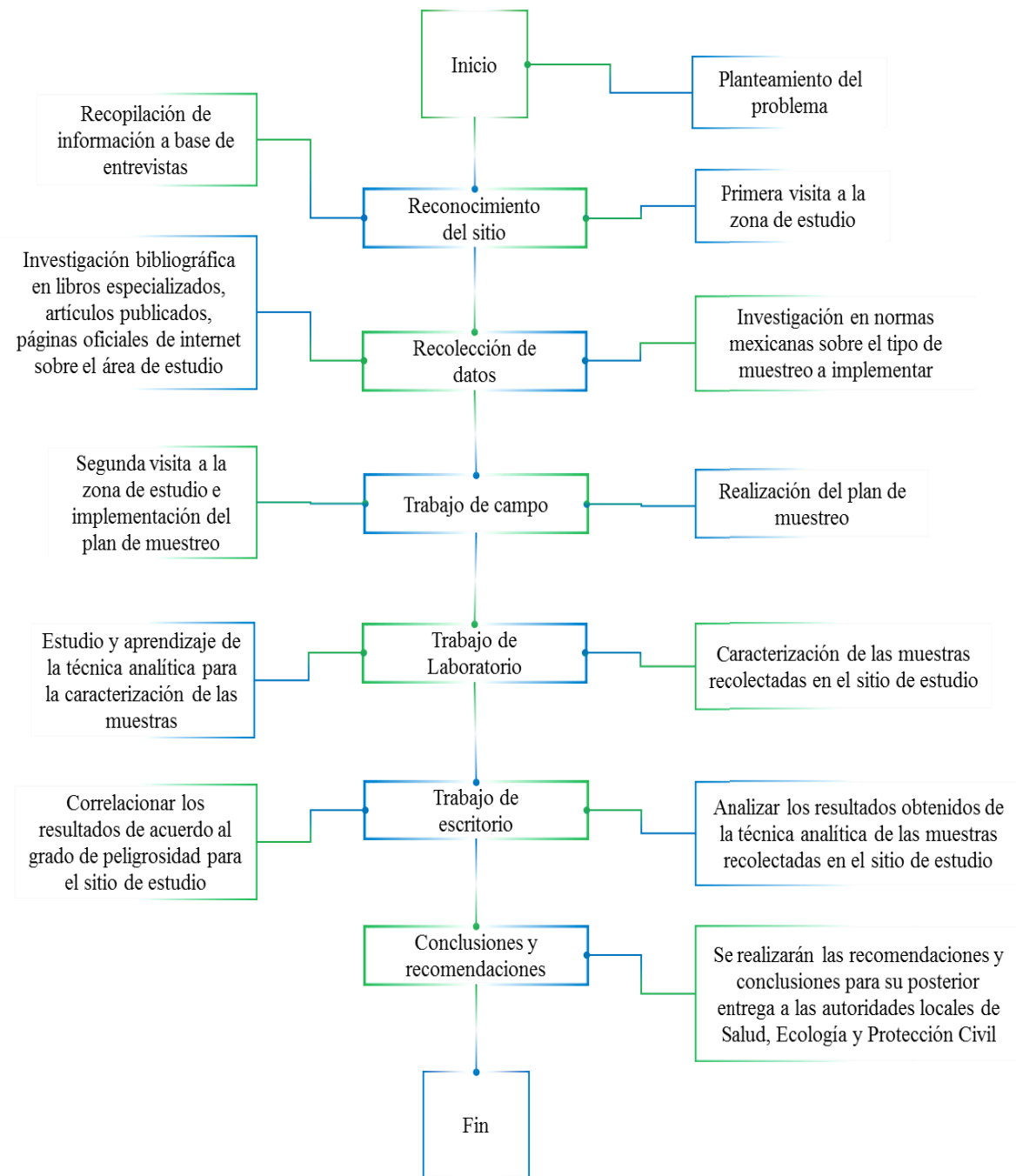


Figura 5.1. Diagrama de flujo de la metodología a empleada en el trabajo.



6 MATERIALES Y MÉTODOS

Al proponer el plan de muestreo para la obtención de las muestras basado en la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006, se aclara que esta norma es de uso exclusivo para suelo y no para residuos mineros. La presa de jales de mina La Prieta se consideró como la fuente de emisión de los contaminantes, y dada la propuesta del área delimitada para el estudio, esta abarca algunos puntos de suelo adyacentes a la fuente de emisión.

Por lo anterior, la norma mexicana se tomó como base para la planificación del muestreo, y no se siguió completamente, dado que como se mencionó con anterioridad, la máxima área de estudio recae en los residuos mineros de la fuente de emisión.

6.1 Plan de muestreo

De acuerdo con la Norma Técnica Mexicana, NMX-AA-132-SCFI-2006, que establece las especificaciones técnicas para la obtención y el manejo de muestras, que permitan la caracterización de suelos en el sitio de estudio, a través de la identificación y cuantificación de metales y metaloides, entendiéndose por éstos el arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio. Para el caso de estudio solo se analizaron los contaminantes arsénico, plomo y mercurio, ya que las presas de jales tienen una edad mayor a 300 años, las piedras se fundían y solo se aprovechaba el metal precioso, y el desecho se depositaba al aire libre, entre esos desechos se encuentra el mercurio; cuando se integró la flotación selectiva, se incrementó la concentración de plomo y arsénico en las presas de jales.

Para la realización del muestreo, se reunieron previamente algunas herramientas necesarias para que la recolección de muestras sea eficiente.

1. Hoja de datos, la cual debe contener:
 - a. Fecha de recolección de la muestra.
 - b. Clave de identificación, proponiendo a las muestras recolectadas en Hidalgo del Parral con la clave HP seguido de una serie numérica.
 - c. Ubicación geográfica.



- d. Hora de toma de la muestra.
 - e. Características ambientales, como por ejemplo:
 - i. Condiciones climáticas.
 - ii. Presencia de vegetación.
 - iii. Uso actual del suelo.
 - iv. Edificaciones o infraestructura.
 - v. Actividades ajenas al proceso propio de contaminación que pudieran influir en la calidad del muestreo.
 - vi. Presencia de residuos o materiales de relleno.
 - f. Características del suelo, como las siguientes:
 - i. Textura.
 - ii. Color.
 - iii. Presencia de humedad.
 - iv. Presencia de hojarasca.
 - v. Presencia de otros materiales eliminados durante el muestreo.
 - g. Nombre de quien toma la muestra.
2. Un posicionador satelital global (GPS).
 3. Una pala de metal o de plástico.
 4. Bolsas de medio kilo aproximadamente para contener la muestra.
 5. Etiquetas para las bolsas, las cuales deben de contener:
 - a. Clave de identificación de la muestra.
 - b. Ubicación de la muestra.
 - c. Hora del muestreo.
 - d. Fecha del muestreo.
 - e. Nombre del responsable que tomó las muestras.
 6. Planos de las zonas de muestreo, con la probable ubicación de los puntos de muestreo.
 7. Objetos varios:
 - a. Cinta métrica.
 - b. Cámara fotográfica.
 - c. Plumas.



- d. Marcadores.
- e. Brocha o cepillo.
- f. Agua la necesaria.

El muestreo que se realizó fue de tipo superficial, esto quiere decir que la profundidad de la excavación para la toma de muestras fue de 30 centímetros, y de ahí se recolectó una cantidad aproximada de 500 gramos. El muestreo vertical, consiste en realizar una excavación de aproximadamente 2 metros de profundidad y así muestrear los horizontes, no se llevó a cabo dado que no se dispuso de los recursos para realizar este tipo de muestreo. Los 500 gramos de muestra recolectada, fueron suficientes para disponer de al menos 250 gramos de muestra tamizada para su posterior análisis.

La recolección de las muestras no se llevó a cabo mediante envases de tapa hermética, sino por medio de bolsas con cierre hermético, para facilitar su traslado desde Parral, Chihuahua hasta Ciudad Universitaria. Estas muestras recolectadas, se resguardaron en contenedores de plástico para protegerlas de las condiciones ambientales.

El tipo de muestreo realizado fue de tipo exploratorio, ya que su objetivo fue obtener las muestras de suelo y jales representativas para establecer la presencia de contaminación y en su caso la distribución horizontal de la misma y valorar su posible migración vertical.

El muestreo exploratorio se realiza en dos fases, conforme a la norma, pero para este caso en particular, por el motivo que se mencionó antes, solo se realizó la primera fase que corresponde al suelo superficial.

El muestreo fue de tipo preliminar, dado que no se tienen reportes de la contaminación causada por los contaminantes a evaluar. Se propusieron 18 puntos de muestreo para la zona de estudio, a continuación se detalla la secuencia de pasos que se siguió para ubicar los puntos teóricos del muestreo preliminar:

1. Delimitar el área de la zona de estudio, para ello se utilizó el programa de Google Earth, para ubicar específicamente las zonas a muestrear (Figura 6.1), donde se incluye en la zona delimitada las presas de jales y el área adyacente.

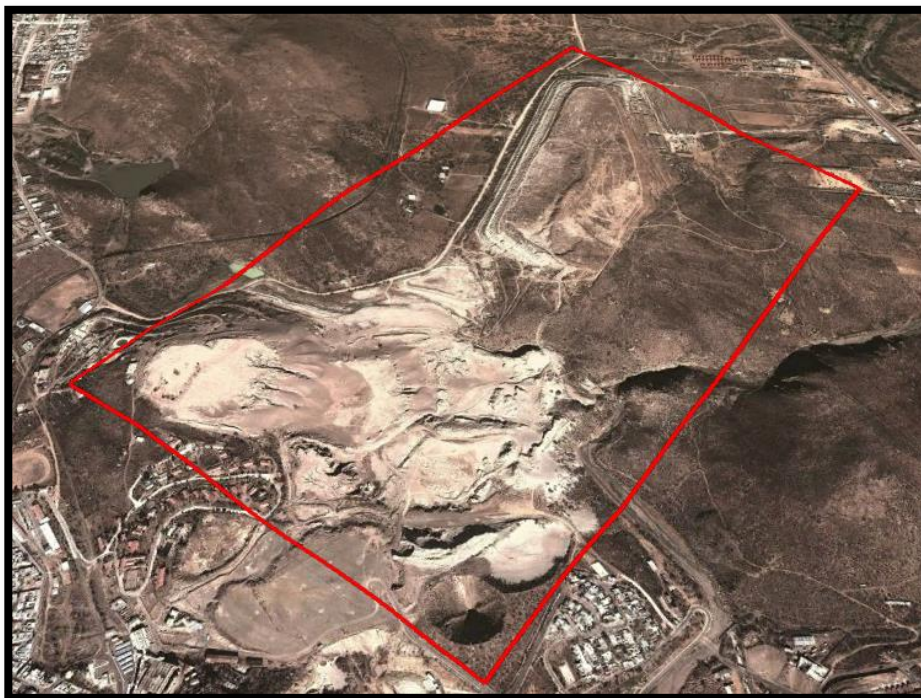


Figura 6.1. Delimitación del área del muestreo preliminar en Hidalgo del Parral, Chihuahua.

2. Aplicando la Ecuación 6.1, se determinó el número de puntos de muestreo, esto de acuerdo a la Norma Técnica Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006.

$$y = x^{0.3} * 11.71 \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Donde:

y = número de puntos de muestreo.

x = hectáreas de la zona de estudio.

Proponiendo un área de estudio para Hidalgo del Parral de 158.43 hectáreas, el número de puntos de muestreo resultó de:



$$y = x^{0.3} * 11.71$$
$$y = (158.43 \text{ ha})^{0.3} * 11.71$$
$$y = 53.51$$

Por redondeo, se propusieron 50 puntos de muestreo, cuya distribución se observa en la Figura 6.2.

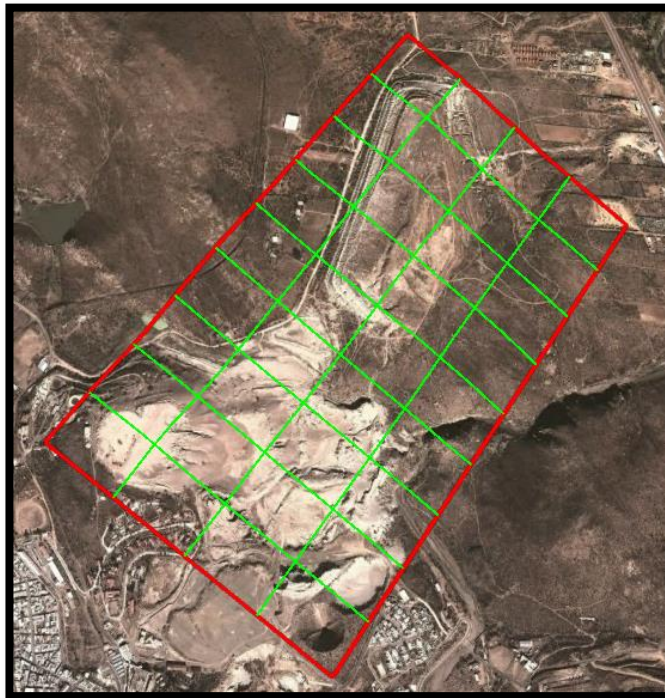


Figura 6.2. Ubicación de los puntos de intersección determinados por la ecuación 6.1 en Hidalgo del Parral, Chihuahua.

3. Como se especificó anteriormente, el muestreo fue de tipo preliminar, por lo que el anterior cuadrículado (identificado con el color verde), contiene demasiados puntos de muestreo, en la siguiente ilustración (Figura 6.3) se propone un cuadrículado secundario, que cumple con los requerimientos del trabajo, ya que abarca la zona de muestreo y su distribución es uniforme.

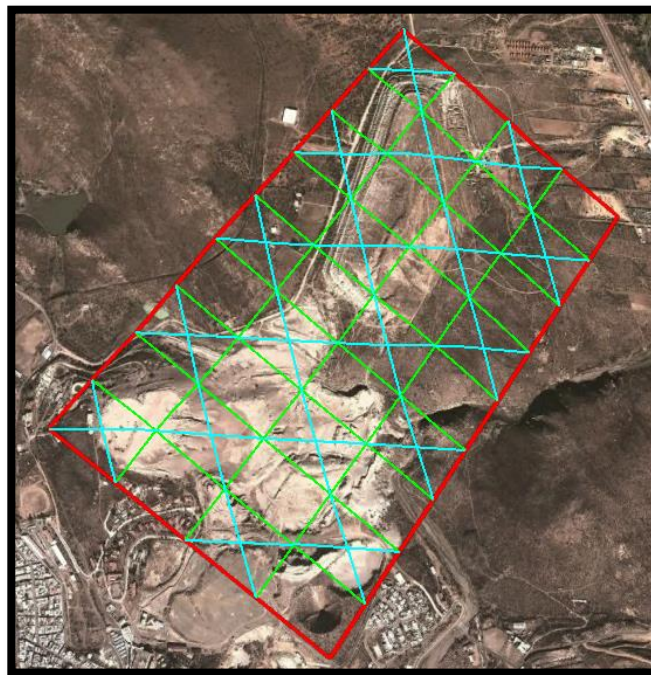


Figura 6.3. Ubicación del cuadrículado secundario en Hidalgo del Parral, Chihuahua.

4. Una vez obtenido el cuadrículado secundario (identificado con color azul), se procede a posicionar los puntos de muestreo, estos están ubicados en los vértices del cuadrículado secundario, en las Figura 6.4, se observa el acomodo de los puntos de muestreo teóricos; a la izquierda se muestra la zona con los cuadrículados y a la derecha se muestra el área delimitada con solamente los puntos de muestreo teórico.

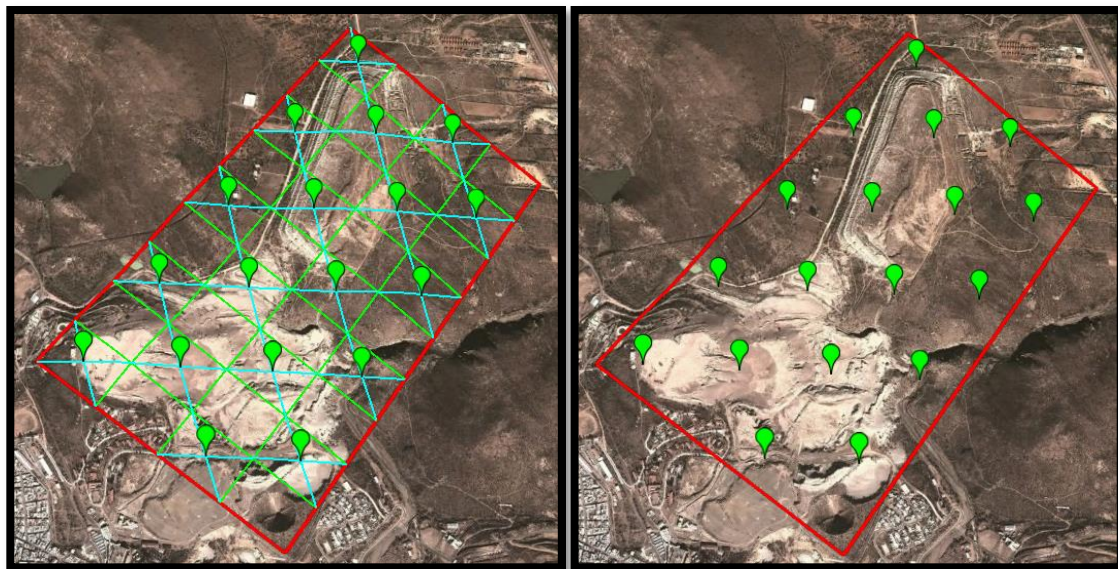


Figura 6.4. Datos geo-referenciados del muestreo teórico en Hidalgo del Parral.



Los puntos de muestreo propuestos, se registraron en la “Hoja de Datos” (ANEXO 1) que cumple con las especificaciones de la NMX-AA-132-SCFI-2006 de muestreo. Para la identificación de las muestras se rotularon con marcador indeleble en la primera bolsa y se colocó en bolsa doble para la seguridad de la muestra.

6.2 Trabajo de campo

En los meses de junio y julio del 2014, se llevó a cabo el plan de muestreo propuesto con en la localidad de Hidalgo del Parral, Chihuahua.

Como primer paso se enumeraron los puntos de muestreo, para realizar la toma de muestras de una manera más organizada, como se observa en la Figura 6.5. Esta trayectoria propuesta se eliminó, dado que al realizar el reconocimiento del terreno, el relieve no hacía propicio el trayecto planteado, por lo que fue necesario replantear la ruta de recolección de las muestras (Tabla 6.1), esto con base en la accesibilidad y a los tres grandes montículos de jales existentes en la zona de estudio (Figura 6.6).



Figura 6.5. Puntos de muestreo enumerados para la recopilación de muestras.



Tabla 6.1. Ordenamiento de los puntos de muestreo.

| Punto de Muestreo | Orden de recolección | Punto de Muestreo | Orden de recolección |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| HP1 | 12 | HP10 | 16 |
| HP2 | 1 | HP11 | 17 |
| HP3 | 2 | HP12 | 18 |
| HP4 | 3 | HP13 | 9 |
| HP5 | 5 | HP14 | 10 |
| HP6 | 6 | HP15 | 11 |
| HP7 | 4 | HP16 | 15 |
| HP8 | 7 | HP17 | 14 |
| HP9 | 8 | HP18 | 13 |

De acuerdo con información recabada en la zona de estudio, los montículos de jales están divididos en tres partes (Figura 6.6):

- Estos jales reciben el nombre de Jales Rojos, debido a la coloración rojiza que presentan, además son los residuos más antiguos en toda la presa de jales, y contienen mayor humedad.
- Los siguientes jales en antigüedad, son los llamados Jales Blancos; estos jales corresponden a una etapa más industrializada de la mina, dado a esto la coloración que presentan este tipo de jal es un tono más blanco.
- Y por último, se encuentran los Jales Nuevos, estos jales son residuo de un tratamiento que se le dio a los jales Rojos y Blancos para extraerles Fluorita.

Replanteando el recorrido, se procedió a recolectar las muestras dobles de cada punto de muestreo con algunas situaciones imprevistas, como es el caso del punto HP3, donde el jal estaba removido por lo que hubo que mover el punto ubicándolo cerca de vegetación existente; las coordenadas del punto HP4 se encontraban en una colina, el punto se movió a unas coordenadas de la planicie más cercana; en los puntos HP12 y HP14 no se tuvo acceso para la excavación resultando el movimiento de ambos puntos, dando al punto HP14 un traslado más lejano de lo planteado; el punto HP10 fue eliminado de la recolección ya que no se pudo excavar la profundidad requerida.

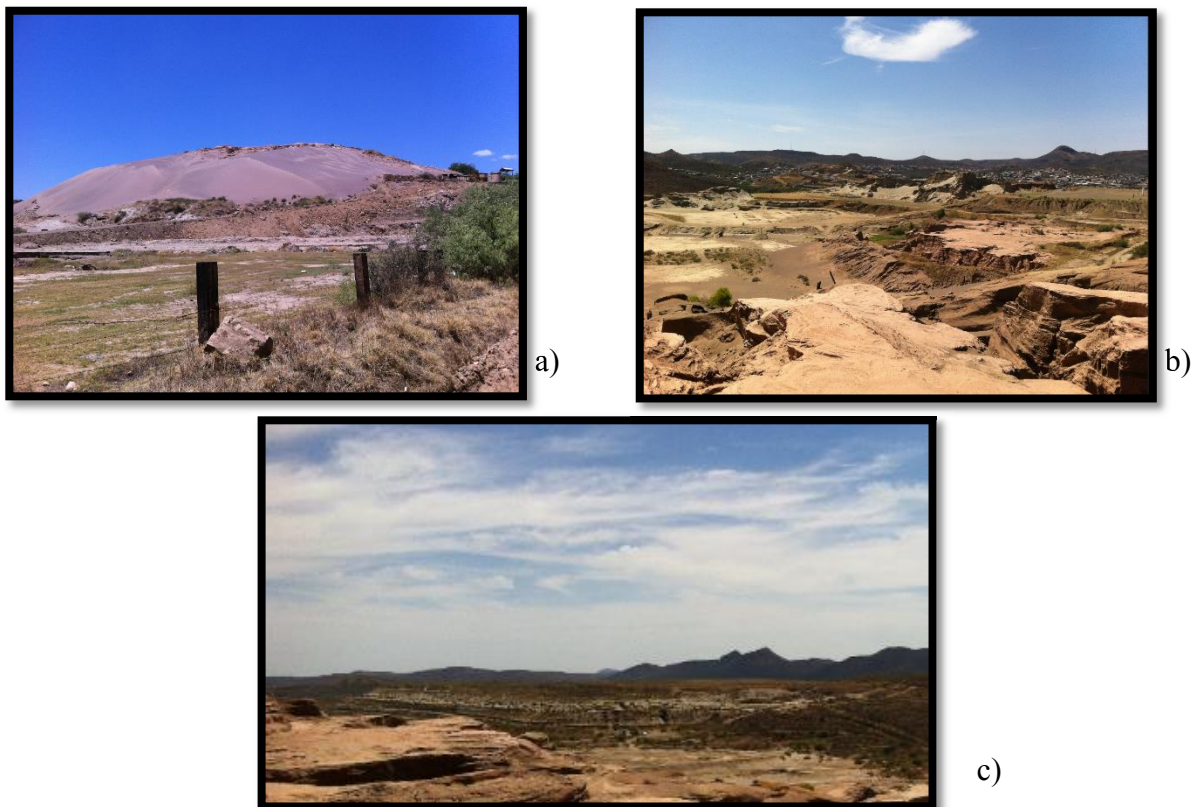


Figura 6.6. Jales en la zona de estudio; a) Jales “Rojos”, b) Jales “Blancos”, c) Jales “Nuevos”.

En todos los puntos de muestreo se tomaron los datos propuestos (fecha, ubicación geográfica, hora, humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad del viento, conductividad eléctrica, temperatura de la superficie, temperatura a 30 cm de profundidad, pH, peso) los cuales están plasmados en el ANEXO 2.

De una forma más general y administrativa, el muestreo se puede representar como se ilustra en la Figura 6.7, donde se presentan las etapas en las que se obtuvieron los permisos necesarios tanto de Presidencia Municipal y de la empresa asociada para la recuperación de metales preciosos en los jales.

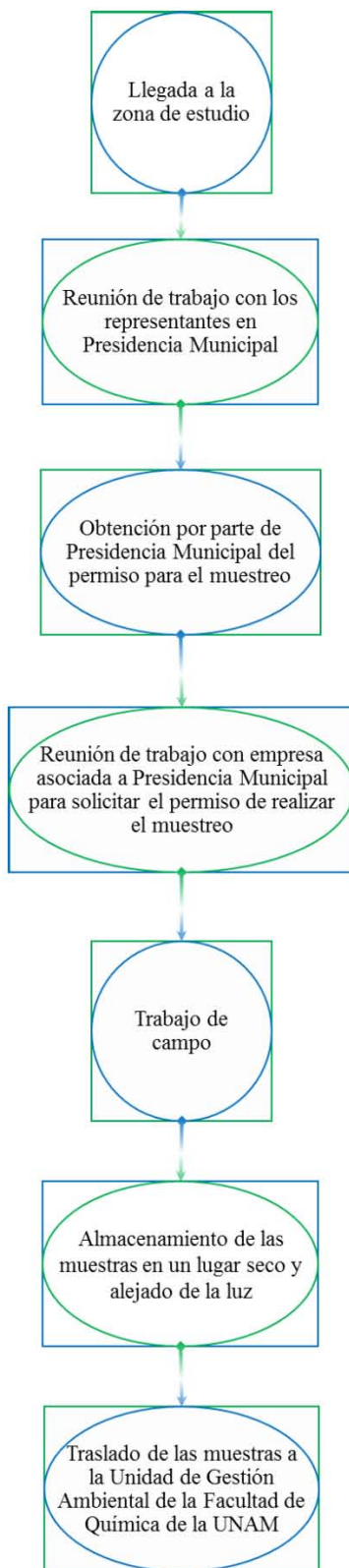


Figura 6.7. Proceso general del muestreo en Hidalgo del Parral.



7 RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

El presente capítulo contiene la recopilación de los resultados, observaciones y discusiones analizadas durante el proceso de los siguientes puntos:

1. Trabajo del muestreo.
2. Análisis de la zona de estudio.
3. Tratamiento de las muestras.
4. Espectrofotometría de Absorción Atómica para el plomo.
5. Espectrofotometría de Absorción Atómica para el arsénico.
6. Espectrofotometría de Absorción Atómica para el mercurio.
7. Granulometría.
8. Difracción de Rayos X.
9. Fluorescencia de Rayos X.
10. pH en pasta.

Los resultados obtenidos se clasificaron de acuerdo al origen de las muestras, identificando las que son de la matriz del suelo y las que son de la fuente de contaminación (jales).

7.1 Trabajo de campo

Al momento de realizar el muestreo, se midieron varios parámetros ambientales, como humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad del viento, conductividad eléctrica, temperatura de la superficie, temperatura a 30 cm de profundidad del suelo y pH. Los valores se incluyen en el ANEXO 2.

La humedad relativa, medida con el multiparámetro marca Nielsen-Kellerman modelo Kestrel 3000, expresada en porcentaje (%), es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene y la que tendría si estuviera completamente saturada; por tal motivo, entre más



se aproxima el valor al 100% más húmedo está, como se observa en la Tabla 7.1, los valores de la humedad relativa oscilan entre 28% y 66%.

Tabla 7.1. Humedad relativa en los puntos de muestreo.

| Puntos de muestreo en jales | % | Puntos de muestreo en suelo | % |
|------------------------------------|----------|------------------------------------|----------|
| HP1 | 65.1 | HP11 | 49.9 |
| HP2 | 37.5 | | |
| HP3 | 28.8 | HP12 | 44.7 |
| HP4 | 29.7 | | |
| HP5 | 62.2 | HP14 | 45.9 |
| HP6 | 51.6 | | |
| HP7 | 63.2 | HP15 | 55.7 |
| HP8 | 45 | | |
| HP9 | 42.1 | HPB | 62 |
| HP13 | 66.2 | | |
| HP16 | 43.8 | | |
| HP17 | 48 | | |
| HP18 | 56 | | |

En la Figura 7.1 se muestran los valores de la humedad relativa en los puntos de muestreo de una forma gráfica. Los puntos de muestreo que tienen el porcentaje más elevado, arriba del 60%, corresponden al HP1 (65.1%) ubicado en los jales rojos los cuales en el interior (30 cm) se encuentran húmedos, el HP5 (62.2%) se sitúa en la periferia del estacionamiento de las instalaciones de la Feria del pueblo, los cuales son rociados constantemente, y el punto HP13, se ubica al norte de los jales nuevos, el cual fue recolectado a las 7:38 a.m., a esa hora del día la insolación es baja, lo cual hace que el ambiente se encuentre con esta humedad, asimismo sucede con el punto HP7, el cual se recolectó a las 7:16 a.m., aunando a las características ambientales de esa hora, este punto está próximo a una corriente de agua, lo cual hace que la zona esté húmeda; y al igual que los puntos HP7 y HP13, el blanco (HPB) también fue tomado alrededor de las 7:47 a.m. y se refleja al ver el valor de la humedad



relativa (62%), además en esta área se encuentra una corriente de agua, por lo que en esa zona siempre se encuentra humedad en el ambiente.

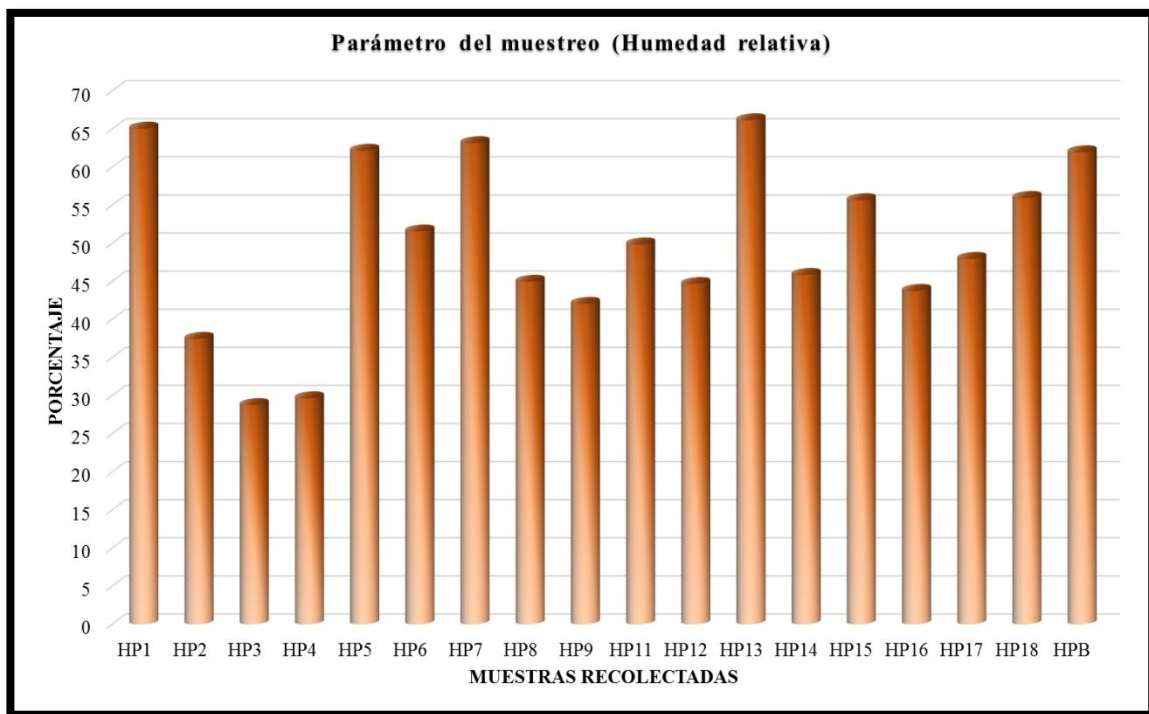


Figura 7.1. Humedad relativa en los puntos de muestreo.

La velocidad del viento, medida con el multiparámetro marca Nielsen-Kellerman modelo Kestrel 3000, expresada en metros por hora (m/h), relaciona la velocidad con la que el viento mueve las partículas que se encuentran en la superficie del suelo; el viento siempre está en movimiento, por lo que el traslado de jales es inminente, y dado que los vientos dominantes son hacia el sur oeste, existe una probabilidad de arrastre de contaminantes hacia la mancha urbana. En la Tabla 7.2 se muestran los valores obtenidos en el muestreo.



Tabla 7.2. Velocidad del viento en los puntos de muestreo.

| Puntos de muestreo en jales | m/h | Puntos de muestreo en suelo | m/h |
|------------------------------------|------------|------------------------------------|------------|
| HP1 | 5.0 | HP11 | 2.2 |
| HP2 | 4.2 | | |
| HP3 | 6.3 | HP12 | 1.6 |
| HP4 | 8.2 | | |
| HP5 | 3.9 | HP14 | 5.9 |
| HP6 | 5.8 | | |
| HP7 | 6.3 | HP15 | 4.6 |
| HP8 | 1.0 | | |
| HP9 | 1.3 | HPB | 0.0 |
| HP13 | 2.3 | | |
| HP16 | 9.4 | | |
| HP17 | 5.9 | | |
| HP18 | 6.2 | | |

En la Figura 7.2, se muestran los valores de la velocidad del viento en los puntos de muestreo de forma gráfica; como se observa en dicha figura, los puntos están ordenados en la forma y tiempo en el cual fueron registrados. Este cambio de velocidad del viento, se debe a varios factores que intervienen en la zona de muestreo, dado que algunos puntos se encuentran en lo más alto de los jales (HP1, HP17 y HP18), estos puntos muestran una velocidad del viento entre 5 y 6.2 m/h. Ahora bien, la velocidad del viento más elevada que se tiene registrada es de 9.4 m/h en el punto HP16, este punto se localiza en la ladera Este de los jales nuevos ahí, los vientos chocan con la pared de estos jales en dirección hacia el Oeste los cuales al llegar a esta pared se bifurcan en otras direcciones. Lo mismo sucede con el punto HP4, el cual se encuentra sobre un llano alto, en donde los vientos corren libremente. Los puntos del muestreo que tienen un valor bajo de velocidad del viento, están protegidos por el relieve de la zona de estudio, ya que se encuentran en las zonas más bajas por lo que el viento no tiene una gran velocidad.

El punto HP12, es de particular interés, dado que la velocidad del viento registrada en ese punto es de 1.6 m/h, pero la superficie del suelo no se encuentra a simple vista ya que



está cubierta por jales arrastrados de los jales “Nuevos”, aquí se verifica el traslado de los residuos mineros fuera de la presa de jales.

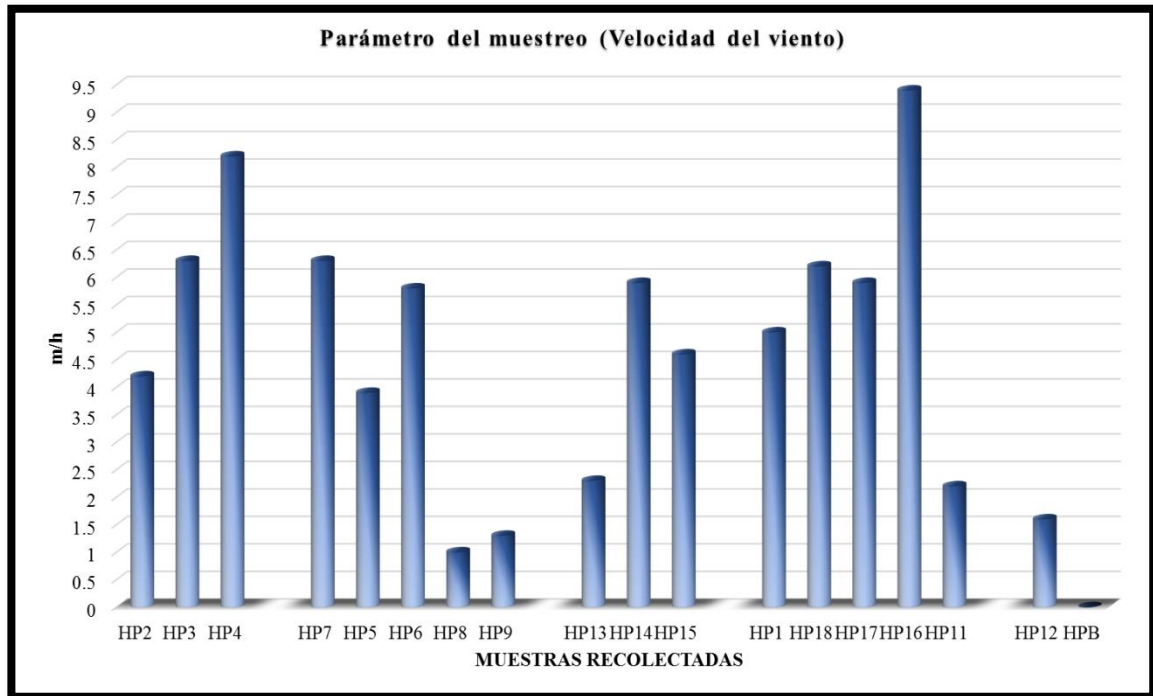


Figura 7.2. Velocidad del viento en los puntos de muestreo.

La conductividad eléctrica, medida con el conductímetro marca Waterproof modelo ECTestr 11 y calibrado con la solución estándar Conductivity Standard 2.764 mS/cm, expresada en siemens/centímetro (S/cm), es la medida de la capacidad de un material para dejar pasar libremente la corriente eléctrica, el valor de la conductividad eléctrica en las muestras se observa en la Tabla 7.3.

Gráficamente los valores de la conductividad eléctrica en los puntos de muestreo, se observan en la Figura 7.3. Los puntos de muestreo que tienen valores altos de conductividad eléctrica son: el HPB (0.81 S/cm) el cual se encuentra ubicado fuera de la zona de muestreo, además el tipo de suelo presente en esta área es de otra clase comparado con el área muestreada, aquí el suelo presenta consistencia barrosa y una pigmentación roja, en estos tipos de suelos la concentración de hierro es elevada, ya que es el responsable de esta



coloración; por tal motivo se supone que esta alta conductividad eléctrica en este punto de muestreo es debido al tipo de suelo y a sus componentes; y el otro punto elevado es el HP8 (0.52 S/cm), este punto se encuentra en la rivieta del Rio Parral, el cual está contaminado por las aguas negras que son vertidas en él, por lo cual se presume que la alta conductividad eléctrica en este punto es debido a la contaminación externa al área de estudio.

Tabla 7.3. Conductividad eléctrica en los puntos de muestreo.

| Puntos de muestreo en jales | S/cm | Puntos de muestreo en jales | S/cm | Puntos de muestreo en suelo | S/cm |
|-----------------------------|------|-----------------------------|------|-----------------------------|------|
| HP1 | 0.36 | HP8 | 0.52 | HP11 | 0.19 |
| HP2 | 0.34 | HP9 | 0.21 | HP12 | 0.22 |
| HP3 | 0.25 | HP13 | 0.16 | HP14 | 0.33 |
| HP4 | 0.12 | HP16 | 0.26 | HP15 | 0.26 |
| HP5 | 0.23 | HP17 | 0.28 | HPB | 0.81 |
| HP6 | 0.23 | HP18 | 0.41 | | |
| HP7 | 0.26 | | | | |

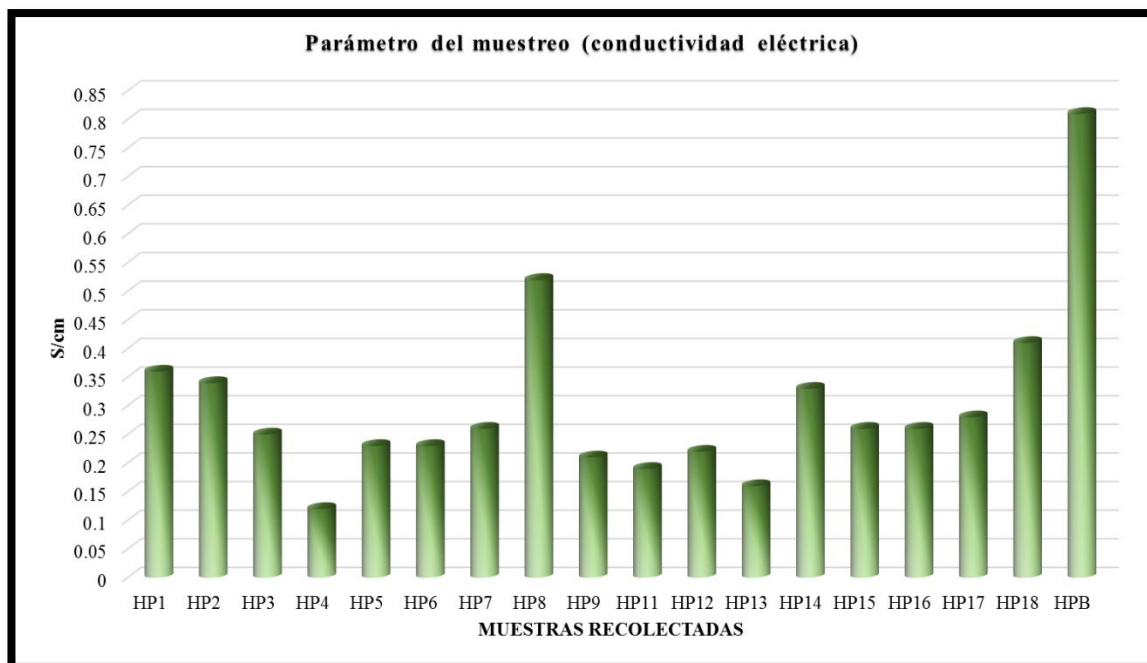


Figura 7.3. Conductividad eléctrica en los puntos de muestreo.



El potencial hidrógeno (pH), es la medida de acidez o alcalinidad en este caso presente en los suelos y residuos mineros, mide la concentración de los iones hidrógeno presentes en la muestra, medida con el potenciómetro marca HACH modelo H130 minilab. En la Tabla 7.4 se muestran los valores del pH medidos en el suelo al momento de la recolección de las muestras.

Tabla 7.4. pH en los puntos de muestreo.

| Puntos de muestreo en jales | pH | Puntos de muestreo en suelo | pH |
|------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|
| HP1 | 7.5 | HP11 | 6.2 |
| HP2 | 6.4 | | |
| HP3 | 6.4 | HP12 | 7.9 |
| HP4 | 6.4 | | |
| HP5 | 7.4 | HP14 | 7.5 |
| HP6 | 7.5 | | |
| HP7 | 7.3 | HP15 | 6.5 |
| HP8 | 7.7 | | |
| HP9 | 6.6 | HPB | 7.5 |
| HP13 | 7.4 | | |
| HP16 | 6.9 | | |
| HP17 | 6.3 | | |
| HP18 | 7.6 | | |

En la Figura 7.4, se muestra gráficamente los valores mostrados en la Tabla 7.4, respecto al pH de las muestras recolectadas, como se observa en la figura el margen en el que se encuentra el pH está entre 6.2 y 7.9, de acuerdo con la Tabla 7.5 se encuentran desde ligeramente ácido a moderadamente alcalino. De acuerdo con Boulding (1994), los puntos de muestreo se clasificarían de la siguiente manera:

Ligeramente ácidos: los puntos HP11 (pH=6.2) y HP15 (pH=6.5), ubicados en el área del suelo adyacente presentan valores bajos, de hecho el punto HP11 es el que registra el valor más bajo en todos los puntos de muestreo. Con respecto a los puntos de muestreo en los jales el HP17 presenta el valor más bajo con 6.3 ubicado en los jales nuevos, seguido de los puntos HP2, HP3 y HP4 con un valor de 6.4 los cuales están ubicados en los jales rojos.



Neutral: Dentro de este intervalo, se encuentra el punto HP7, el cual está en los jales blancos y enseguida de una corriente de agua que cruza a estos jales. Los otros puntos que se incluyen son el HP9 y HP16, ubicados en los jales nuevos.

Ligeramente alcalino: En este intervalo de pH es donde se encuentra un mayor número de puntos de muestreo de los diferentes tipos de jales y del suelo, de los jales rojos se encuentra el punto HP1 ubicado cerca de una corriente de agua, de los jales blancos están los puntos HP5, HP6 y HP8, este último ubicado en la riviéra del Río Parral, de los jales nuevos se tienen a los puntos HP13 y HP18; y por último, de la zona de los suelos adyacentes se incluyen en este intervalo a los puntos HP14 y al Blanco.

Moderadamente alcalino: En este intervalo solo se encuentra el punto de muestreo HP12, el cual está ubicado en la zona del suelo, pero cabe recalcar que en esta zona existe un evidente arrastre de jales nuevos por lo que el suelo no se encuentra a simple vista.

Tabla 7.5. Clasificación del pH.

| Clase | pH |
|---------------------------------|-----------|
| Ultra ácido | < 3.5 |
| Extremadamente ácido | 3.5 – 4.4 |
| Muy fuertemente ácido | 4.5 – 5.0 |
| Fuertemente ácido | 5.1 – 5.5 |
| Moderadamente ácido | 5.6 – 6.0 |
| Ligeramente ácido | 6.1 – 6.5 |
| Neutral | 6.6 – 7.3 |
| Ligeramente alcalino | 7.4 – 7.8 |
| Moderadamente alcalino | 7.9 – 8.4 |
| Fuertemente alcalino | 8.5 – 9.0 |
| Muy fuertemente alcalino | >9.0 |

Fuente: Boulding, 1994

El valor de pH, también demuestra la posible forma en que se encuentran los metales pesados, dado que a un nivel más ácido, los minerales no se encuentran estables, mientras que en una forma más alcalina, los minerales están en una forma estable.

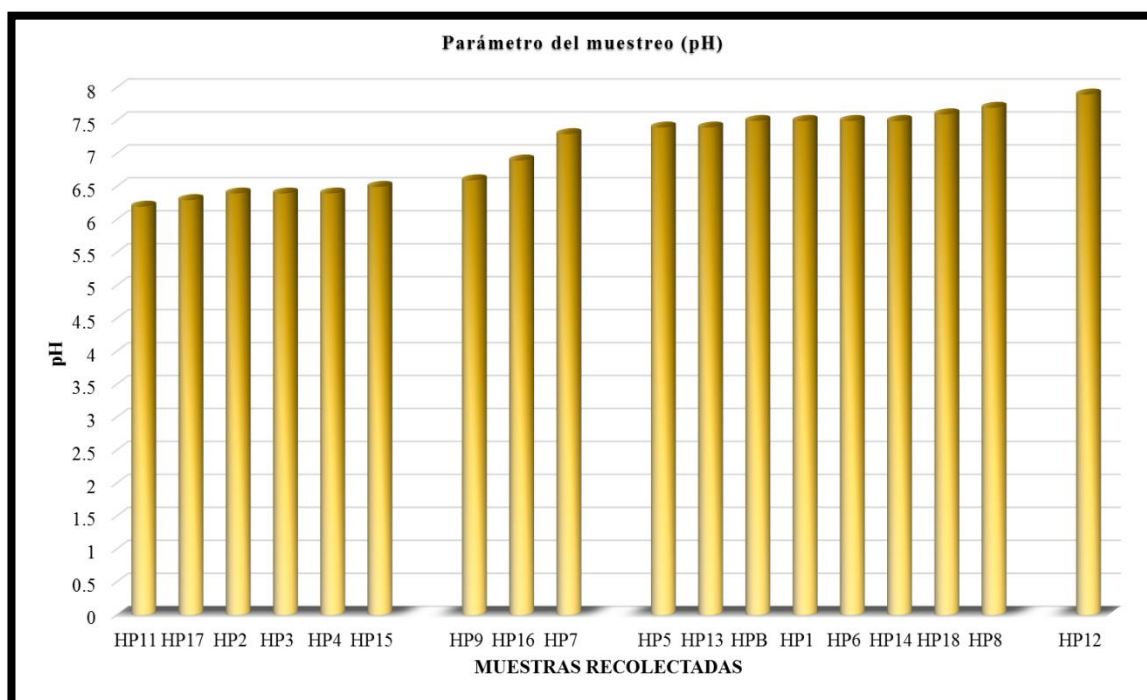


Figura 7.4. pH en los puntos de muestreo.

Y por último, se realizó la medición de la temperatura, en tres modalidades, temperatura ambiente con el multiparámetro marca Nielsen-Kellerman modelo Kestrel 3000, temperatura de la superficie y temperatura a 30 cm de profundidad, estas dos medidas con el termómetro Quick Temp Non-Contact Thermometer. En la Tabla 7.6 se muestran los valores obtenidos en la medición.

En la Figura 7.5 se muestran los valores de las temperaturas ordenadas por el día y hora en el que fueron tomadas, mostrando el incremento en la temperatura durante el muestreo. Como se observa, durante el día las temperaturas van en aumento, notándose claramente en la temperatura de la superficie llegando a alcanzar los 54°C alrededor de las 10:47 a.m.; por lo que el muestreo se vio interrumpido a estas horas del día en toda la semana que duró esta actividad. Cabe recalcar que la temporada en la cual se realizó el muestreo es verano, y las temperaturas en esta época del año convergen entre los 30°C y los 50°C.



Tabla 7.6. Temperaturas en los puntos de muestreo.

| | Ambiente | Superficie | 30 cm de profundidad |
|------------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|
| Puntos de muestreo en jales | | | |
| HP1 | 14.4 | 17 | 20 |
| HP2 | 29 | 36 | 28 |
| HP3 | 38.1 | 44 | 25 |
| HP4 | 32.4 | 52 | 27 |
| HP5 | 23.5 | 18 | 23 |
| HP6 | 24.1 | 23 | 24 |
| HP7 | 21.4 | 15 | 21 |
| HP8 | 31.5 | 27 | 29 |
| HP9 | 31 | 44 | 31 |
| HP13 | 23 | 19 | 26 |
| HP16 | 27 | 46 | 34 |
| HP17 | 26.3 | 30 | 28 |
| HP18 | 24.6 | 27 | 25 |
| Puntos de muestreo en suelo | | | |
| HP11 | 30.8 | 54 | 34 |
| HP12 | 20.1 | 16 | 23 |
| HP14 | 25 | 38 | 33 |
| HP15 | 26.8 | 42 | 28 |
| HPB | 22.7 | 20 | 26 |

Con estos rangos de temperatura la mayor parte del año propicia a que los jales de la superficie se deshidraten y estén expuestos a ser movidos por la acción del viento, originando con esto un área de contaminación mayor, esto también explica porque la capa de tierra que recubre a los jales nuevos se encuentra deteriorada y existen jales expuestos a la intemperie.

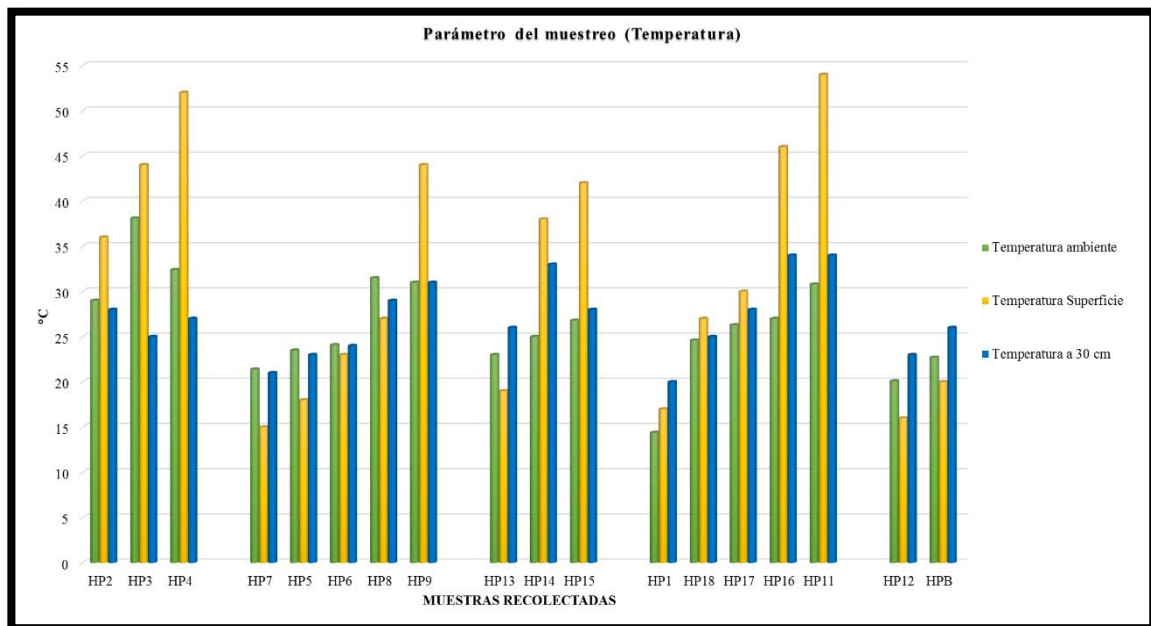


Figura 7.5. Temperaturas en los puntos de muestreo.

7.2 Análisis de la zona de estudio

Al realizar el recorrido del muestreo, se recopiló la información necesaria acerca de la zona de estudio para determinar el uso de suelo conforme a la norma oficial mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2006.

En la Figura 7.6, se muestran las áreas pertenecientes a los diferentes usos de suelo que se encuentran dentro y alrededor de la zona de estudio. En la zona se encuentran, empresas, zona residencial y turística.

Las empresas que fueron registradas corresponden a un taller mecánico, aserraderos, chatarrerías, bodegas y ladrillera, estas empresas están identificadas por el color amarillo en la imagen, las actividades comerciales de estas empresas no intervienen directamente con los jales mineros, pero están expuestos a ellos indirectamente dada su ubicación.



La zona residencial, está comprendida en el interior de la zona de estudio por 3 rancherías y La Colonia de la mina donde habitan los trabajadores de las minas de Grupo México; en el exterior de la zona de estudio se encuentra aledaña la colonia La Talleres que tiene una vía de acceso libre a los jales de la mina La Prieta, hacia el norte está ubicada la colonia Tarahumara, la cual solo está dividida de los jales por una cerca de alambres. Estas porciones de la comunidad de Hidalgo del Parral, son las que más contacto directo tienen con los jales y se encuentran más cerca de la zona de riesgo.

La zona turística, corresponde a Mina La Prieta, la cual fue adquirida por el municipio para ser utilizada como oficinas y es la principal atracción turística en la ciudad de Parral, en este recinto es donde se efectúan las distintas festividades a lo largo del año, como se muestra en la Figura 7.6 una parte del área se encuentra dentro de la zona de estudio y corresponde a una fracción del estacionamiento de Mina La Prieta, esto quiere decir que, cuando hay alguna celebración en el lugar, la gente se expone directamente a los residuos mineros, incrementando el riesgo que esto conlleva.

Aparte de las zonas de uso de suelo, se observó que existe una corriente de agua que atraviesa los jales rojos y blancos, la cual desemboca en el Rio Parral. No se tiene reporte de que exista una presa de lixiviados, y esto pudiera suceder gracias a la corriente de agua citada, que arrastra lo que tenga a su paso y lo deposita en el Rio Parral; siguiendo la trayectoria, se tuvo conocimiento de la realización de una planta de tratamiento de aguas la cual va a ser alimentada por el agua del Rio Parral, a cuyas aguas aparte de estar contaminadas con aguas negras se va a sumar la contaminación por el arrastre de residuos mineros hacia el río.

Tomando todo lo anterior en cuenta, se puede considerar que el uso de suelo es agrícola/residencial/comercial, de acuerdo a lo establecido en la Norma Oficial antes mencionada, la otra opción que maneja la norma es el uso de suelo industrial, y es descartada ya que en la zona no se encuentra el parque industrial de la ciudad.

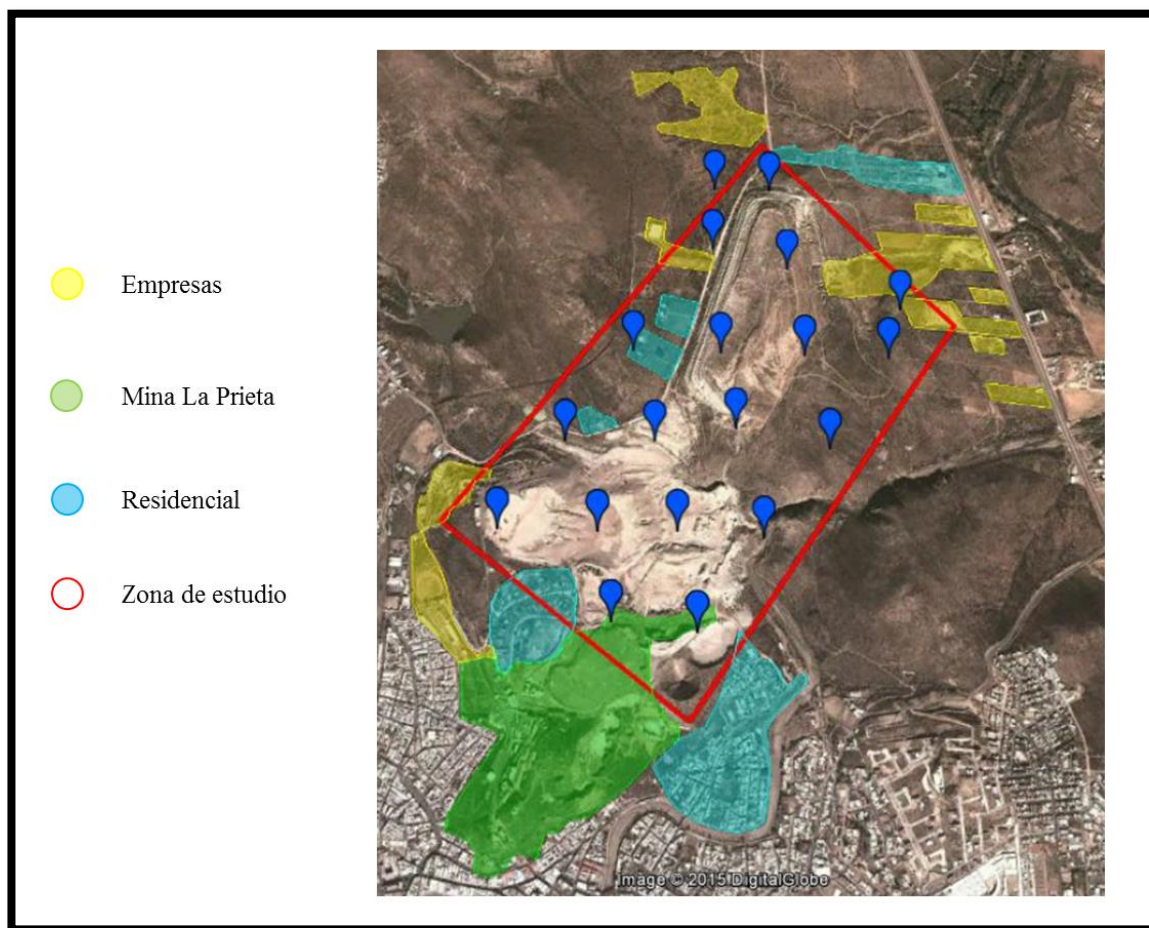


Figura 7.6. Usos del suelo en el interior y exterior de la zona de estudio.

7.3 Tratamiento de las muestras

Las muestras recolectadas de la zona de estudio en Hidalgo del Parral, fueron trasladadas a la Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, para realizar las pruebas de laboratorio pertinentes. En la Figura 7.7 se muestra de manera general el tratamiento que se siguió con las muestras recolectadas para la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. En la Figura 7.8, se muestra el proceso general efectuado en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Minera y Recursos Naturales de la Universidad Politécnica de Cataluña, para la determinación de la granulometría y el pH en pasta, así como las técnicas de difracción de rayos x y fluorescencia de rayos x y pH en pasta.

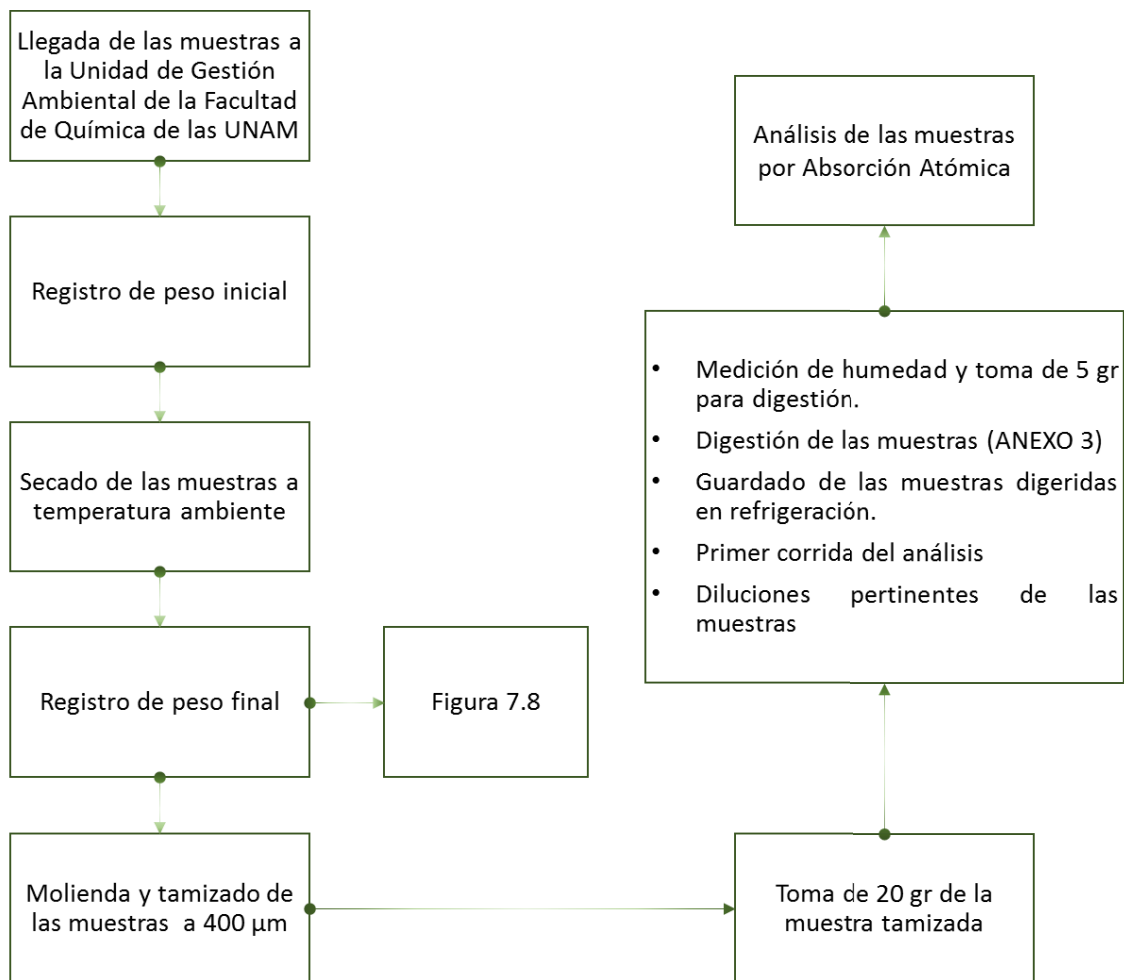


Figura 7.7. Proceso general para la absorción atómica en las muestras recolectadas.

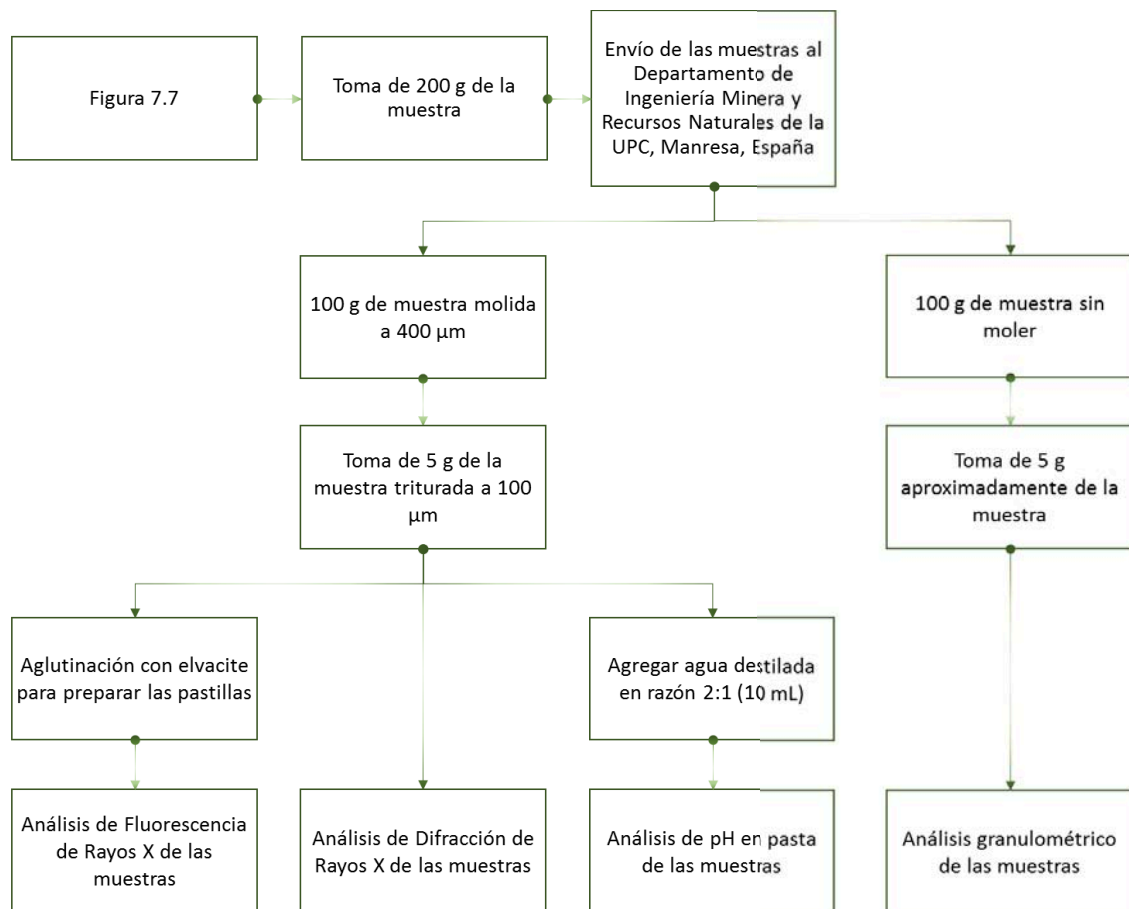


Figura 7.8. Proceso general para las técnicas analíticas efectuadas los laboratorios de la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de Barcelona.



7.4 Espectrofotometría de absorción atómica para el plomo

Las determinaciones de plomo se realizaron en el espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo 3110 a una longitud de onda (λ) de 217 nm, en la Tabla 7.7 se observan los valores obtenidos en la determinación de plomo.

Tabla 7.7. Concentraciones de plomo en las muestras recolectadas.

| Puntos de muestreo en jales | Concentración promedio* (ppm) | Puntos de muestreo en suelo | Concentración promedio* (ppm) |
|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| HP1 | 5,206.77 | HP11 | 272.86 |
| HP2 | 4,288.40 | | |
| HP3 | 5,089.64 | HP12 | 2,515.97 |
| HP4 | 3,906.60 | | |
| HP5 | 1,873.62 | HP14 | 117.96 |
| HP6 | 1,036.19 | | |
| HP7 | 5,040.03 | HP15 | 322.88 |
| HP8 | 751.69 | | |
| HP9 | 3,013.75 | HPB | 83.34 |
| HP13 | 3,501.32 | | |
| HP16 | 1,009.22 | | |
| HP17 | 4,900.90 | | |
| HP18 | 5,572.29 | | |

*Promedio de triplicado

De acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio, el valor límite para el plomo en un área residencial, comercial o forestal es de 400 ppm.

En la Figura 7.9 se pueden observar los puntos muestreados en suelo que rebasan este valor límite. Como se observa en la figura mencionada, sólo un punto de muestreo de suelo rebasa el límite permitido por la Norma Mexicana antes citada, corresponde al punto HP12, que está 6.29 veces por encima del valor normado; cabe recalcar, que al momento del

muestreo, en este punto el suelo no estaba a simple vista, los residuos mineros arrastrados por el viento cubrían un área importante.



Figura 7.9. Puntos de muestreo en suelo con concentraciones mayores a 400 ppm de plomo (rojo).

Dado que no existe en la normativa mexicana un valor que indique el máximo permisible para las concentraciones en residuos mineros, los valores obtenidos en los puntos de muestreo en los jales se compararon con un trabajo realizado por Romero y colaboradores en el 2008, donde reportan concentraciones del plomo en distintas minas del territorio mexicano.

En la Tabla 7.8 se efectuó una comparación con las concentraciones totales de plomo los jales provenientes de Sonora, Chihuahua, Hidalgo y Guerrero. Como se observa, el valor de la mediana de los jales de Parral, se encuentran en segunda posición, superados por los valores de la ciudad contigua de Santa Bárbara, Chihuahua; donde reportan una mediana en los valores de 6,669 ppm que corresponde a casi a un 71% el valor reportado en Parral. Comparado con los otros sitios, Parral se encuentra un 92% por encima de Zimapán y un 164% más que Taxco.



Tabla 7.8. Concentraciones totales de plomo en distintas minas de México.

| | Parral, Chihuahua | Nacozari, Sonora* | Santa Bárbara, Chihuahua* | Zimapán, Hidalgo* | Taxco, Guerrero* |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------|
| Mediana (ppm) | 3,907 | BLD | 6,669 | 2,034 | 1,479 |
| Desviación estándar (ppm) | ±1,769 | | ±5,002 | ±1,152 | ±1,172 |
| Mínimo (ppm) | 752 | | 2,836 | 1,444 | 378 |
| Máximo (ppm) | 5,572 | | 16,681 | 4,056 | 4,932 |

BLD= bajo el límite de detección

*Fuente: Romero *et.al.*, 2008

Utilizando el programa computacional SURFER versión 10, se introdujeron los datos para desarrollar un mapa de iso-concentración y así observar de manera general la situación de los puntos de muestreo con más altas concentraciones de plomo en la zona de estudio.

Como se observa en la Figura 7.10, las zonas en color rojo son las áreas con una concentración elevada de plomo, estando en un rango de 4600 a 6,000 ppm, correspondientes a los puntos de muestreo HP1, HP2, HP3 ubicados en los jales rojos, el punto HP7 ubicado en los jales blancos y los puntos HP17 Y HP18 que se encuentran en los jales nuevos.

Los puntos ubicados en el área de color verde, con un intervalo de 1,000 ppm a menos de 4,600 ppm, siguen estando elevados pero no con tan altas concentraciones de plomo como los del intervalo de color rojo y por último en la zona amarilla se encuentran posicionados aquellos puntos con concentraciones relativamente bajas que están agrupadas en el intervalo de 200 ppm a menos de 1,000 ppm

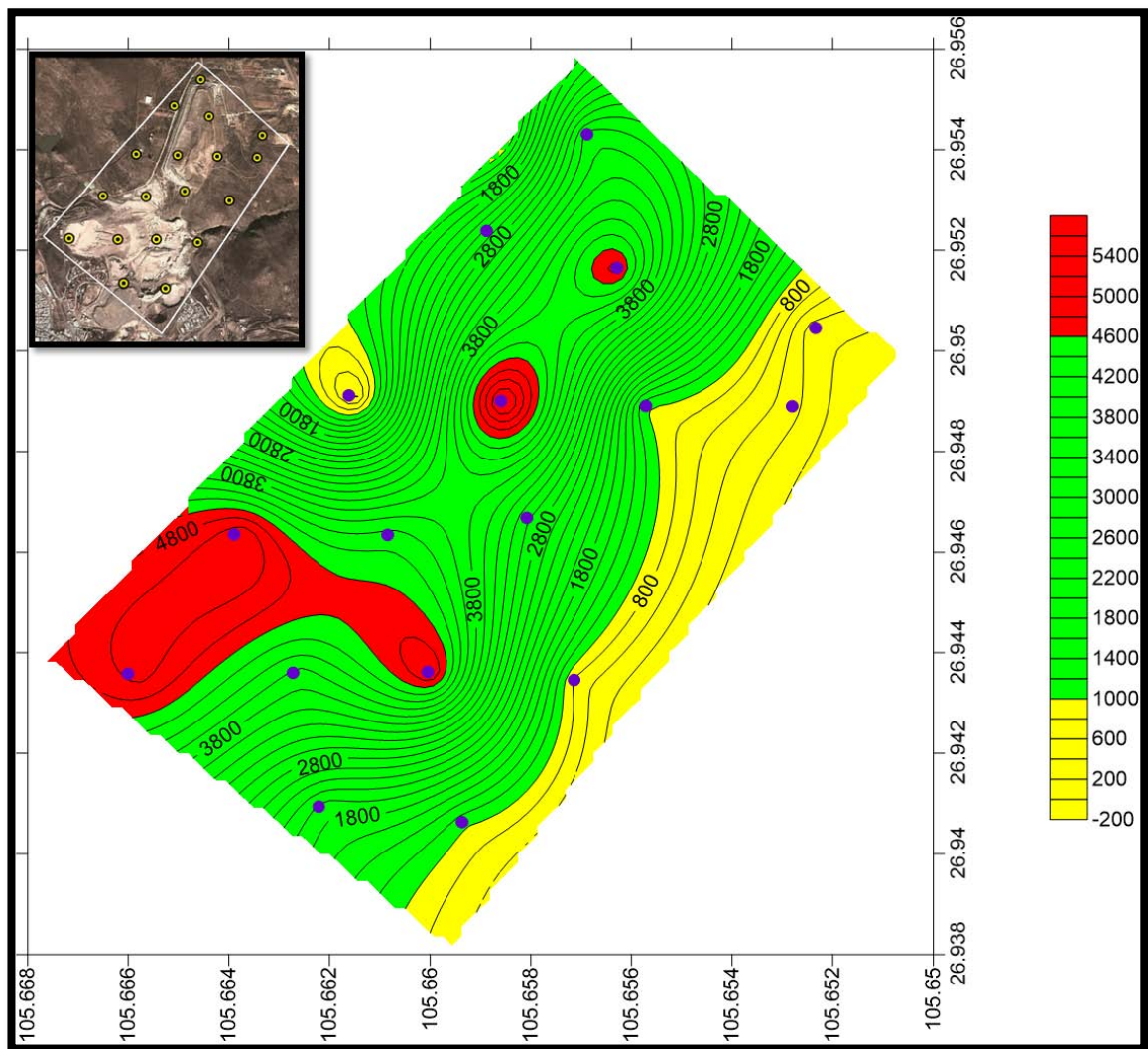


Figura 7.10. Vista general de las concentraciones de plomo de los puntos de muestreo en la zona de estudio (SURFER).



7.5 Espectrofotometría de absorción atómica para el arsénico

Las determinaciones del metaloide arsénico se realizaron en el espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo 3110 a una longitud de onda (λ) de 193.7 nm acoplándole un generador de hidruros, en la Tabla 7.9 se observan los valores obtenidos en la determinación de plomo.

Tabla 7.9. Concentraciones de arsénico en las muestras recolectadas.

| Puntos de muestreo en jales | Concentración promedio* (ppm) | Puntos de muestreo en suelo | Concentración promedio* (ppm) |
|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| HP1 | 476.00 | HP11 | 47.11 |
| HP2 | 159.35 | | |
| HP3 | 206.56 | HP12 | 506.89 |
| HP4 | 154.89 | | |
| HP5 | 377.15 | HP14 | 5.49 |
| HP6 | 509.84 | | |
| HP7 | 299.70 | HP15 | 14.93 |
| HP8 | 7.42 | | |
| HP9 | 36.76 | HPB | 10.44 |
| HP13 | 389.38 | | |
| HP16 | 15.87 | | |
| HP17 | 485.64 | | |
| HP18 | 490.10 | | |

*Promedio de triplicado

De acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio, el valor límite para el arsénico en un área residencial, comercial o forestal es de 22 ppm.

En la Figura 7.11 se pueden observar los puntos muestreados en suelo que rebasan este valor límite. Como se observa en la figura mencionada, son dos puntos de muestreo de suelo los cuales rebasan el límite permitido por la Norma Mexicana antes citada, corresponden a los punto HP11 y HP12, que están 2.14 y 23.04 veces por encima del valor normado; cabe

recalcar, que el valor del punto HP12 es el segundo valor más elevado registrado en la zona de estudio.

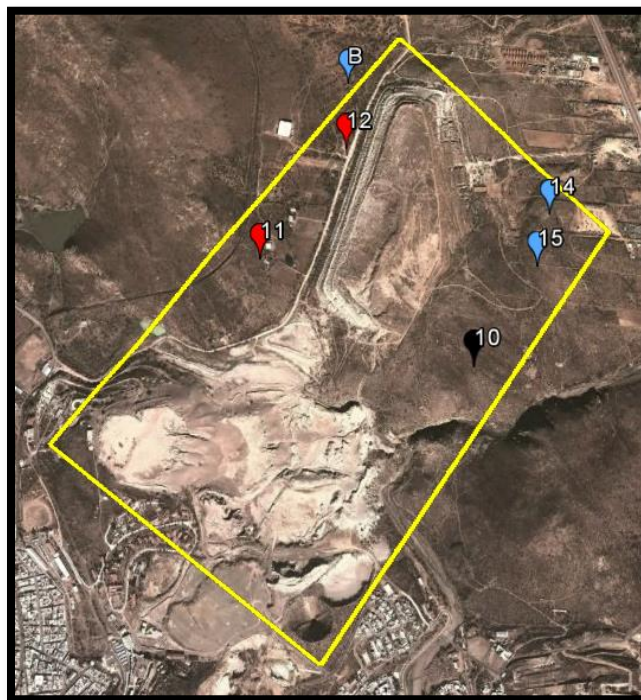


Figura 7.11. Puntos de muestreo en suelo con concentraciones mayores a 22 ppm de arsénico (rojo).

Dado que no existe en la normativa mexicana un valor que indique el máximo permisible para las concentraciones en residuos mineros, los valores obtenidos en los puntos de muestreo en los jales se compararon con un trabajo realizado por Romero y colaboradores en el 2008, donde reportan concentraciones del plomo en distintas minas del territorio mexicano.

En la Tabla 7.10 se efectuó una comparación con las concentraciones totales de arsénico con los jales provenientes de Sonora, Chihuahua, Hidalgo y Guerrero. Como se observa, el valor de la mediana de los jales de Parral, se encuentran casi en la última posición, solo por encima de Nacozari en Sonora; donde Parral está 32.67 veces por arriba del valor. Comparado con los otros sitios que se encuentran por encima de Parral, Taxco está 0.95 veces, Santa Bárbara está 2.8 veces y Zimapán 41.49 veces.



Tabla 7.10. Concentraciones totales de arsénico en distintas minas de México.

| | Parral, Chihuahua | Nacozari, Sonora* | Santa Bárbara, Chihuahua* | Zimapán, Hidalgo* | Taxco, Guerrero* |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------|
| Mediana (ppm) | 300 | 8.9 | 1140 | 12,735 | 585 |
| Desviación estándar (ppm) | ±191 | ±7.5 | ±739 | ±17,188 | ±189 |
| Mínimo (ppm) | 7.4 | 2.6 | 650 | 3,815 | 190 |
| Máximo (ppm) | 510 | 31 | 2,754 | 40,853 | 800 |

*Fuente: Romero *et.al.*, 2008

Utilizando el programa computacional SURFER versión 10, se introdujeron los datos para desarrollar un mapa de iso-concentración y así observar de manera general la situación de los puntos de muestreo con más altas concentraciones de arsénico en la zona de estudio.

Como se observa en la Figura 7.12, las zonas en color rojo son las áreas con una concentración elevada de arsénico, estando en un rango de 420 a 540 ppm, correspondientes a los puntos de muestreo HP1 ubicado en los jales rojos, el punto HP6 ubicado en los jales blancos, los puntos HP17 Y HP18 que se encuentran en los jales nuevos y al punto HP12 ubicado en el área del suelo.

Los puntos ubicados en el área de color verde, con un intervalo de 80 ppm a menos de 420 ppm, siguen estando elevados pero no con tan altas concentraciones de arsénico como los del intervalo de color rojo y por último en la zona amarilla se encuentran posicionados aquellos puntos con concentraciones relativamente bajas que están agrupadas en el intervalo de 0 ppm a menos de 80 ppm

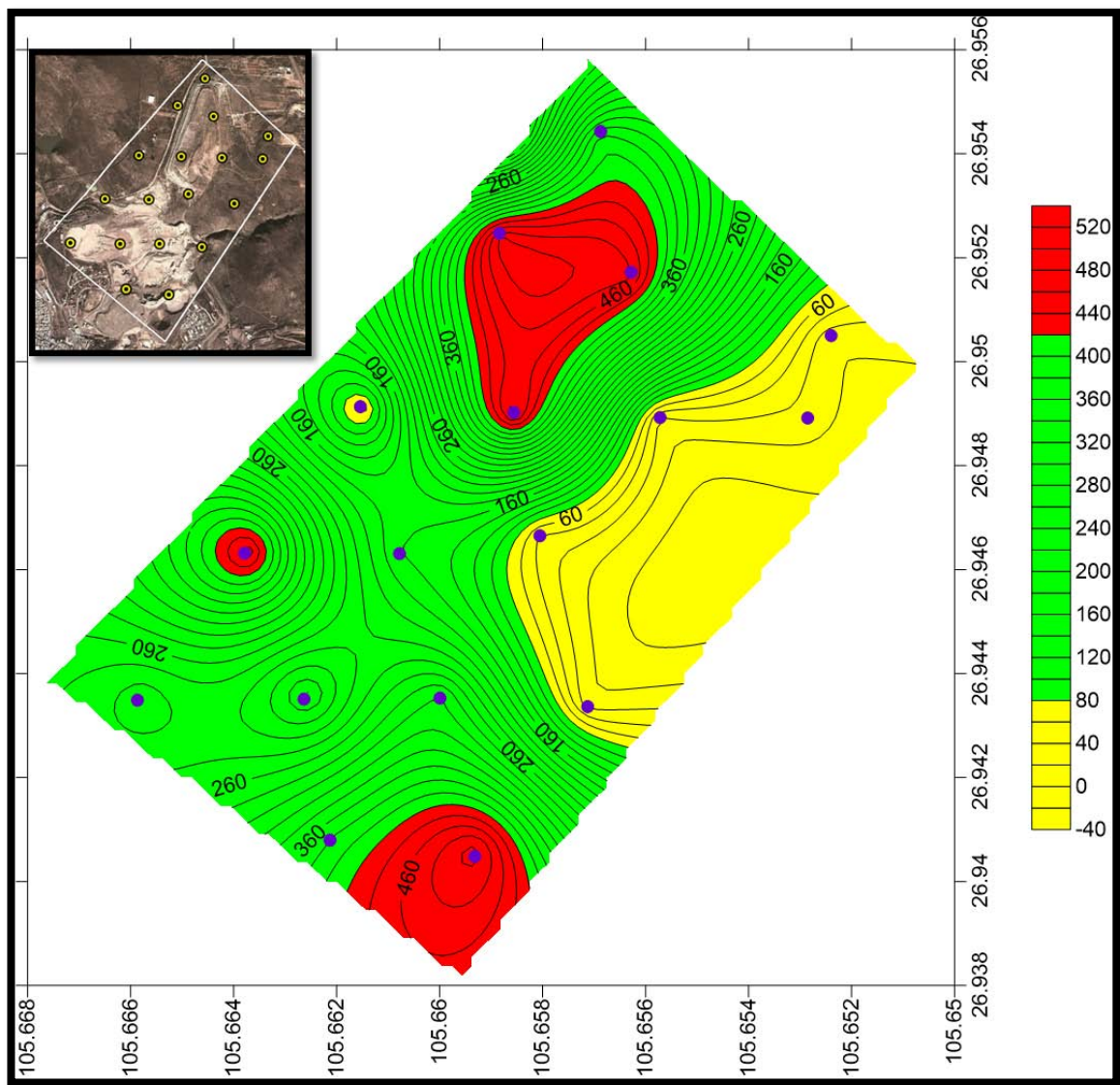


Figura 7.12. Vista general de las concentraciones de arsénico de los puntos de muestreo en la zona de estudio (SURFER).



7.6 Espectrofotometría de Absorción Atómica para el mercurio

Las determinaciones del metal tóxico mercurio se realizaron en el generador de hidruros por vapor frío. En la Tabla 7.11 se observan los valores obtenidos en la determinación de mercurio.

Tabla 7.11. Concentraciones de plomo en las muestras recolectadas.

| Puntos de muestreo en jales | Concentración promedio* (ppm) | Puntos de muestreo en suelo | Concentración promedio* (ppm) |
|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| HP1 | 0.36 | HP11 | 0.18 |
| HP2 | 0.20 | | |
| HP3 | 0.61 | HP12 | 0.25 |
| HP4 | 0.39 | | |
| HP5 | 0.40 | HP14 | 0.04 |
| HP6 | 0.78 | | |
| HP7 | 0.33 | HP15 | 0.39 |
| HP8 | 1.16 | | |
| HP9 | 0.09 | HPB | 0.02 |
| HP13 | 0.40 | | |
| HP16 | 0.29 | | |
| HP17 | 0.39 | | |
| HP18 | 0.13 | | |

De acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio, el valor límite para el mercurio en un área residencial, comercial o forestal es de 23 ppm.

Las concentraciones en los puntos de muestreo tanto en suelo como en jales son relativamente muy bajas y se encuentran muy distantes al límite que proporciona la Norma Oficial Mexicana para la referencia en el suelo. Esto puede deberse a diversos factores que interactuaron en el área de estudio.

7.7 Granulometría

La granulometría es importante en el estudio de residuos mineros, dado que proporciona un valor del tamaño de las partículas en estudio, el tamaño de estas partículas es fundamental dado que influye en la velocidad de oxidación del mineral, de tal manera que ésta se ve favorecida cuando aquél se encuentra finamente dividido, esto es, cuanto mayor es la superficie de reacción expuesta al medio si se tiene el registro de que existen partículas finas, existe una probabilidad mayor de que los minerales o elementos potencialmente tóxicos se liberen con mayor facilidad al ambiente, en cambio, si las partículas son de mayor diámetro, esta probabilidad disminuye un poco (García, 1998).

El análisis granulométrico se realizó en el Departamento de Estratigrafía, Paleontología y Geología Marina, de la Facultad de Geología en la Universidad de Barcelona por medio del Beckman Coulter LS Particle Size Analyzer. Se seleccionaron algunas muestras para determinar el tamaño del diámetro del grano de los residuos mineros presentes en la zona de estudio. Esta selección estuvo basada en aquellos puntos que presentaron una mayor concentración de plomo y arsénico, así como una de valor bajo, en la Figura 7.13 se observan los puntos elegidos.

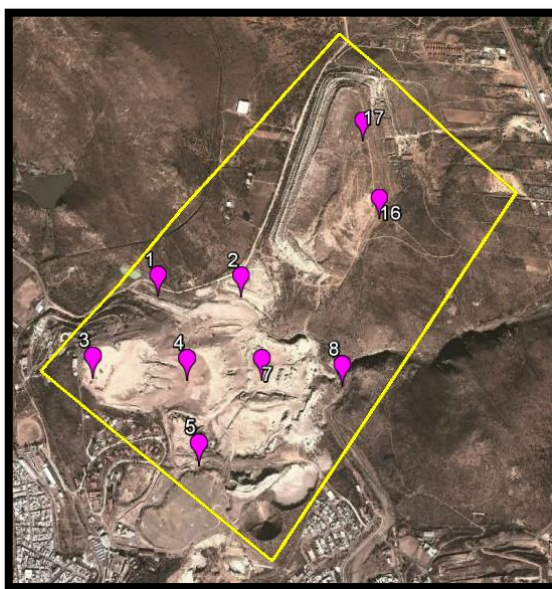


Figura 7.13. Puntos de muestreo seleccionados para la granulometría.



Los valores de arsénico y plomo para el punto HP1 son de 476 y 5,206.77 ppm respectivamente, el análisis de la granulometría arrojó que para esta muestra el diámetro promedio es de 365 μm y una moda de 517.2 μm . Este punto de muestreo se encuentra ubicado en un arroyo que pasa por la presa de jales, por lo que el tamaño de partículas no es tan fino. En la Figura 7.14 se observa el histograma del estudio para esta muestra.

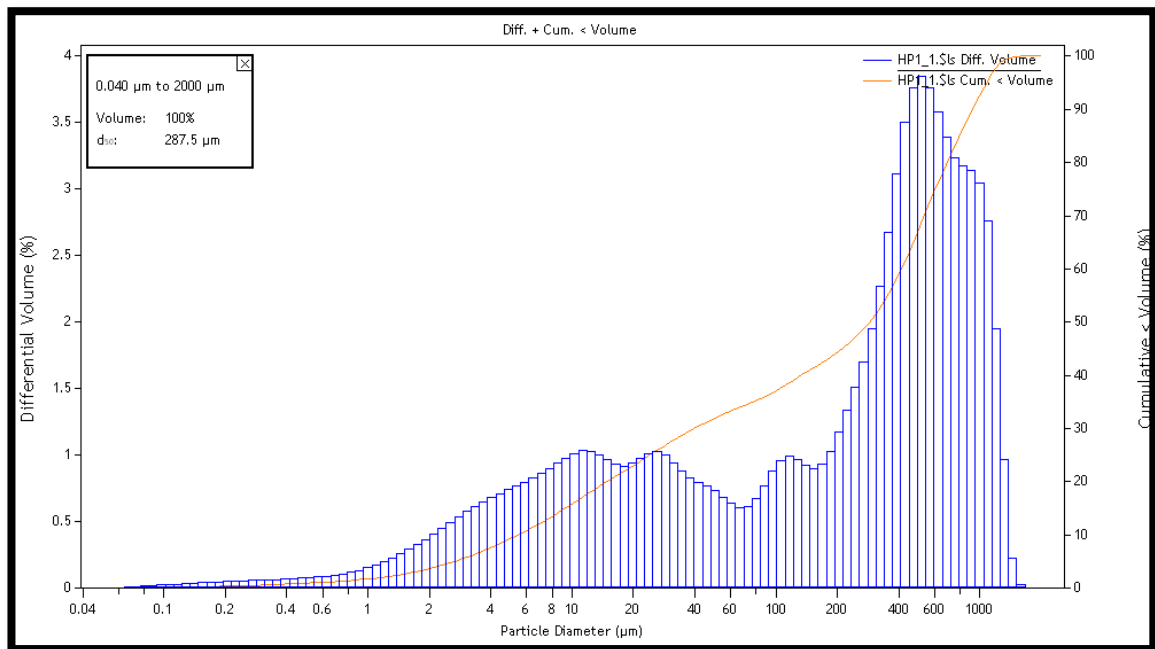


Figura 7.14. Histograma de la granulometría del punto HP1.

En la Figura 7.14, se observa que existen dos zonas con moda, alrededor de las 10 a las 40 micras, y una más grande alrededor de 500 μm como ya se había mencionado anteriormente, esto es debido a que se encuentra una corriente de agua, por lo que se arrastran tanto sedimentos finos como material más grueso, además claro está la adición de jales provenientes de los relieves contiguos por acción del transporte del viento. En la Tabla 7.12, se observa con más detalle las modas de este histograma.



Tabla 7.12. Modas de las partículas de la muestra HP1.

| Diámetro de la partícula μm | % del volumen < |
|--|-----------------|
| 2 | 3.60 |
| 4 | 7.59 |
| 63 | 33.60 |
| 125 | 39.40 |
| 250 | 47.50 |
| 500 | 67.40 |
| 1000 | 92.70 |

Para el punto HP2, los valores de arsénico (159.35 ppm) y plomo (4,288.40 ppm) también se encuentran por encima de los valores normados, el análisis granulométrico para esta muestra proyectó que la media es de 161.4 μm y la moda de 153.8 μm . Este punto de muestreo se encuentra localizado en los denominados jales rojos, pero con la peculiaridad que no se encuentran en el montículo, si no en una planicie en esta área. En la Figura 7.15 se muestra el histograma de esta muestra.

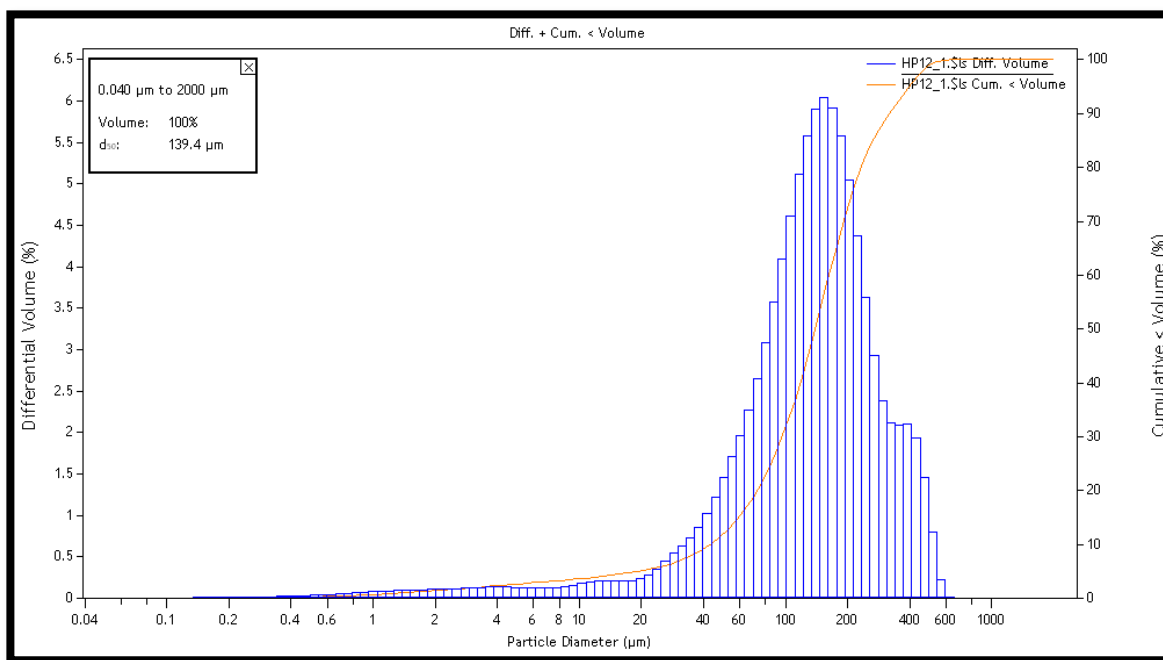


Figura 7.15. Histograma de la granulometría del punto HP2.



Como se observa en la Figura 7.15, existe solo una zona con moda, y se comprueba con los valores de la media y la mediana, que se encuentran en un intervalo entre 150 y 160 micras; esta muestra es de residuo mineral por lo que el tamaño de los diámetros corresponde con que sea un residuo minero y no una combinación con suelo. En la Tabla 7.13, se observa con más detalle las modas de este histograma.

Tabla 7.13. Modas de las partículas de la muestra HP2.

| Diámetro de la partícula μm | % del volumen < |
|--|---------------------------|
| 2 | 1.40 |
| 4 | 2.32 |
| 63 | 16.3 |
| 125 | 43.40 |
| 250 | 82.80 |
| 500 | 99.10 |
| 1000 | 100 |

Para el punto HP3, el valor de arsénico (206.56 ppm) y el del plomo (5,089.64 ppm) se encuentran por encima de los valores normados, el análisis granulométrico para esta muestra dio como resultado que la media es de 314.4 μm y la moda de 356.1 μm . Este punto de muestreo se encuentra localizado en los denominados jales rojos, justo en la planicie superior del cerro de jal, donde se encontraba vegetación. En la Figura 7.16 se muestra el histograma de esta muestra.

Como se observa en la Figura 7.16, existe solo una zona con moda, y se comprueba con los valores de la media y la mediana, que se encuentran en un rango aproximadamente de 300 micras; esta muestra es de residuo mineral, su tamaño es un poco grande debido posiblemente a que estos jales son los más viejos y no tienen tanto refinamiento como los otros dos tipos de jales que se encuentran en la zona de estudio. . En la Tabla 7.14, se observa con más detalle las modas de este histograma.

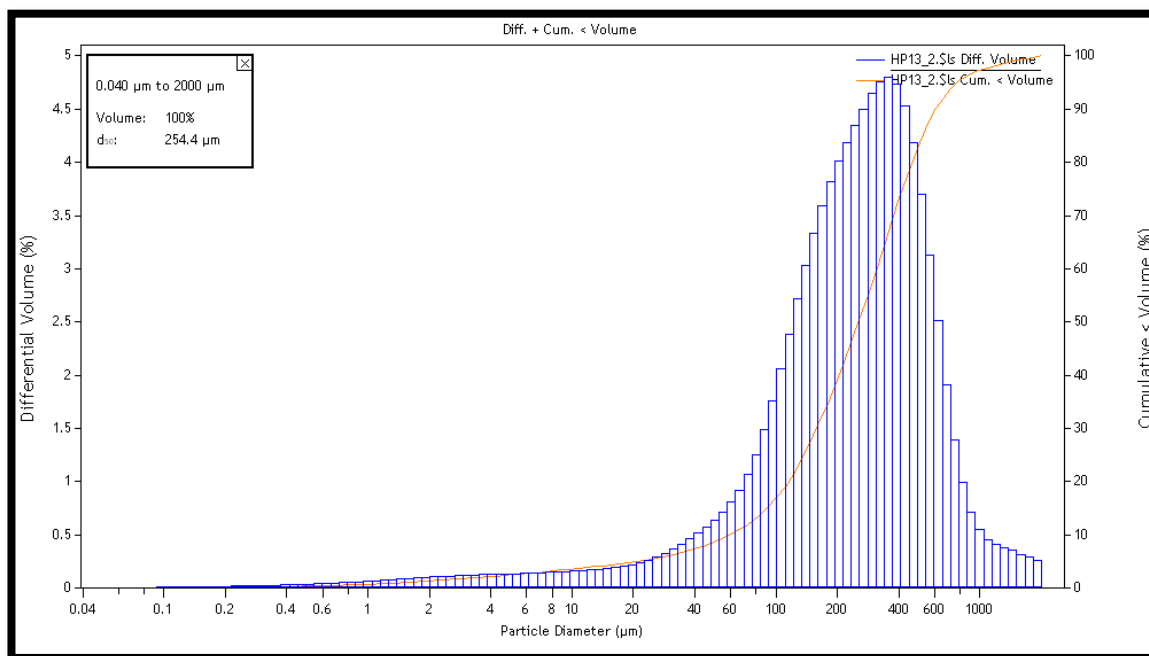


Figura 7.16. Histograma de la granulometría del punto HP3.

Tabla 7.14. Modas de las partículas de la muestra HP2.

| Diámetro de la partícula µm | % del volumen < |
|--|---------------------------|
| 2 | 1.30 |
| 4 | 2.16 |
| 63 | 10.50 |
| 125 | 22.2 |
| 250 | 49.2 |
| 500 | 83.10 |
| 1000 | 97.30 |

Los valores de arsénico y plomo para el punto HP4, sobrepasan los límites permisibles de la norma, 154.89 y 3,906.60 ppm respectivamente, al realizar el estudio de granulometría, se reflejó que el diámetro medio de las partículas es de 251.7 µm y la moda es de 165 µm. Este punto se encuentra ubicado en una planicie media en los jales rojos, en donde está expuesto a la intemperie y a la deposición de partículas transportadas por el viento. En la Figura 7.17 se muestra el histograma de esta muestra.

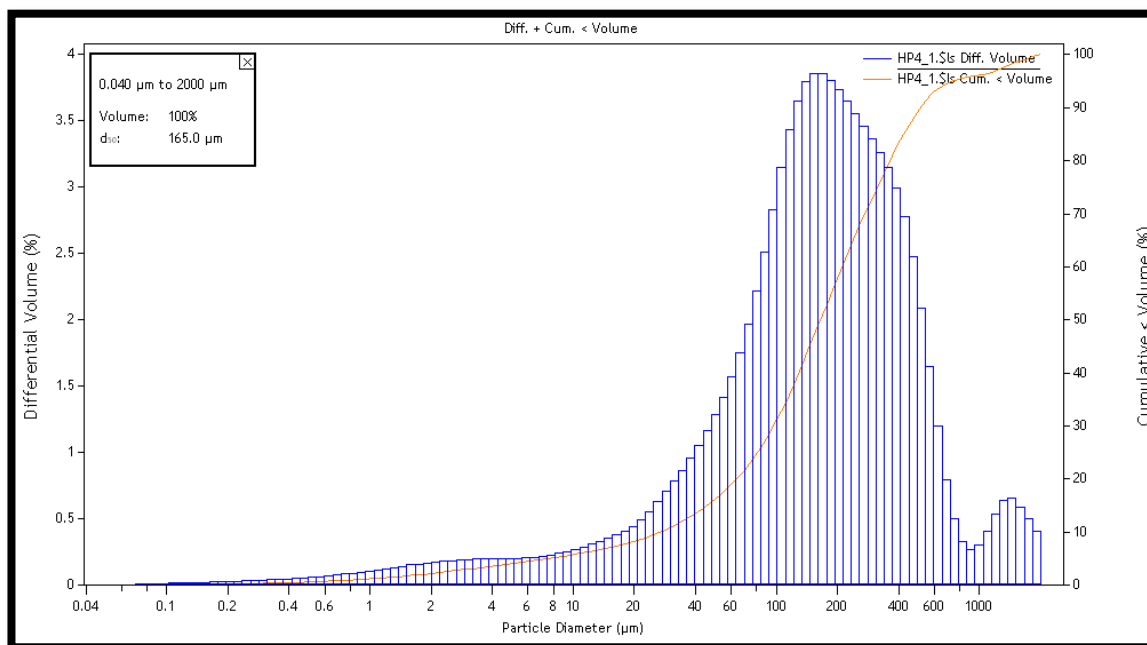


Figura 7.17. Histograma de la granulometría del punto HP4.

Como se observa en la Figura 7.17, existe una gran región donde está la moda registrada alrededor de 160 micras, pero también se registra una pequeña moda después de 1000 micras, esto podría ser debido a que en esta zona de muestreo, se encontraba a escasos metros del costado del jal rojo, por lo que los deslaves en esta zona son muy comunes, arrastrando tanto material fino como material grueso. En la Tabla 7.15, se observa con más detalle las modas de este histograma.

Tabla 7.15. Modas de las partículas de la muestra HP4.

| Diámetro de la partícula µm | % del volumen < |
|------------------------------------|---------------------------|
| 2 | 2.19 |
| 4 | 3.59 |
| 63 | 19.80 |
| 125 | 38.70 |
| 250 | 66.60 |
| 500 | 89.40 |
| 1000 | 96.10 |



El punto HP5, se encuentra ubicado en los denominados jales blancos, el valor que se tiene registrado de arsénico es de 377.15 ppm y de plomo es de 1,873.62 ppm. La granulometría de la muestra mostró que el diámetro medio de las partículas es de 307.5 μm y la moda es de 390.9 μm . Este punto se encuentra localizado cerca de las instalaciones de Mina La Prieta, en donde el acceso a las personas no se encuentra regulado. En la Figura 7.18 se muestra el histograma de esta muestra.

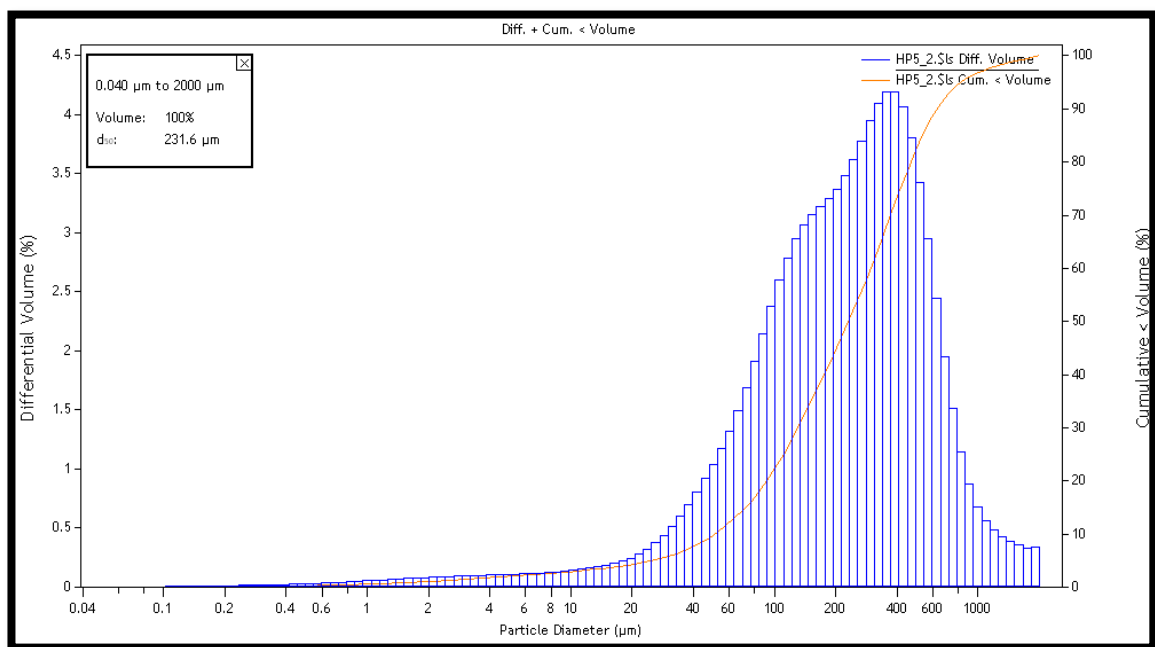


Figura 7.18. Histograma de la granulometría del punto HP5.

Como se observa en la Figura 7.18, se muestran dos áreas con cierta moda que tiende a 400 micrómetros, estas áreas no se encuentran muy diferenciadas, por lo que se asume que la muestra es bastante homogénea en el tamaño de partículas, y a esto se agrega que en el área donde se encuentra ubicado el punto, existe un pequeño manejo del suelo y de los jales para realizar el estacionamiento de las instalaciones de la feria del pueblo. En la Tabla 7.16, se observa con más detalle las modas de este histograma.



Tabla 7.16. Modas de las partículas de la muestra HP5.

| Diámetro de la partícula μm | % del volumen < |
|--|-----------------|
| 2 | 1.09 |
| 4 | 1.79 |
| 63 | 12.80 |
| 125 | 28.70 |
| 250 | 52.90 |
| 500 | 82.60 |
| 1000 | 96.80 |

El punto HP7, se encuentra localizado en los jales nuevos sobre una corriente de agua que atraviesa estos jales y desemboca en el Rio Parral, los valores de plomo y de arsénico se encuentran elevados (5,040.03 ppm y 299.70 ppm respectivamente). El resultado granulométrico para este punto de muestreo fue que la media de diámetro oscila por las 252.6 μm y la moda por las 127.6 μm . En la Figura 7.19 se observa el histograma del estudio para esta muestra.

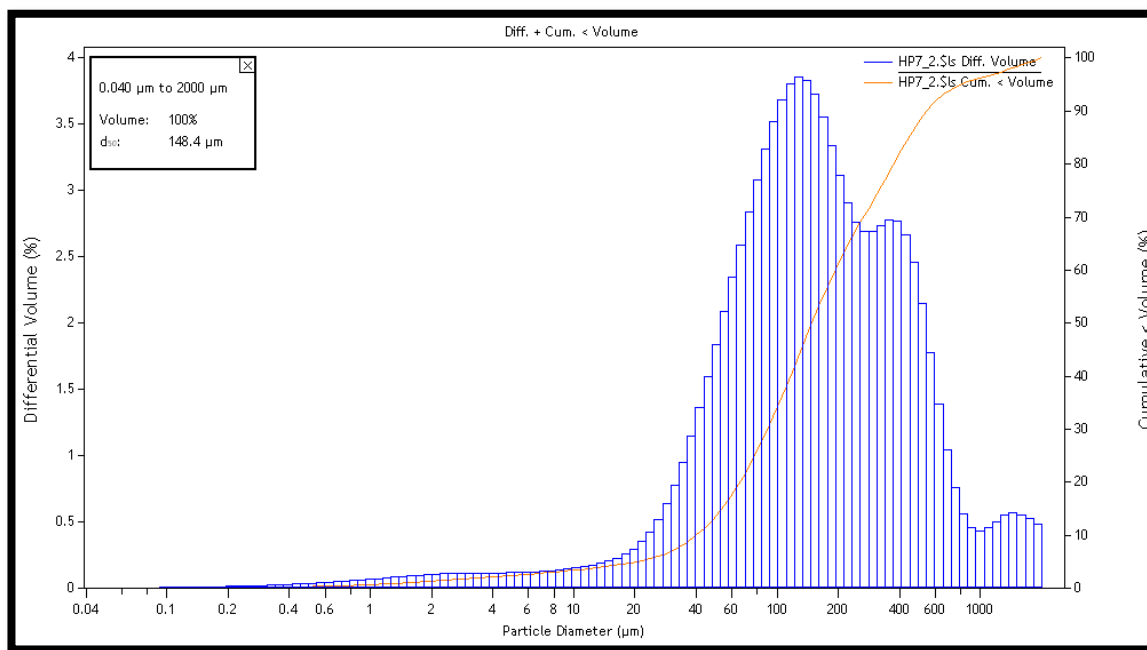


Figura 7.19. Histograma de la granulometría del punto HP7.

Aunque se encuentren los jales cercanos a la corriente de agua, las partículas no resultan ser muy gruesas a excepción de un grupo de partículas que se encuentran por encima de 400



μm y otra pequeña área por arriba de $1000 \mu\text{m}$. Estas dos zonas de mayor tamaño, corresponden al arrastre que el agua realiza en la zona, llevándose con ella las partículas finas y dejando los gruesos en el camino, aun así es un área donde los valores de plomo y arsénico son elevados, lo que hace suponer que no existe arrastre de estos contaminantes al Río Parral. En la Tabla 7.17, se observa con más detalle las modas de este histograma.

Tabla 7.17. Modas de las partículas de la muestra HP7.

| Diámetro de la partícula μm | % del volumen < |
|--|---------------------------|
| 2 | 1.32 |
| 4 | 2.15 |
| 63 | 18.90 |
| 125 | 42.90 |
| 250 | 68.20 |
| 500 | 88.10 |
| 1000 | 96.20 |

El punto HP8, fue considerado en el estudio granulométrico, dado que se encontraba entre los puntos de muestreo con valor bajo en el contenido de arsénico 7.42 ppm y un poco elevado en plomo (751.69 ppm). Sin embargo en comparación con los demás puntos de muestreo, este punto se encuentra con concentraciones bajas de estos elementos, además de que la zona en donde está ubicado es relevante dado que está en la rívera del Río Parral. La media del diámetro de las partículas en esta muestra es de $216.9 \mu\text{m}$ y la moda de $185.4 \mu\text{m}$. En la Figura 7.20 se observa el histograma del estudio para esta muestra.

Como se observa en la figura anterior, los diámetros se encuentran entre $100 \mu\text{m}$ y $500 \mu\text{m}$, a este tamaño de diámetro se le puede considerar fino. Esto concuerda con que en este sitio se encuentren depositados sedimentos del arrastre del Río Parral durante la época de lluvia en la zona, además si se observa también existe una pequeña franja entre $2 \mu\text{m}$ y $20 \mu\text{m}$, las cuales son partículas ultra finas. En la Tabla 7.18, se observa con más detalle las modas de este histograma.

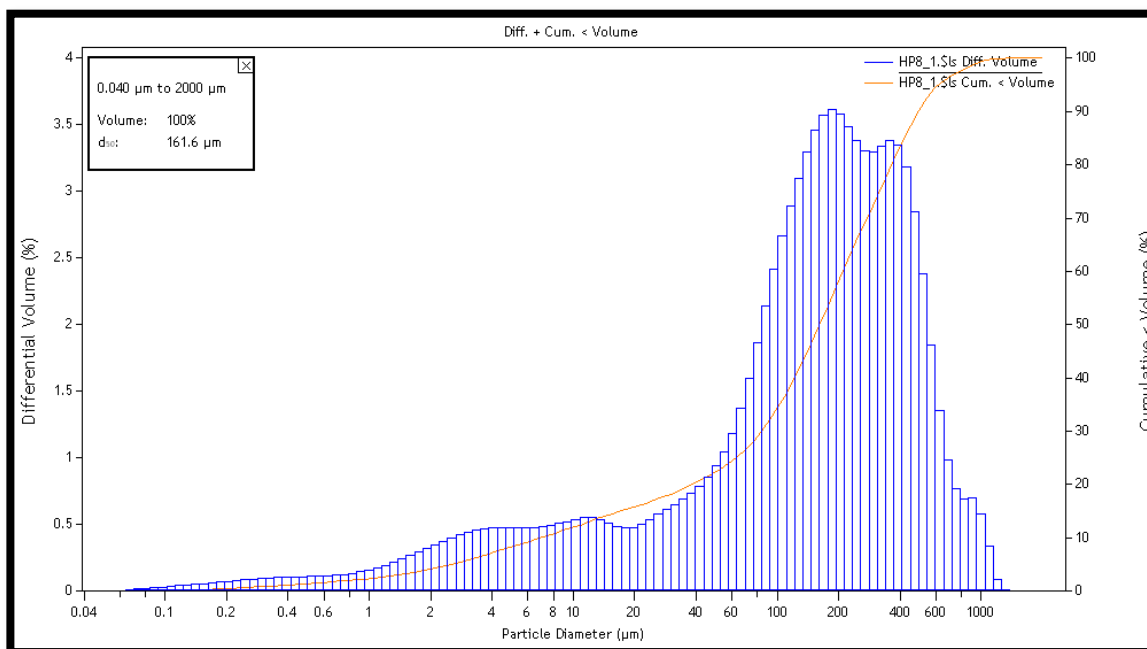


Figura 7.20. Histograma de la granulometría del punto HP8.

Tabla 7.18. Modas de las partículas de la muestra HP8.

| Diámetro de la partícula µm | % del volumen < |
|------------------------------------|---------------------------|
| 2 | 4.08 |
| 4 | 7.17 |
| 63 | 25.0 |
| 125 | 40.90 |
| 250 | 66.50 |
| 500 | 90.60 |
| 1000 | 99.30 |

En el punto HP16, el valor del plomo se encuentra por encima del valor normado con un valor de 1,009.22 ppm, mientras que el valor del arsénico está por debajo de su valor normado con un valor de 15.82 ppm. El análisis de la granulometría de este punto de muestreo dio como resultado una media del diámetro de partículas de 370 µm y una moda de 471.1 µm. Este punto de muestreo se encuentra localizado en los denominados jales nuevos, en la ladera este del montículo el cual se encuentra cubierto por una capa de tierra a medida de contención. En la Figura 7.21 se muestra el histograma de esta muestra.

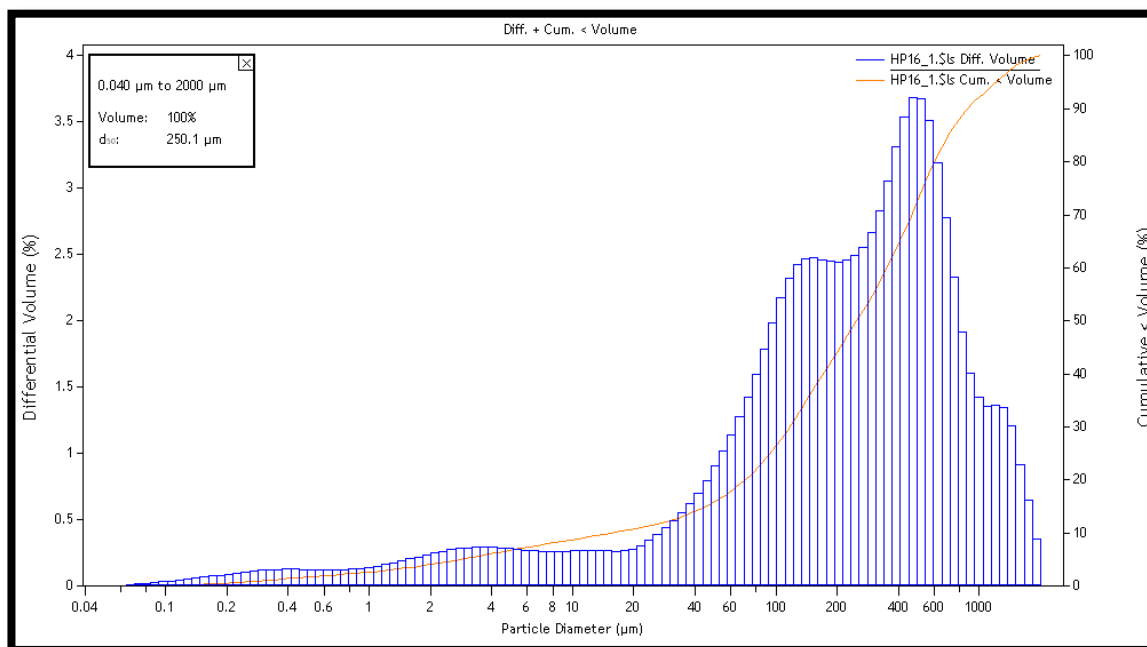


Figura 7.21. Histograma de la granulometría del punto HP16.

Gráficamente se puede observar en la Figura 7.21, como el área donde empiezan a acumularse la mayoría de los diámetros oscila entre 100 μm y 600 μm , en este punto en particular, los residuos mineros estaban cubiertos por una capa de tierra, como se mencionó anteriormente, por lo que la granulometría corresponde tanto a residuos mineros y a suelo de cubierta, ya que al pasar 400 micrómetros, se podría considerar una muestra gruesa, la cual corresponde principalmente al suelo. En la Tabla 7.19, se observa con más detalle las modas de este histograma.

Tabla 7.19. Modas de las partículas de la muestra HP16.

| Diámetro de la partícula μm | % del volumen < |
|--|---------------------------|
| 2 | 4.00 |
| 4 | 6.05 |
| 63 | 18.40 |
| 125 | 31.70 |
| 250 | 50.0 |
| 500 | 72.90 |
| 1000 | 92.20 |



El último punto es el HP17, este punto se encuentra localizado en los jales nuevos, específicamente en la meseta que se forma en la parte superior del cerro de jales; Este punto es uno de los que presenta una alta concentración de los metales a analizar, de plomo tiene un valor de 4,900.90 ppm y de arsénico 485.64 ppm. La granulometría dio como resultado una media en el diámetro de las partículas de 154 μm y una moda de 140.1 μm . En la Figura 7.22 se observa el histograma del estudio para esta muestra.

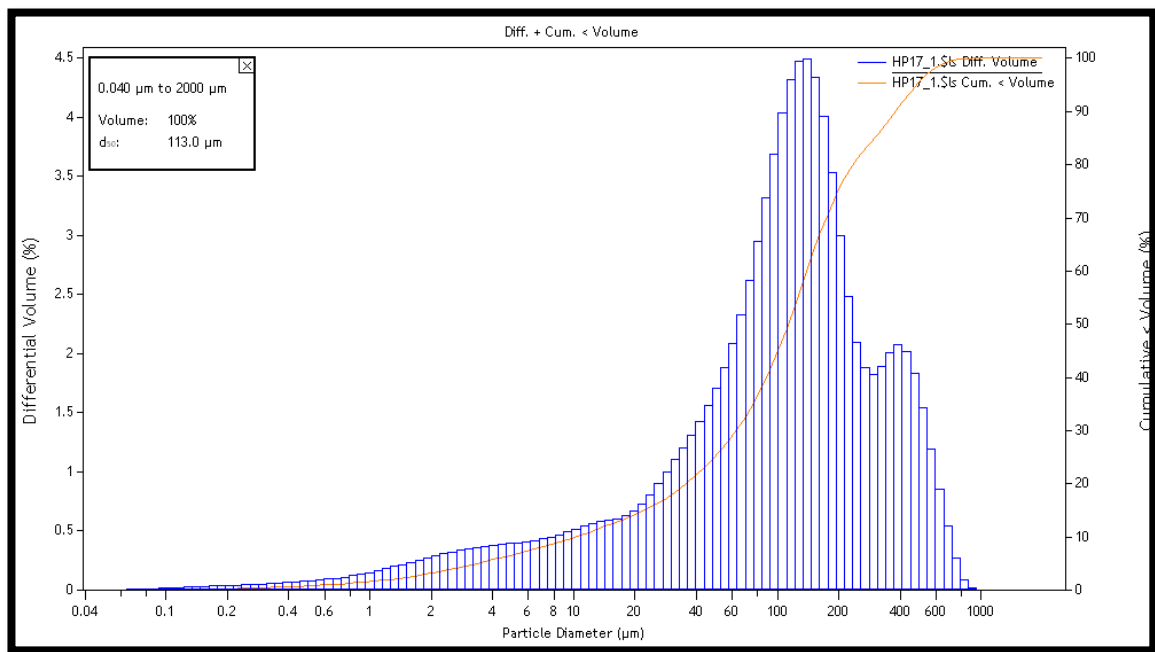


Figura 7.22. Histograma de la granulometría del punto HP17.

Como se observa en la Figura 7.22, existen dos áreas en el histograma, la de mayor tamaño que se encuentra entre los valores de 100 micras y 200 micras aproximadamente, este producto fino corresponde al jal acumulado en este punto de muestreo, mientras que el área que se encuentra entre 300 μm y 500 μm aproximadamente, es la cubierta de suelo que se encuentra en estos jales como modo de protección y contención de los mismos. . En la Tabla 7.20, se observa con más detalle las modas de este histograma.



Tabla 7.20. Modas de las partículas de la muestra HP17.

| Diámetro de la partícula μm | % del volumen < |
|--|---------------------------|
| 2 | 3.20 |
| 4 | 5.70 |
| 63 | 30.10 |
| 125 | 54.70 |
| 250 | 81.30 |
| 500 | 95.70 |
| 1000 | 100 |

7.8 Difracción de Rayos X

Las muestras sometidas al estudio granulométrico (Figura 7.13), también fueron seleccionadas para realizar un análisis de difracción de rayos X (XRD). Esta técnica tiene como objetivo identificar los principales minerales y proporcionar un análisis semi-cuantitativo de la abundancia mineral presente en la muestra a analizar (Brough *et.al.* 2013).

El análisis mineralógico, para las muestras seleccionadas se realizó por medio de un difractómetro de geometría Bragg-Brentano PANalytical X'Pert system (monocromador de grafito, rendija automática, radiación $K\alpha$ del Cu a $\lambda = 1.54061 \text{ \AA}$, potencia de trabajo 45 kV - 40 mA, rango de barrido $4-100^\circ 2\theta$ con paso de $0.017^\circ 2\theta$ y tiempo de medida de 50 s). Para la identificación y valoración semicuantitativa de las fases se ha utilizado el programa XPert Graphics Identify Philips.

En la Tabla 7.21, se muestran los porcentajes de los componentes minerales presentes en las nueve muestras analizadas por la técnica de XRD, como se observa, un gran porcentaje de todas las muestras corresponde al cuarzo, el cual es un mineral natural presente en el suelo y por consiguiente en los residuos mineros.

Los resultados de estas muestras, arrojan que se encuentran entre ellas algunos minerales causantes del drenaje ácido de mina, el cual se forma por la oxidación natural de los minerales sulfurosos provenientes del proceso minero cuando son expuestos al aire y al agua, el cual produce un gran descenso en el pH de las aguas y esto hace que aumente la solubilidad de los elementos potencialmente tóxicos como lo son los metales pesados; estos minerales son



por lo regular aquellos que contienen hierro y azufre en su estructura química, el único mineral con estas características es la Piritita (FeS_2); aun así, el porcentaje que este mineral en los resultados ronda entre 1% a un 3% y no se encuentran presentes en todos los puntos de muestreo analizados.

Así mismo, como están presente este mineral causante del drenaje ácido de mina, también existen los minerales tampón o amortiguadores, que ayudan a neutralizar la acción del otro. Estos a su vez se dividen en tres principales grupos, los carbonatos, hidróxidos y silicatos; dentro de los carbonatos tenemos presentes en las muestras analizadas a la Calcita (CaCO_3), que se encuentra en un porcentaje bajo y no en todas las muestras; en el grupo de los hidróxidos no se encuentran minerales reflejados en los resultados de la XRD, caso contrario a los silicatos, que se encuentran en una gran diversidad presentes en las muestras analizadas, estas son la Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), la Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), la Moscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), la Sericita ($(\text{K,Na,Ca})\text{Al}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{11}$) y los feldespatos potásicos (KAlSi_3O_8)

Por otro lado, también se registró que existe el espato de flúor o la Fluorita (CaF_2), la cual es una fuente importante de flúor y se encuentra en una porción considerable en varias muestras analizadas.

Tabla 7.21. Caracterización mineralógica de las muestras seleccionadas.

| Mineral | Fórmula Química | Porcentajes (%) | | | | | | | | |
|----------------|--|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | | HP 1 | HP 2 | HP 3 | HP 4 | HP 5 | HP 7 | HP 8 | HP 16 | HP 17 |
| Albita | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ | 15 | 5 | 9 | 6 | --- | 4 | 20 | 20 | --- |
| Alunita | $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ | --- | 1 | 2 | --- | --- | --- | 1 | 1 | --- |
| Barita | BaSO_4 | --- | --- | 1 | 1 | --- | 1 | --- | --- | --- |
| Calcita | CaCO_3 | 2 | 2 | --- | --- | 7 | 1 | 1 | 3 | 2 |
| Caolinita | $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ | 1 | 11 | 5 | 6 | --- | 19 | 3 | | 1 |
| Cuarzo | SiO_2 | 51 | 43 | 35 | 45 | 69 | 52 | 37 | 62 | 70 |
| Fluorita | CaF_2 | --- | 9 | 7 | 6 | 9 | 9 | 1 | --- | 10 |
| Jarosita | $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ | --- | 1 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Melanterita | $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | --- | 2 | 1 | 3 | --- | --- | --- | --- | --- |
| Moscovita | $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 29 | --- | --- |
| Piritita | FeS_2 | --- | 1 | --- | --- | 2 | --- | --- | --- | 1 |
| Plumbojarosita | $\text{Pb}(\text{Al}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2)_2$ | --- | --- | 1 | 1 | --- | 1 | --- | --- | --- |
| Sericita | $(\text{K,Na,Ca})\text{Al}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{11}$ | --- | 12 | 26 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Yeso | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 5 | 1 | 3 | 3 | 6 | 2 | 1 | 1 | --- |



7.9 Fluorescencia de Rayos X

La técnica de fluorescencia de rayos X (XRF) es utilizada comúnmente para determinar las concentraciones de los elementos comprendidos entre el flúor y el uranio, denominados elementos menores, con esta técnica la muestra no es digerida para su posterior análisis, sino por el contrario se utiliza la muestra en estado seco. Para la determinación de los elementos minoritarios se han elaborado pastillas, utilizando elvacite como aglomerante y presión uniaxial. Se ha utilizado un espectrómetro secuencial de rayos-X Phillips PW 2400.

Los resultados de las nueve muestras analizadas, las mismas que para XRD y granulometría, se pueden apreciar en el ANEXO 4. Al realizar una comparación con los datos obtenidos previamente por medio de la espectrofotometría de absorción atómica, se pueden observar en la Tabla 7.22 que las diferencias registradas por la técnica de XRF son muy notorias, dado que los resultados muestran que las concentraciones de las muestras son más elevadas que las detectada por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica (EAA).

Tabla 7.22. Comparación de los resultados obtenidos en EAA vs XRF para arsénico.

| Muestra | EAA (ppm) | XRF (ppm) | Porcentaje de diferencia |
|---------|-----------|-----------|--------------------------|
| HP1 | 476.00 | 528.9 | 11 |
| HP2 | 159.35 | 545.5 | 242 |
| HP3 | 206.56 | 295 | 43 |
| HP4 | 154.89 | 223.3 | 44 |
| HP5 | 377.15 | 476.4 | 26 |
| HP7 | 299.70 | 541.8 | 81 |
| HP8 | 7.42 | 96.7 | 1,203 |
| HP16 | 15.87 | 107.5 | 577 |
| HP17 | 485.64 | 767.2 | 58 |

Lo anterior, puede deberse a varios factores que pudieron influir en la determinación de la concentración de arsénico en las muestras, como lo es el tratamiento que se le dio a las muestras y la sensibilidad de los equipos de detección. Los puntos de muestreo, se encuentran



ubicados en la matriz del contaminante, es decir los jales, y como se muestra en la Tabla 7.22, los valores de la XRF están en conjunto un 58% por encima de los reportados en EAA.

En la Tabla 7.23, se muestra la comparación entre los resultados de las técnicas de EAA y XRF para el plomo. Como se observa en esta tabla, al contrario que en el caso del arsénico, las concentraciones de plomo detectadas por la XRF son bajas a las detectadas por la EAA.

Tabla 7.23. Comparación de los resultados obtenidos en EAA vs XRF para plomo.

| Muestra | EAA (ppm) | XRF (ppm) | Porcentaje de diferencia |
|---------|-----------|-----------|--------------------------|
| HP1 | 5,206.77 | 2,276 | 129 |
| HP2 | 4,288.40 | 3,807 | 13 |
| HP3 | 5,089.64 | 4,727 | 8 |
| HP4 | 3,906.60 | 2,664 | 47 |
| HP5 | 1,873.62 | 3,484 | 86 |
| HP7 | 5,040.03 | 4,060 | 24 |
| HP8 | 751.69 | 579.5 | 30 |
| HP16 | 1,009.22 | 451.2 | 124 |
| HP17 | 4,900.90 | 3,331 | 47 |

De igual manera, aquí también estuvieron involucrados los mismos factores que determinaron las diferentes concentraciones para el arsénico, pero al tratarse de dos elementos diferentes, su comportamiento es otro. Aun así, las concentraciones de plomo detectadas por EAA se encuentran en conjunto un 47% por encima de las determinadas en XRF.

Para el caso del mercurio, la comparación no es necesaria dado que la XRF no detectó ninguna ppm de este metal, por lo que se asume que su concentración o es nula o no detectable por los sensores de los equipos utilizados.

Algunos autores señalan al arsénico, cadmio, cromo, plomo, y zinc como elementos potencialmente tóxicos (EPT) (O'Neill et.al., 2015; Qasim y Motelica-Heino, 2014; Romero et.al., 2014), los cuales tienen un especial interés para determinar qué tipo de mineral se encuentra en la zona de estudio y cómo se va a comportar en el medio ambiente, en la Tabla



7.24, se muestran los máximos, mínimos, la media y la desviación estándar de estos elementos detectados mediante la XRF.

Tabla 7.24. Datos estadísticos descriptivos de la concentración total de los EPT.

| | As (ppm) | Cu (ppm) | Cd (ppm) | Pb (ppm) | Zn (ppm) |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mínimo | 96.7 | 42.7 | 9.5 | 451.2 | 778.4 |
| Máximo | 767.2 | 768.0 | 68.1 | 4726.7 | 11381.4 |
| Media | 398.0 | 347.1 | 40.2 | 3175.3 | 5899.2 |
| SD | 228.7 | 250.3 | 21.7 | 1625.2 | 3571.2 |

Al realizar una correlación entre los elementos potencialmente tóxicos de interés en el trabajo, arsénico y plomo, con los restantes elementos potencialmente tóxicos, se obtuvo que una mejor correlación existía con el zinc para ambos elementos como se muestra en las Figuras 7.23 y 7.24, lo que da a entender que en este yacimiento existe un mayor grado de un mineral de zinc, plomo y/o arsénico, de ahí su concentración tan abundante en los resultados.

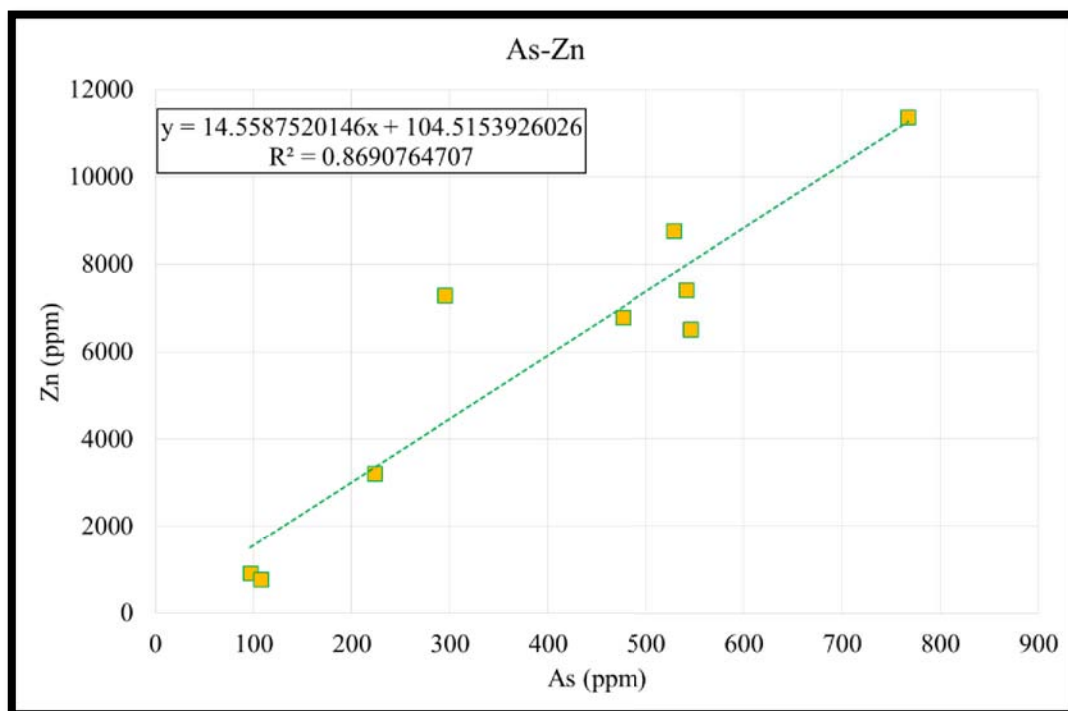


Figura 7.23. Correlación entre el arsénico y el zinc.

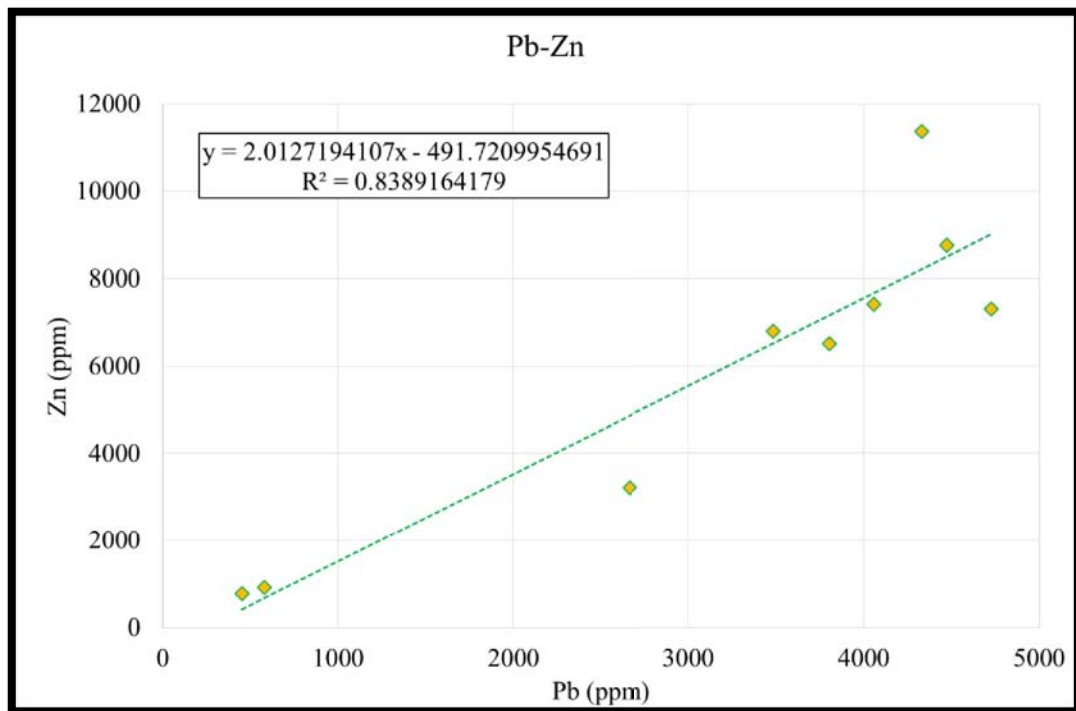


Figura 7.24. Correlación entre el plomo y el zinc.

7.10 pH en pasta

Una vez efectuadas las determinaciones de las concentraciones de los elementos mediante las diferentes técnicas (EAA, XRD, XRF), se le realizó un procedimiento no destructivo a las muestras para determinar el potencial de acidez que presentan.

Con la metodología del pH en pasta, se puede estimar si una muestra es capaz de producir drenaje ácido y liberar sustancias tóxicas al ambiente. Para dicho método, se prepararon 5 gramos de muestra triturada hasta 100 μm , a la cual se le añadió 10 ml de agua destilada, posteriormente se agitó durante 10 minutos y se procedió a medir el pH, en la Tabla 7.25 se muestran los pH obtenidos de las muestras.



Tabla 7.25. Valores de pH en pasta de los jales.

| Muestra | pH |
|----------------|-----------|
| HP1 | 8.07 |
| HP2 | 7.56 |
| HP3 | 7.37 |
| HP4 | 7.46 |
| HP5 | 8.17 |
| HP7 | 8.10 |
| HP8 | 8.23 |
| HP16 | 7.94 |
| HP17 | 7.25 |

De acuerdo con el pH registrado en la tabla anterior, las muestras analizadas no presentan un riesgo inmediato para liberar elementos potencialmente tóxicos, dado que en el medio donde se encuentran los minerales se mantiene de una forma alcalina.

Además, estos resultados coinciden con lo arrojado por la difracción de rayos x, donde la mayoría de los minerales presentes en las muestras resultaron ser minerales amortiguadores, por lo que estos minerales lo que están haciendo es controlando el pH para no permitir que se genere el drenaje ácido de mina.



8 MEDIDAS DE MITIGACIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en las diversas técnicas instrumentales realizadas a las muestras recolectadas de la presa de jales de Mina La Prieta, se enlistan algunas recomendaciones como medidas de mitigación para disminuir el riesgo en la zona.

1. Restringir el acceso a personas ajenas a los jales, disminuirá la probabilidad de daños a la salud asociados a la exposición por metales pesados presentes en la zona de los jales; así mismo, a los trabajadores o personas que vivan aledañas a estos residuos, se les debe proporcionar pláticas informativas sobre el riesgo de vivir y laborar en la zona.
2. Dejar de movilizar los jales, dado que se está realizando una recuperación de oro y plata en los jales, pero no se le efectúa ningún tratamiento a los residuos generados, por lo que la acción que se está llevando a cabo es movilización de jales, lo cual consiste en desplazar un contaminante de un lugar a otro lugar no contaminado.
3. Obtenida la caracterización mineralógica y química de la zona, realizar un estudio para determinar la posible migración vertical de los metales pesados en la presa de jales de mina La Prieta.
4. Efectuar un estudio enfocado en un tratamiento físico a los residuos mineros, como solidificación-estabilización, para disminuir su peligrosidad, tomando en cuenta todos los factores asociados que el tratamiento presente.
5. Desarrollar un estudio en la vegetación nativa de la zona, para obtener la posible asimilación de metales pesados y una vez tratados los jales, plantar la vegetación con el objetivo de hacer un tratamiento más fino en el suelo contaminado.
6. Realizar un estudio del posible drenaje ácido de mina que se puede llegar a producir, tomando en cuenta que las capas superficiales están exentas de tal efecto, pero no se tiene conocimiento de en qué estado se encuentran las capas inferiores y su posible degradación y liberación de elementos potencialmente tóxicos al ambiente
7. Vigilar periódicamente la composición química y mineralógica de los jales, para prevenir posibles riesgos al ambiente.



8. Desarrollar un estudio de la geo-disponibilidad y la biodisponibilidad de los elementos estudiados.
9. Realizar un estudio enfocado en la dispersión de los contaminantes hacia la mancha urbana y determinar el potencial riesgo y peligro en el que viven las personas de Hidalgo del Parral, Chihuahua.



9 CONCLUSIONES

- Inicialmente se diseñó un muestreo preliminar exploratorio de tipo superficial en la zona de Hidalgo del Parral, Chihuahua, tomando en cuenta la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006, dando un total de 18 muestras contando un blanco que estuviera afuera del límite de la zona de estudio. El muestreo se efectuó de forma satisfactoria en un 95% de su totalidad, dado que se eliminó un punto de muestreo por no poder acceder a la profundidad del suelo requerida.

- Así mismo, se realizó el análisis de las muestras mediante técnicas instrumentales y métodos obteniendo los siguiente:
 - a. La Espectrofotometría de absorción atómica mostró que para las muestras de suelo adyacente a los jales que se encuentran dentro de la zona de estudio, las concentraciones de arsénico existen dos puntos que sobrepasan el límite normado, 2.14 y 23.04 veces, para el estudio del plomo solo un punto de muestreo rebasa el límite de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 el cual es rebasado hasta 6.29 veces y para el mercurio, se concluye que no existe contaminación en los puntos de muestreo del suelo, dado que las concentraciones no sobrepasan el valor normado. Por otro lado, la concentración de arsénico presente en los puntos de muestreo de los jales en comparación con otros sitios mineros analizados, se encuentra hasta 41 veces por debajo de las concentraciones totales que reportan, mientras que la concentración total de plomo en la zona de estudio, al compararlas con los mismos sitios, se encuentra hasta 1.64 veces por arriba de las concentraciones totales reportadas.
 - b. Se realizó el análisis de granulometría a ciertas muestras seleccionadas, concluyendo que el tamaño de los granos de minerales presentes en la zona de estudio es muy susceptible para que estas partículas liberen al ambiente elementos potencialmente tóxicos.
 - c. Con la técnica de difracción de rayos X, se identificaron a los minerales presentes en la zona de estudio, dando en su mayoría a minerales amortiguadores, más sin



embargo, se encuentran presentes minerales potenciadores de drenaje ácido de mina y liberadores de elementos potencialmente tóxicos; y aunado al tamaño de partículas y el intemperismo al que están expuestos dichos minerales, se pueden estar llevando reacciones que no se observan a simple vista.

- d. La técnica de fluorescencia de rayos X, mostró un panorama más amplio de los elementos presentes en la zona de estudio, y permitió saber que en la zona existe presencia de Uranio; además, de otros elementos tóxicos en grandes concentraciones, así mismo se corroboraron las altas concentraciones de plomo y arsénico presentes en las muestras.
 - e. Se concluyó que en el sitio de estudio no se encuentra drenaje ácido de mina, y esto se corrobora mediante un estudio visual en la zona, así como con la ayuda de la prueba de pH en pasta, donde la alcalinidad de las muestras muestra que a la profundidad muestreada los minerales se encuentran protegidos de la posible acidez del medio.
- Posteriormente se propusieron medidas de mitigación para la reducción de peligro, dependiendo de la concentración de metales pesados y metaloides presentes en las muestras analizadas de las zonas estudiadas, considerando básicamente mitigar el riesgo a la población civil.
 - Finalmente se cumplió el objetivo del trabajo de investigación que fue evaluar la contaminación del suelo por metales pesados y metaloides en la zona de Hidalgo del Parral, Chihuahua, mediante este estudio se determinó que la zona de estudio no representa un riesgo directo a la población civil y al ambiente.



10 REFERENCIAS

- Bartkowiak, A., Lemanowicz, J. (2013). Application of Biochemical Tests to Evaluate the Pollution of the Unislaw Basin with Heavy Metals. *Int. J. Environ. Res.* 8(1), pp. 93-100. ISSN 1735-6865.
- Boulding, R. (1994). Description and Sampling of contaminated Soils. A field guide. Segunda edición, Cap. 3, pp 69-70. ISBN 1-56670-050-7.
- Brough C.P., Warrender R., Howell R.J., Barnes A., Parbhakar-Fox A. (2013). The process mineralogy of mine wastes. *Minerals Engineering.* Vol 52, pp 125-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.003>
- COREMI (1994), Monografía geológico-minera del Estado de Chihuahua, primera edición, Ed. Pedagógica Iberoamericana, México, pp. 43-47.
- CONEVyt (2014). Clasificación y distribución de los climas en México. Antología. Unidad 4. Lectura 4.13. Consejo Nacional de Educación para la Vida y el Trabajo. Rescatado de internet el 02-05-2014 en http://www.conevyt.org.mx/cursos/cursos/cnaturales_v2/interface/main/recursos/antologia/cnant_4_13.htm
- Durán A. (2004). Composición del suelo. Facultad de Agronomía. Departamento de suelos y agua, Universidad de la República de Uruguay, pp 5-6.
- FAO (2006). World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. Pp 84.85 y 88.
- García C. (1998). Estudio del mecanismo de generación de drenajes ácidos en una presa de estériles piríticos. Tesis de Doctorado. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. ISBN: 84-669-2400-0. Pp. 114-116.
- Giraldi, M. (2002). Alternativas de reciclado para las escorias provenientes de la industria siderúrgica. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- INECC (2009). Metales Pesados. Recuperado de <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales#2> recuperado el 07-05-2014
- INEGI (2009). Puntuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Hidalgo del Parral, Chihuahua. Clave geostadística 08032.



- INEGI (2010). México en cifras, información nacional, por entidad federativa y municipios. Recuperado de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=08>. Revisado el 03-05-2014.
- INEGI (2014). Geología. Geografía. Recursos Naturales. Recuperado de internet el 02-05-2014 en [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/default.aspx>]
- Iqbal M., Zhen-li H., Stoffella P.J., Xiao-e Y. (2008). Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *Journal Zhejiang Univ Sci B*, 9 (3), pp 210-220.
- Lillo J. (2011). Impactos de la minería en el medio natural. Grupo de Geología. Grupo de estudios en minería y medioambiente. Universidad Rey Juan Carlos.
- Muñoz J. (1986). La minería en México. Bosquejo histórico. Quinto centenario, América: economías, sociedades, mentalidades, Madrid, pp. 145-156.
- Márquez Z. (1995). Pueblos Mineros de Chihuahua. Primera Edición, Gobierno del Estado de Chihuahua, Coordinación de Comunicación Social. Chihuahua, México, pp. 23-47.
- OMS (2012). Organización Mundial de la Salud. Arsénico. Nota descriptiva No. 372. Consultado en línea en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/>. Recuperado el 07-05-2014
- OMS (2013). Organización Mundial de la Salud. Mercurio. Nota descriptiva No. 361. Consultado en línea en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/>. Recuperado el 07-05-2014
- OMS (2014). Organización Mundial de la Salud. Plomo. Nota descriptiva No. 379. Consultado en línea en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>. Recuperado el 07-05-2014
- O'Neill A, Phillips D.H., Bowen J, Sen Gupta B (2015). Contaminants in surface water and sediments near the Tynagh silver mine site, County Galway, Ireland. *Science of the total Environment*. 512-513, pp 261-272.
- Pérez L., Moreno A.M., González J. (2000). Valoración de la calidad de un suelo en función del contenido y disponibilidad de metales pesados. *Edafología*. Volumen 7-3, pp 113-120.
- Prasad M.N.V. (2011). A State-of-the-Art report on Bioremediation, its Applications to Contaminated Sites in India. Dept. of Plant Sciences, University of Hyderabad, Hyderabad. Capítulo uno, pp 7-10.



- Puga, S., Sosa M., Lebgue T., Quintana C., Campos A. (2006). Contaminación por metales pesados en el suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*. 5, pp. 149-155.
- Qasim B, Motelica-Heino M (2014). Potentially toxic element fractionation in techno soils using two sequential extraction schemes. *Environ Sci Pollut Res*. Vol 21, pp 5054-5065.
- RAE (2014). Real Academia Española. Consultado en internet el 04-05-2014 en <http://buscon.rae.es/drae/srv/search?id=wVzkNt7voDXX2yKMIHqY>
- Rodríguez L., Ferman H., Torres E., Sáenz L., Luna J., Herrera E., *et.al.* (2010). Characterization of topsoil samples and analysis of the distribution of heavy metals in Parral Chihuahua, Mexico. *Journal of Environmental Science and Engineering*. 4, 12, pp. 12-17.
- Romero F.M., Canet C., Alfonso P., Zambrana R.N., Soto N. (2014). The role of cassiterite controlling arsenic mobility in an abandoned stanniferous tailings impoundment at Llallagua, Bolivia. *Science of the total Environment*, vol 481, pp 100-107.
- Romero F.M., Armienta M.A., Gutiérrez M.E. y Villaseñor G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el Impacto ambiental de jales mineros. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 24, 43-54
- SEMARNAT (2008). Suelos. Informe anual 2008. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Recuperado de internet el 02-05-2014 en http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/03_suelos/cap3_1.html
- SGM (2014). Qué es la Geología. Educación. Servicio Geológico Mexicano. Recuperado de internet el 03-05-14 en http://www.sgm.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=81&Itemid=82
- Schinitman N. (2004). Metales pesados, ambiente y salud. Recuperado de internet el 05-10-14 en http://www.ecoportel.net/Temas_Especiales/Contaminacion/Metales_Pesados_Ambiente_y_Salud
- Vargas L., Barraza L. (2010). Determinación de metales pesados: Plomo, Arsénico, Cromo, Cadmio y Zinc en las fuentes de alimentación de agua potable de Hidalgo del Parral, Chihuahua. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Parral.
- Volke, T., Velasco. J. y de la Rosa, D. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México. Pp 19-31.
- Zavala, J. (2011). Contaminación por mercurio en la industria minera mexicana. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.



ANEXO 1

Prototipo de Hoja de Datos para el registro de los parámetros en el muestreo.

| MUESTREO | | | | | | | |
|---------------|-------|----------------------|--|------|-----------------------------|---------------------------|-------------|
| HOJA DE DATOS | | | | | | | |
| FECHA | CLAVE | UBICACIÓN GEOGRÁFICA | | HORA | CARACTERISTICAS AMBIENTALES | CARACTERISTICAS DEL SUELO | MUESTREADOR |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

ANEXO 2

Hoja de datos con los valores recolectados durante el muestreo.

| MUESTREO HIDALGO DEL PARRAL | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|----------------------|-------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----|-------------------|-------------|
| HOJA DE DATOS | | | | | | | | | | | | | |
| FECHA | CLAVE | UBICACIÓN GEOGRÁFICA | | HORA | Humedad relativa (%) | Temperatura ambiente (°C) | Velocidad del viento (m/h) | Conductividad eléctrica (mS/cm) | Temperatura Superficie (°C) | Temperatura a 30 cm (°C) | pH | Peso in-situ (gr) | MUESTREADOR |
| 30-jun-14 | HP2 | 26°56'46.76 | 105°39'38.7 | 09:03 | 37.5 | 29 | 4.2 | 0.34 | 36 | 28 | 6.4 | 342.5 | LABT |
| | HP2 | | | | | | | | | | | 348.6 | LABT |
| 30-jun-14 | HP3 | 26°56'36.82 | 105°39'56.8 | 10:05 | 28.8 | 38.1 | 6.3 | 0.25 | 44 | 25 | 6.4 | 511.7 | LABT |
| | HP3 | | | | | | | | | | | 554.7 | LABT |
| 30-jun-14 | HP4 | 26°56'36.89 | 105°39'45.3 | 11:07 | 29.7 | 32.4 | 8.2 | 0.12 | 52 | 27 | 6.4 | 352.6 | LABT |
| | HP4 | | | | | | | | | | | 357.8 | LABT |
| 01-jul-14 | HP7 | 26°56'36.96 | 105°39'35.9 | 07:16 | 63.2 | 21.4 | 6.3 | 0.26 | 15 | 21 | 7.3 | 357 | LABT |
| | HP7 | | | | | | | | | | | 358 | LABT |
| 01-jul-14 | HP5 | 26°56'27.32 | 105°39'43.5 | 07:53 | 62.2 | 23.5 | 3.9 | 0.23 | 18 | 23 | 7.4 | 359.1 | LABT |
| | HP5 | | | | | | | | | | | 361.4 | LABT |
| 01-jul-14 | HP6 | 26°56'26.22 | 105°39'33.5 | 08:41 | 51.6 | 24.1 | 5.8 | 0.23 | 23 | 24 | 7.5 | 362.2 | LABT |
| | HP6 | | | | | | | | | | | 362.9 | LABT |
| 01-jul-14 | HP8 | 26°56'36.38 | 105°39'25.7 | 09:20 | 45 | 31.5 | 1 | 0.52 | 27 | 29 | 7.7 | 351.3 | LABT |
| | HP8 | | | | | | | | | | | 359.5 | LABT |
| 01-jul-14 | HP9 | 26°56'47.97 | 105°39'29 | 10:20 | 42.1 | 31 | 1.3 | 0.21 | 44 | 31 | 6.6 | 387.4 | LABT |
| | HP9 | | | | | | | | | | | 389.8 | LABT |
| 02-jul-14 | HP13 | 26°57'15.4 | 105°39'24.8 | 07:38 | 66.2 | 23 | 2.3 | 0.16 | 19 | 26 | 7.4 | 350.9 | LABT |
| | HP13 | | | | | | | | | | | 350.7 | LABT |
| 02-jul-14 | HP14 | 26°57'1.55 | 105°39'8.88 | 09:01 | 45.9 | 25 | 5.9 | 0.33 | 38 | 33 | 7.5 | 355 | LABT |
| | HP14 | | | | | | | | | | | 350.4 | LABT |
| 02-jul-14 | HP15 | 26°56'55.96 | 105°39'10.5 | 09:47 | 55.7 | 26.8 | 4.6 | 0.26 | 42 | 28 | 6.5 | 353.1 | LABT |
| | HP15 | | | | | | | | | | | 351.6 | LABT |
| 02-jul-14 | HP10 | 26°56'45.69 | 105°39'17.8 | SE ELIMINÓ EL PUNTO DE MUESTREO | | | | | | | | LABT | |
| | HP10 | | | LABT | | | | | | | | | |
| 03-jul-14 | HP1 | 26°56'46.79 | 105°39'49.4 | 07:25 | 65.1 | 14.4 | 5 | 0.36 | 17 | 20 | 7.5 | 542.3 | LABT |
| | HP1 | | | | | | | | | | | 543.6 | LABT |
| 03-jul-14 | HP18 | 26°56'56.34 | 105°39'30.8 | 08:08 | 56 | 24.6 | 6.2 | 0.41 | 27 | 25 | 7.6 | 352.5 | LABT |
| | HP18 | | | | | | | | | | | 352.3 | LABT |
| 03-jul-14 | HP17 | 26°57'5.85 | 105°39'22.7 | 09:18 | 48 | 26.3 | 5.9 | 0.28 | 30 | 28 | 6.3 | 350 | LABT |
| | HP17 | | | | | | | | | | | 350.2 | LABT |
| 03-jul-14 | HP16 | 26°56'55.99 | 105°39'20.7 | 10:07 | 43.8 | 27 | 9.4 | 0.26 | 46 | 34 | 6.9 | 355.1 | LABT |
| | HP16 | | | | | | | | | | | 354.7 | LABT |
| 03-jul-14 | HP11 | 26°56'56.73 | 105°39'41.4 | 10:47 | 49.9 | 30.8 | 2.2 | 0.19 | 54 | 34 | 6.2 | 350.8 | LABT |
| | HP11 | | | | | | | | | | | 351.7 | LABT |
| 04-jul-14 | HP12 | 26°57'8.49 | 105°39'31.8 | 07:23 | 44.7 | 20.1 | 1.6 | 0.22 | 16 | 23 | 7.9 | 352.8 | LABT |
| | HP12 | | | | | | | | | | | 352.4 | LABT |
| 04-jul-14 | HPB | 26°57'15.72 | 105°39'31.6 | 07:47 | 62 | 22.7 | 0 | 0.81 | 20 | 26 | 7.5 | 355.4 | LABT |
| | HPB | | | | | | | | | | | 355.6 | LABT |





ANEXO 3

Procedimiento para la digestión de las muestras recolectadas.

Para la digestión de las muestras de suelo, se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se muelen las muestras en un mortero de porcelana
2. Se tamizan las muestras en una malla tamaño 40 (450 μm)
3. Se pesan aproximadamente 5 gr de muestra tamizada dentro de un vaso de precipitados de 150 mL.
4. Se adicionan 2.5 mL de Ácido Clorhídrico concentrado ($\text{HCl}_{(c)}$) con una probeta de 10 mL y se espera un momento a que no ocurran proyecciones o que se forme espuma debido a los posibles carbonatos que se encuentren en el jal.
5. Se continúa adicionando $\text{HCl}_{(c)}$ hasta completar un volumen de 7.5 mL de este ácido.
6. Se añade 2.5 mL de Ácido Nítrico concentrado ($\text{HNO}_{3(c)}$) y se espera hasta que la mezcla se estabilice, llegando a un volumen final de 10 mL de agua regia.
7. Toda muestra debe ir acompañada de un duplicado.
8. La muestra y su duplicado se colocan en una parrilla de calentamiento poniéndoles un agitador magnético, se tapan los vasos de precipitados con un vidrio de reloj. A un vaso de precipitado se le introduce el termopar de la parrilla y a otro un termómetro de vidrio de mercurio para corroborar la temperatura.
9. Se fija una agitación de 240 rpm y 20°C de calentamiento, cuidando que la mezcla este estable y vigilando que no existan proyecciones o desprendimiento de vapores; por lo que se debe de trabajar en la campana de extracción.
10. La temperatura se va elevando de 20°C en 20°C hasta llegar a 85°C en el termómetro de vidrio, dejándose en calentamiento y agitación por un lapso de una hora.
11. Finalizando el tiempo de calentamiento y agitación se remueven los vasos de precipitados con extremo cuidado y aún con el vidrio de reloj se dejan enfriar a temperatura ambiente.



12. Una vez enfriado el vaso de precipitado, se retira el vidrio de reloj, cuidando que el líquido condensado regrese al vaso de precipitado, se enjuaga con agua desionizada, la cual se vierte dentro del vaso de precipitado.
13. Se monta el equipo de filtración al vacío y se decanta el líquido del vaso de precipitado; se lava varias veces con agua desionizada.
14. Se trasvasa cuantitativamente la solución líquida a un matraz volumétrico de 50 ml y se afora con agua desionizada.
15. La solución obtenida se guarda en un frasco contenedor, con tapa de rosca, se etiqueta y se guarda en refrigeración para su posterior análisis.



ANEXO 4

Concentraciones obtenidas mediante fluorescencia de rayos X.

| HP1 | | | | | | | |
|----------|-------|--------------------------------|------------|----------|-------|------------------|-----------|
| Elemento | ppm | Elemento | Ppm | Elemento | ppm | Elemento | ppm |
| Ag | 28.2 | Cu | 768 | Ni | 9.7 | Th | 5.5 |
| As | 528.9 | Fe ₂ O ₃ | 5.2 (% Fe) | Pb | 4,476 | TiO ₂ | 0.5 (%Ti) |
| Ba | 2,156 | Ga | 15.7 | Rb | 169.3 | Tl | 5.7 |
| Bi | 33.1 | Hf | 30.6 | Sb | 59.7 | V | 76.5 |
| Br | 4.6 | I | 3.1 | Sc | 23.8 | W | 39.3 |
| Cd | 68.1 | La | 22.3 | Se | 14.5 | Y | 30.3 |
| Ce | 66.2 | Mn | 1,698 | Sm | 16.3 | Yb | 4.7 |
| Co | 18.3 | Mo | 10.3 | Sn | 20.8 | Zn | 8,774 |
| Cr | 44.4 | Nb | 5.4 | Sr | 172 | Zr | 139.7 |
| Cs | 22 | Nd | 21.9 | Ta | 6.9 | | |

| HP2 | | | | | | | |
|----------|-------|--------------------------------|------------|----------|------|------------------|-----------|
| Elemento | ppm | Elemento | Ppm | Elemento | ppm | Elemento | ppm |
| Ag | 36.9 | Cu | 491 | Ni | 2 | Th | 2.6 |
| As | 545.5 | Fe ₂ O ₃ | 3.5 (% Fe) | Pb | 3807 | TiO ₂ | 0.3 (%Ti) |
| Ba | 2711 | Ga | 10.1 | Rb | 146 | Tl | 6.9 |
| Bi | 29 | Hf | 23.1 | Sb | 86.6 | V | 54 |
| Br | 4 | I | 3.9 | Sc | 22.1 | W | 53 |
| Cd | 38.1 | La | 13.1 | Se | 7.6 | Y | 23 |
| Ce | 45.1 | Mn | 1678 | Sm | 3 | Yb | 5.5 |
| Co | 10.8 | Mo | 9.7 | Sn | 3.4 | Zn | 6511 |
| Cr | 67.5 | Nb | 2.5 | Sr | 148 | Zr | 89 |
| Cs | 10.8 | Nd | 13.7 | Ta | 7.1 | | |

| HP3 | | | | | | | |
|----------|------|--------------------------------|------------|----------|------|------------------|-----------|
| Elemento | ppm | Elemento | Ppm | Elemento | ppm | Elemento | ppm |
| Ag | 91.7 | Cu | 299 | Ni | 8.9 | Th | 4.6 |
| As | 295 | Fe ₂ O ₃ | 7.1 (% Fe) | Pb | 4727 | TiO ₂ | 0.5 (%Ti) |
| Ba | 6559 | Ga | 21.1 | Rb | 212 | Tl | 6.9 |
| Bi | 15.5 | Hf | 22.1 | Sb | 237 | V | 175 |
| Br | 3.9 | I | 3.3 | Sc | 28.7 | W | 116 |
| Cd | 55.1 | La | 24.8 | Se | 3.7 | Y | 42 |
| Ce | 66.4 | Mn | 2301 | Sm | 7.4 | Yb | 5.8 |
| Co | 9.1 | Mo | 6.1 | Sn | 0.5 | Zn | 7309 |
| Cr | 45 | Nb | 3.8 | Sr | 190 | Zr | 129 |
| Cs | 15.9 | Nd | 16.9 | Ta | 6.5 | | |

**HP4**

| Elemento | ppm | Elemento | Ppm | Elemento | ppm | Elemento | ppm |
|-----------------|------------|--------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|
| Ag | 118.9 | Cu | 134.3 | Ni | 3.2 | Th | 7.6 |
| As | 223.3 | Fe ₂ O ₃ | 4.6 (% Fe) | Pb | 2664 | TiO ₂ | 0.5 (%Ti) |
| Ba | 7488 | Ga | 12.6 | Rb | 266.4 | Tl | 10.5 |
| Bi | 10.6 | Hf | 9.9 | Sb | 258.2 | V | 87.8 |
| Br | 3.6 | I | 4.3 | Sc | 21.3 | W | 95.9 |
| Cd | 23.1 | La | 23.8 | Se | 1.9 | Y | 31.1 |
| Ce | 26.6 | Mn | 2666 | Sm | 0 | Yb | 5.6 |
| Co | 4.6 | Mo | 5.1 | Sn | 0.9 | Zn | 3225 |
| Cr | 45.7 | Nb | 4.6 | Sr | 202.4 | Zr | 126 |
| Cs | 0 | Nd | 5.8 | Ta | 5.3 | | |

HP5

| Elemento | ppm | Elemento | Ppm | Elemento | ppm | Elemento | ppm |
|-----------------|------------|--------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|
| Ag | 33.7 | Cu | 653.6 | Ni | 3.4 | Th | 2.3 |
| As | 476.4 | Fe ₂ O ₃ | 2 (% Fe) | Pb | 3484 | TiO ₂ | 0.3 (%Ti) |
| Ba | 2606 | Ga | 9.7 | Rb | 119 | Tl | 4.9 |
| Bi | 36 | Hf | 24.4 | Sb | 90.1 | V | 54.1 |
| Br | 3.6 | I | 1.3 | Sc | 29.2 | W | 57.3 |
| Cd | 48.1 | La | 9.8 | Se | 8.1 | Y | 20.9 |
| Ce | 38.8 | Mn | 1969 | Sm | 1.9 | Yb | 4.5 |
| Co | 11.4 | Mo | 8.6 | Sn | 0 | Zn | 6793 |
| Cr | 60.4 | Nb | 1.9 | Sr | 196.4 | Zr | 79.7 |
| Cs | 11.4 | Nd | 7.8 | Ta | 4.3 | | |

HP7

| Elemento | ppm | Elemento | Ppm | Elemento | ppm | Elemento | ppm |
|-----------------|------------|--------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|
| Ag | 89.6 | Cu | 304.4 | Ni | 3.1 | Th | 2.4 |
| As | 541.8 | Fe ₂ O ₃ | 4.4 (% Fe) | Pb | 4060 | TiO ₂ | 0.4 (%Ti) |
| Ba | 5564 | Ga | 11.2 | Rb | 169.5 | Tl | 7 |
| Bi | 15.8 | Hf | 24.7 | Sb | 265.1 | V | 77.7 |
| Br | 3.6 | I | 6.8 | Sc | 27.8 | W | 116.4 |
| Cd | 47.4 | La | 10.2 | Se | 3.9 | Y | 29.2 |
| Ce | 38.5 | Mn | 3115 | Sm | 2.3 | Yb | 4.9 |
| Co | 8.1 | Mo | 9.9 | Sn | 0 | Zn | 7411 |
| Cr | 52.4 | Nb | 2.3 | Sr | 183.6 | Zr | 93.6 |
| Cs | 12.3 | Nd | 10.5 | Ta | 6.9 | | |

**HP8**

| Elemento | ppm | Elemento | Ppm | Elemento | ppm | Elemento | ppm |
|-----------------|------------|--------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|
| Ag | 9.5 | Cu | 87.3 | Ni | 7.9 | Th | 11.8 |
| As | 96.7 | Fe ₂ O ₃ | 4.5 (% Fe) | Pb | 579.5 | TiO ₂ | 0.7 (%Ti) |
| Ba | 1324 | Ga | 15.5 | Rb | 130.4 | Tl | 3.6 |
| Bi | 4.8 | Hf | 7.5 | Sb | 18.2 | U | 1.3 |
| Br | 5.2 | I | 6.4 | Sc | 12.7 | V | 90.5 |
| Cd | 9.7 | La | 31.7 | Se | 1.9 | W | 9 |
| Ce | 48.8 | Mn | 819.6 | Sm | 0.6 | Y | 27.7 |
| Co | 8.7 | Mo | 2.4 | Sn | 7 | Yb | 6 |
| Cr | 45.5 | Nb | 11.4 | Sr | 191.6 | Zn | 910.1 |
| Cs | 11.1 | Nd | 28.6 | Ta | 4.5 | Zr | 206.6 |

HP16

| Elemento | ppm | Elemento | Ppm | Elemento | ppm | Elemento | ppm |
|-----------------|------------|--------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|
| Ag | 8.1 | Cu | 42.7 | Ni | 4 | Th | 13 |
| As | 107.5 | Fe ₂ O ₃ | 3 (% Fe) | Pb | 451.2 | TiO ₂ | 0.5 (%Ti) |
| Ba | 1678 | Ga | 14 | Rb | 293.2 | Tl | 6.8 |
| Bi | 4.4 | Hf | 7.8 | Sb | 14.8 | U | 1.9 |
| Br | 2.7 | I | 2.3 | Sc | 7.2 | V | 59.2 |
| Cd | 9.5 | La | 24.2 | Se | 1.4 | W | 12.2 |
| Ce | 37.5 | Mn | 493.8 | Sm | 5.8 | Y | 19.1 |
| Co | 4.6 | Mo | 1.9 | Sn | 3.3 | Yb | 3.8 |
| Cr | 49.2 | Nb | 9.1 | Sr | 137.2 | Zn | 778.4 |
| Cs | 13.7 | Nd | 17.5 | Ta | 3 | Zr | 164.6 |

HP17

| Elemento | ppm | Elemento | Ppm | Elemento | ppm | Elemento | ppm |
|-----------------|------------|--------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|
| Ag | 34.4 | Cu | 343.6 | Ni | 2.9 | Th | 2.1 |
| As | 767.2 | Fe ₂ O ₃ | 4.1 (% Fe) | Pb | 4331 | TiO ₂ | 0.3 (%Ti) |
| Ba | 2781 | Ga | 13 | Rb | 146 | Tl | 5.9 |
| Bi | 16.8 | Hf | 43 | Sb | 112.9 | V | 58.1 |
| Br | 3.9 | I | 2.3 | Sc | 22.4 | W | 35.7 |
| Cd | 62.5 | La | 10.4 | Se | 5.5 | Y | 23.1 |
| Ce | 35.7 | Mn | 2057 | Sm | 1.7 | Yb | 2.8 |
| Co | 11.8 | Mo | 11.9 | Sn | 3.5 | Zn | 11381 |
| Cr | 88.5 | Nb | 2 | Sr | 125.4 | Zr | 84.3 |
| Cs | 23.2 | Nd | 11.3 | Ta | 8.5 | | |