

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

**FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y
MEDICINA**

**PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**MOVILIDAD DE METALES Y METALOIDES EN SITIOS MINEROS:
PREDICCIÓN DE IMPACTO EN LOS RECURSOS HIDRICOS**

PRESENTA:

OFELIA ANAIS MARTÍNEZ VALDEZ

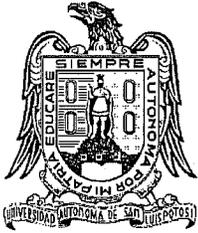
DIRECTOR DE TESIS:

GUILLERMO JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

ASESORES:

ROBERTO BRIONES GALLARDO

ISRAEL RAZO SOTO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y
MEDICINA**

**PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**Movilidad de metales y metaloides en sitios mineros: Predicción de
impacto en los recursos hídricos**

PRESENTA:

Ofelia Anais Martínez Valdez

COMITÉ TUTELAR:

DIRECTOR: Dr. Javier Castro Larragoitia

ASESOR: Dr. Roberto Briones Gallardo

ASESOR: Dr. Israel Razo

SINODALES:

PRESIDENTE: Dr. Javier Castro Larragoitia

SECRETARIO: Dr. Roberto Briones Gallardo

VOCAL: Dr. Antonio Cardona Benavides

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

El laboratorio de Geoquímica en el Instituto de Geología de la UASLP, así como en el laboratorio de Remediación Ambiental del Instituto de Metalurgia de la UASLP

CON FINANCIAMIENTO DE:

CONACYT/FORDECYT

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

Análisis, diagnóstico y desarrollo de estrategias para el aprovechamiento sostenible de agua y energía en la industria minera, con un enfoque multidisciplinario y formación de recursos humanos en Ciencias de la Tierra. Clave: 190966

AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 337784

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO
ATRAVÉS**

DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)

RESUMEN

La industria minera produce una gran cantidad de residuos generados en los diferentes tipos de extracción para recuperar metales esenciales para el desarrollo económico.

Los residuos mineros, y en especial los asociados a minerales metálicos, pueden contener elementos, entre ellos metales y metaloides, que pueden ser movilizados por diferentes procesos en las soluciones del suelo e impactar a los diferentes medios, en especial a los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos.

El distrito minero Cerro de San Pedro localizado en el centro sur del estado de San Luís Potosí, ha tenido importancia económica para el sector minero por la presencia de minerales que tienen alto contenido de metales como oro y plata. Este sitio empezó a explotarse desde finales del siglo XVI y ha tenido épocas de explotación minera de gran importancia. Los residuos generados durante los años de explotación histórica no tuvieron un manejo y control adecuado, provocando su dispersión en el sitio y representado una posible fuente de metales y metaloides, pudiendo lixivarse estos de los perfiles del suelo al agua subterránea, y de esta manera quedar disponibles para otros medios (ej. Plantas, organismos).

El objetivo de este trabajo es identificar entre los residuos mineros de Cerro de San Pedro, aquellos que presenten potencial de liberación de metales y metaloides y así un posible impacto en los recursos hídricos, estudiando las características particulares de los residuos y determinando los factores clave que facilitan los procesos de movilización/retención de elementos. Para ello se desarrolló primeramente una herramienta de selección de residuos, para evaluar de manera más

eficiente en tiempo y recursos, aquellos residuos que estuvieran presentando peligrosidad ambiental de acuerdo a ciertos datos de campo, a esta herramienta se le dio el nombre de “Inventario de Residuos Históricos”. Con las muestras de los residuos seleccionados se realizó un estudio de caracterización y movilidad de metales y metaloides utilizando para ello caracterización mineralógica mediante Difracción de Rayos x (DRX) y Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), caracterización química mediante digestión ácida total y un análisis de movilidad a través de pruebas de movilidad con agua meteórica en equilibrio con CO₂ y extracciones secuenciales.

Un mejor conocimiento de las condiciones de movilización de los metales y metaloides hacia el agua, contribuye así mismo al desarrollo de propuestas para medidas de prevención y/o remediación en los sitios de estudio con el fin de lograr una minería responsable.

Palabras clave: Minería, residuos mineros, movilidad.

DEDICATORIA

A Dios por todas las bendiciones dadas a lo largo de mi vida, por ser mi fuerza, mi refugio en los momentos difíciles y mi sostén en los momentos de prueba. Sin ti nada, contigo todo.

A mi madre por siempre estar ahí, por sacrificarse y luchar desde el día que nació hasta el día de hoy, por mí. Gracias por nunca cortarme las alas y dejarme volar hacia dónde yo quisiera.

A Gerardo por ser mi compañero de vida y quien más cree en mí, por ofrecerme tu hombro en el que tantas veces llore en este camino de 2 años y por las palabras que siempre me dijiste y me permitieron obtener este logro.

Tengo un sueño, un solo sueño, seguir soñando. Soñar con la libertad, soñar con la justicia, soñar con la igualdad y ojalá ya no tuviera necesidad de soñarlas

Martin Luther King

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por permitir formarme y brindarme nuevas experiencias educativas.

Al Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales por darme la oportunidad de realizar un posgrado y por abrir mi mente y horizontes hacia nuevos caminos.

Al Dr. Javier Castro por brindarme su apoyo y comprensión en todo momento y compartir su conocimiento y experiencia para la realización de este trabajo.

Al Dr. Roberto Briones por permitirme trabajar en su laboratorio, brindarme su ayuda y conocimiento y por su orientación durante la realización de esta tesis.

Al M.C Isidro Montes Ávila por su apoyo en la toma de muestras, además de su apoyo a lo largo del trabajo, por compartir su conocimiento y empujarme a siempre hacerlo de la mejor manera.

Al Dr. Erick Espinosa por su apoyo en el laboratorio y la elaboración de esta tesis, gracias por compartir sus conocimientos, por su guía y comprensión.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	15
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	18
2.1 Industria Minera y sus impactos al ambiente	18
2.1.1 Residuos mineros	20
2.2 Minería en México	22
2.3 Marco legal ambiental para la industria minera	23
2.3.1 Clasificación de residuos mineros en México	25
2.4 Movilización de metales y metaloides a partir de residuos mineros	25
2.4.1 Procesos de precipitación/disolución	28
2.4.2 Óxido-Reducción.....	29
2.4.3 Adsorción/desorción.....	29
2.4.4 Formación de complejos.....	31
2.5 Factores que afectan la movilidad de metales y metaloides	32
2.5.1 pH.....	32
2.5.2 Arcillas	32
2.5.3 Carbonatos.....	32
2.5.4 Oxihidróxidos de Fe y Mn.....	33
2.6 Extracciones secuenciales	33
2.7 Contaminación de recursos hídricos por residuos mineros	40
CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	42
3.1 Minería en Cerro de San Pedro, SLP.....	42
3.2 Aspectos socio-demográficos.....	45
3.3 Aspectos socio-económicos	45
3.4 Geología y geomorfología.....	46
3.4.1 Geología Regional.....	46
3.4.2 Geología de la zona de estudio.....	46
3.4.3 Yacimiento Mineral.....	47
3.5 Hidrografía	47
3.6 Clima	48
3.6.1 Meteorología	49
3.7 Edafología	50
CAPÍTULO 4. JUSTIFICACIÓN	51

CAPÍTULO 5. OBJETIVOS	53
5.1 OBJETIVO GENERAL	53
5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	53
CAPITULO 6. METODOLOGÍA.....	54
6.1 Inventario de residuos históricos	54
6.1 Aplicación del “Inventario de residuos” al sitio de estudio.....	60
6.2 Muestreo.....	65
6.3 Preparación de muestras	69
6.4 Caracterización mineralógica de las muestras.....	70
6.4.1 Difracción de Rayos X	70
6.4.2 Análisis en Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)	70
6.5 Caracterización fisicoquímica de las muestras.....	71
6.5.1 Determinación de pH.....	71
6.6 Caracterización química de las muestras.....	71
6.6.1 Digestiones ácidas totales.....	71
6.7 Determinación de movilidad con agua meteórica	72
6.8 Análisis de la movilidad mediante un protocolo de extracción secuencial	74
6.9 Análisis cuantitativo.....	80
6.9.1 Control de Calidad.....	80
6.9.1.1 Límites de detección (LD) y Límites de cuantificación (LC)	80
6.9.1.2 Exactitud.....	81
CAPITULO 7. RESULTADOS	82
7.1 Caracterización mineralógica por Difracción de Rayos-X (DRX) y Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)	82
7.1.1 DRX	82
7.1.2 MEB	86
7.1.2.1 Patio Victoria.....	86
7.1.2.2 Residuos SP-07 y SP-10.....	91
7.2 Determinación de pH.....	97
7.3 Concentración total de elementos de interés en muestras de residuos de Cerro de San Pedro, SLP	98
7.4 Movilidad de metales en H ₂ O en equilibrio con CO ₂	99
7.5 Extracciones Secuenciales.....	100
7.5.1 Plomo.....	101

7.5.1.1	Distribución de Pb en Patio Victoria.....	101
7.5.1.2	Otros residuos.....	102
7.5.2	Arsénico.....	104
7.5.1.1	Distribución de As en Patio Victoria.....	104
7.5.1.2	As distribuido en otros residuos	105
7.5.3	Cadmio	106
7.5.3.1	Distribución de Cd en Patio Victoria.....	106
7.5.3.2	Distribución de Cd en otros residuos.....	107
7.5.4.2	Distribución de Zn en otros residuos.....	110
7.5.5	Cu	111
7.5.5.1	Distribución de Cu en Patio Victoria.....	111
7.5.5.2	Distribución de Cu en otros residuos.....	112
7.5.6	Fe	113
7.5.6.1	Fe en Patio Victoria.....	113
7.5.6.2	Distribución de Fe en otros residuos	115
7.5.7	Ca	116
7.5.7.1	Distribución de Ca en Patio Victoria.....	116
7.5.7.2	Distribución de Ca en residuos 07 y 10.....	117
CAPITULO 8. DISCUSIÓN.....		119
8.1	Patio Victoria.....	119
8.1.1	Concentración total de elementos de interés	119
8.1.2	Movilidad de metales y metaloides	120
8.1.2.1	Pb.....	120
8.1.2.2	As	122
8.1.2.3	Cd	124
8.1.2.4	Zn	125
8.1.2.5	Cu	126
8.1.2.6	Fe.....	127
8.1.2.7	Ca	128
8.2	Residuos SP-07 y SP-10.....	129
8.2.1	Concentración total de elementos.....	130
8.2.2	Movilidad de metales y metaloides	130
8.2.2.1	Pb.....	130

8.2.2.2	As	132
8.2.2.3	Cd	132
8.2.2.4	Zn	133
8.2.2.5	Cu	134
8.2.2.6	Fe	135
8.2.2.7	Ca	135
8.3	Terreros	135
8.3.1	Concentración total de elementos.....	135
8.3.2	Movilidad de metales y metaloides	136
8.4	Inventario de Residuos Históricos.....	137
CAPITULO 9. CONCLUSIONES.....		138
Carnet Hernández Gabriel, 2010. Caracterización de una Empresa Minera, en relación con Canaima Tours. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.		142
ANEXOS.....		153
ANEXO 1 Procedimiento para el cálculo de ISA de los depósitos de residuos.....		153
ANEXO 2 Límite de detección y cuantificación.....		157
ANEXO 3 Exactitud.....		158
ANEXO 4: Concentración total de elementos para cada una de las muestras		159
ANEXO 5. Concentración total de elementos en la prueba de movilidad con agua meteórica		161
ANEXO 6. Concentración total de elementos para cada una de las fracciones en la extracción secuencial		162
ANEXO 7. FICHAS DE CAMPO		182

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Producción mundial de minerales y residuos de algunos metales, 1995 (MMSD, 2002)	22
Tabla 2. Normas mexicanas vigentes que regulan a la industria minera	24
Tabla 3. Protocolos de Extracción Secuencial Selectiva para cationes	35
Tabla 4. Protocolos de Extracción Secuencial para Aniones	38
Tabla 5. Características y criterios de campo para la evaluación de los depósitos de residuos mineros	55
Tabla 6. Valor numérico de las características de campo	58
Tabla 7. Resultado “ISA” para cada depósito de residuos mineros en la subcuenca del rio San Pedro	63
Tabla 8. Caracterización realizada a los residuos mineros de la subcuenca San Pedro	64
Tabla 9. Ubicación geográfica de las muestras	65
Tabla 10. Protocolo de ESS propuesto por Vázquez (2007) utilizado para cationes	78
Tabla 11. Protocolo de ESS propuesto por Vázquez (2007) utilizado para aniones	79
Tabla 12. Límite de detección (LD) y Límite de cuantificación por elemento (LC)	81
Tabla 13. Porcentaje de recuperación del MCR Montana soil 2710 ^a	81
Tabla 14. Minerales identificados en las muestras de Patio Victoria en DRX	82
Tabla 15. Minerales encontrados en muestra SP-07 mediante DRX	84
Tabla 16. Minerales encontrados en muestra SP-010 mediante DRX	85
Tabla 17. Valores de pH de las muestras de residuos de Cerro de San Pedro, SLP	97
Tabla 18. Promedio de la concentración total (mg/kg) de elementos de interés en muestras de residuos de Cerro de San Pedro, SLP	98
Tabla 19. Resultados del promedio de la concentración de metales (mg/kg) de la Prueba de movilidad con agua en equilibrio con CO ₂	99
Tabla 20. Valores certificados del MRC Montana Soil 210 ^a	158
Tabla 21. Concentración total de Pb, As, Cd y Zn para cada una de las muestras	159
Tabla 22. Concentración total de Cu, Fe y Ca para cada una de las muestras	160
Tabla 23. Concentración total de elementos de las muestras sometidas a la prueba de movilidad con agua meteórica	161
Tabla 24. Concentración total de elementos para la fracción 1 de la extracción secuencial para cationes	162
Tabla 25. Concentración total de elementos para la fracción 1 de la extracción secuencial para cationes	163
Tabla 26. Concentración total de elementos para la fracción 2 de la extracción secuencial para cationes	164
Tabla 27. Concentración total de elementos para la fracción 2 de la extracción secuencial para cationes	165
Tabla 28. Concentración total de elementos para la fracción 3 de la extracción secuencial para cationes	166

Tabla 29. Concentración total de elementos para la fracción 3 de la extracción secuencial para cationes.....	167
Tabla 30. Concentración total de elementos para la fracción 4 de la extracción secuencial para cationes.....	168
Tabla 31. Concentración total de elementos para la fracción 4 de la extracción secuencial para cationes.....	169
Tabla 32. Concentración total de elementos para la fracción 5 de la extracción secuencial para cationes.....	170
Tabla 33. Concentración total de elementos para la fracción 5 de la extracción secuencial para cationes.....	171
Tabla 34. Concentración total de elementos para la fracción 6 de la extracción secuencial para cationes.....	172
Tabla 35. Concentración total de elementos para la fracción 6 de la extracción secuencial para cationes.....	173
Tabla 36. Concentración total de elementos para la fracción 1 de la extracción secuencial para aniones.....	174
Tabla 37. Concentración total de elementos para la fracción 2 de la extracción secuencial para aniones.....	175
Tabla 38. Concentración total de elementos para la fracción 3 de la extracción secuencial para aniones.....	176
Tabla 39. Concentración total de elementos para la fracción 4 de la extracción secuencial para aniones.....	177
Tabla 40. Concentración total de elementos para la fracción 4 de la extracción secuencial para aniones.....	178
Tabla 41. Concentración total de elementos para la fracción 5 de la extracción secuencial para aniones.....	179
Tabla 42. Concentración total de elementos para la fracción 6 de la extracción secuencial para aniones.....	180
Tabla 43. Concentración total de elementos para la fracción 7 de la extracción secuencial para aniones.....	181

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre la concentración de metales y la geodisponibilidad y biodisponibilidad.....	26
Figura 2. Diagrama de adsorción de cationes sobre oxihidróxido de hierro en función del pH	30
Figura 3. Diagrama de adsorción de aniones en oxihidróxido de hierro en función del pH.....	31
Figura 4. Localización de Cerro de San Pedro.....	42
Figura 5. Depósito de Residuos en Cerro de San Pedro llamados “Patio Victoria”.....	44
Figura 6. Escala de selección para caracterización y muestreo.....	60
Figura 7. Depósitos de residuos mineros en la subcuenca del rio San Pedro.....	61
Figura 8. Residuos SP-01/INV.....	62
Figura 9. Residuos SP-05/INV.....	62
Figura 10. Imagen satelital de los puntos de muestreo para el sitio SP01-Rs.....	66
Figura 11. Imagen satelital de los puntos de muestreo para el sitio SP02-Rs.....	67
Figura 12. Fotografías del muestreo en Patio Victoria.....	67
Figura 13. Fotografías del muestreo en SP-07-Rs-M1.....	68
Figura 14. Fotografía de secado de muestra a temperatura ambiente.....	69
Figura 15. Fotografía de cribado de muestra en malla 2 mm.....	69
Figura 16. Fotografía de muestras en agitación continua a 18 h.....	73
Figura 17. Fotografía de medición del pH después de la extracción.....	73
Figura 18. Fotografía de separación de fase acuosa en una membrana de 0.45 μm acoplada en una bomba de vacío.....	74
Figura 19. Difractograma de rayos-x de SP-01-M2.....	83
Figura 20. Difractograma de rayos-x de SP-02-M3.....	83
Figura 21. Difractograma de rayos-x de SP-07.....	84
Figura 22. Difractograma de rayos-x de SP-10.....	85
Figura 23. Difractograma de rayos-x de SP-03.....	86

Figura 24. Partícula de pirita desgastada por condiciones de acidez.....	87
Figura 25. Formación de azufre (2) junto a pirita (1).....	87
Figura 26. Galena (1) rodeada por anglesita (2) por procesos de alteración.....	88
Figura 27. Sulfatos de hierro (3) y anglesita (2) como resultado de la alteración, también se observa galena (1) sin alterar al centro	89
Figura 28. Partícula de anglesita (1) en unión con óxido de hierro (2).....	89
Figura 29. Partícula de esfalerita atrapada en cuarzo.....	90
Figura 30. Partícula libre de sulfato de plomo con contenido de hierro.....	90
Figura 31. Partícula de óxidos de hierro asociados a cuarzo.....	91
Figura 32. Partícula libre de arseniato de plomo.....	91
Figura 33. Arseniato de plomo (1) asociado a óxidos de hierro (2).....	92
Figura 34. Partícula libre de cerusita.....	92
Figura 35. Partícula de Pb asociadas a óxidos de Mn.....	93
Figura 36. Partícula de Pb asociadas a óxidos de Mn.....	93
Figura 37. Fase de arseniato de plomo (1) asociada a calcita (2).....	94
Figura 38. Óxidos con contenido de Fe, Mn y Zn, asociados a feldespatos.....	94
Figura 39. Fases de arseniato de plomo (1) asociadas a óxidos de hierro (2).....	95
Figura 40. Óxidos de hierro (1) asociados a feldespatos (2).....	96
Figura 41. Partícula de cerusita asociada a calcita.....	96
Figura 42. Distribución de Pb en Patio Victoria.....	103
Figura 43. Distribución de Pb en las muestras 07 y 10.....	104
Figura 44. Distribución de As en Patio Victoria.....	105
Figura 45. Distribución de As en residuos 07 y 10.....	106
Figura 46. Distribución de Cd en Patio Victoria.....	108
Figura 47. Distribución de Cd en otros residuos.....	109
Figura 48. Distribución de Zn en Patio Victoria.....	110
Figura 49. Distribución de Zn en residuos 07 y 10.....	111
Figura 50. Distribución de Cu en Patio Victoria.....	113

Figura 51. Distribución de Cu en residuos 07 y 10.....	114
Figura 52. Distribución de Fe en Patio Victoria.....	115
Figura 53. Distribución de Fe en residuos 07 y 10.....	116
Figura 54. Distribución de Ca en Patio Victoria.....	117
Figura 55. Distribución de Ca en residuos 07 y 10.....	119
Figura 56. Recubrimiento de la galena (1) con el mineral anglesita (2) en una de las muestras correspondientes a “Patio Victoria”, junto a los espectros del microanálisis.....	122
Figura 57. Partícula libre de sulfato de plomo, óxidos de hierro y arsénico, junto al espectro del microanálisis.....	124
Figura 58. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As-O ₂ -H ₂ O.....	125
Figura 59. Diagrama simplificado de Pourbaix para el sistema Fe-H ₂ O a 25 °C.....	129
Figura 60. Partícula de arsénico y plomo asociados a óxidos de hierro con sus espectros de microanálisis.....	132
Figura 61. Asociación de Zn a óxidos de hierro y manganeso en SP-07 junto a los espectros del micronálisis.....	135

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En la industria minera se generan residuos en los diferentes tipos de extracción para recuperar metales esenciales para el desarrollo económico. La cantidad de residuos que se generan en la industria minera dependen de las características geológicas del yacimiento, el tipo de extracción, el metal que se extrae, así como el tamaño de la operación minera.

Los residuos mineros, y en especial los asociados a minerales metálicos, pueden contener elementos, entre ellos metales y metaloides como Pb, Cd, Zn, As, Se, etc., que pueden mobilizarse e impactar a los diferentes medios, en especial a los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos.

La disponibilidad de estos metales y metaloides y su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo al agua subterránea y ser biodisponibles para los seres vivos (plantas, organismos) no se basa en la concentración total en la que se encuentren sino en su fracción móvil. La fracción móvil se define como la suma de la cantidad del metal que se encuentra en solución más la cantidad de metal que puede solubilizarse a partir de un medio (residuos, suelos, etc) (Hlavay *et al.*, 2004).

Los metales que se encuentran en los residuos mineros, no siempre se movilizan, todo depende de una serie de factores como la especiación, que es el estado, fase, o forma química en que se encuentra un elemento en el suelo, el pH, el contenido de materia orgánica, contenido de carbonatos, arcillas, presencia de óxidos de hierro y manganeso, así como las condiciones redox (Dold, 2002).

Los metales y metaloides se encuentran asociados a diversas fases mineralógicas y fracciones del suelo, la disolución de estos metales y metaloides de la matriz que los contiene, depende de una

serie de procesos tales como la adsorción/desorción, precipitación/disolución, coprecipitación y formación de complejos (Dold, 2002).

En este trabajo se estudió la movilidad de metales y metaloides y la fracción a los que estos se asocian en el distrito minero de Cerro de San Pedro, que se localiza en el Sur-poniente del estado de San Luis Potosí. Este distrito minero ha tenido una gran importancia económica por la presencia de minerales que contienen metales como oro y plata. El yacimiento de estos minerales empezó a explotarse a finales del siglo XVI teniendo desde esa época hasta la fecha ciclos de auge y decadencia en sus actividades de explotación.

A lo largo de la historia del distrito minero de CSP, se han generado grandes cantidades de residuos como resultado de los procesos de explotación y beneficio de minerales. Diversos estudios han evaluado parte de los depósitos encontrados en CSP, concluyendo que son residuos con altas concentraciones de metales y metaloides (Razo 2007, Vázquez 2011). Sin embargo, existen en el sitio depósitos de residuos de los cuales no se sabe sus características físicas, químicas y mineralógicas, además, no se conoce, en el caso que contengan metales a qué fracción podrían estar asociados y las condiciones a las que estos pueden ser movilizados y llegar a fuentes de agua superficial o subterránea poniendo en riesgo a otros medios como organismos y plantas.

Es por eso que con el fin de conocer las características de cada uno de los depósitos de residuos en Cerro de San Pedro, y conocer si representan un peligro para los recursos hídricos, se realizó primeramente un “Inventario de Residuos Históricos” para identificar y seleccionar con datos de campo aquellos residuos que representarían un peligro ambiental, además se estudió la movilidad de metales y metaloides en agua meteórica en equilibrio con CO₂ de acuerdo a las especificaciones de las normas

mexicanas, y para conocer la fracción a la los metales se encuentran asociados se realizaron dos procedimientos de extracciones secuenciales, uno para cationes y otro para aniones.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Industria Minera y sus impactos al ambiente

Los recursos minerales han sido protagonistas en el desarrollo de la humanidad, de hecho su influencia ha sido tan marcada que se han recurrido a ellos para marcar dos grandes períodos de la Prehistoria: Edad de Piedra (Paleolítico, Mesolítico y Neolítico) y Edad de los Metales (Edad del Cobre, Edad del Bronce y Edad del Hierro) (García, 2008). Estos recursos forman parte esencial de muchos materiales que cubren las necesidades de la humanidad (alimentación, salud y vivienda) y permiten su desarrollo económico (telecomunicaciones, transportes y otros avances tecnológicos).

La riqueza mineral de varios países determinó su geografía y el desarrollo estatal y local. En México, por ejemplo, los colonizadores se establecían en lugares en donde abundaban los minerales, y con el tiempo fueron creciendo hasta formar ciudades como San Luis Potosí, Taxco, Zacatecas, Guanajuato, entre muchas otras.

En 1989 se estimaba que un americano consumía anualmente alrededor de 18,000 kg de nuevos minerales y se suponía que cada niño nacido en los Estados Unidos consumiría durante toda su vida 360 kg de plomo (principalmente para baterías de automóvil, soldaduras y componentes electrónicos); 343 kg de zinc (en aleaciones con el cobre para producir latón, recubrimientos, protectores del acero y en compuestos químicos como caucho y pintura); 680 kg de cobre (especialmente en motores eléctricos, generadores, implementos para comunicaciones y cableados); 1630 kg de aluminio (para todo tipo de objetos como latas de bebidas, sillas plegables y aviación); 14800 kg de lingotes de hierro (para utensilios de cocina, automóviles, buques y grandes edificios) (Geotimes,1989).

La obtención de elementos de interés económico a partir de minerales ha impulsado el desarrollo de la industria minera que tiene como objetivo encontrar los sitios en donde es rentable extraer minerales, además de la explotación del yacimiento y de realizar los procesos para la concentración de los elementos de interés comercial (Carnet, 2010).

La minería es una actividad llena de beneficios económicos para la nación y para las comunidades en donde se establece. Entre los beneficios que ofrece están un aumento de ingresos para el gobierno, la creación de empleos, construcción de infraestructura, la mejora de servicios durante la vida productiva de la mina, etc. (Jiménez, *et al.*, 2006).

En muchos países la minería es una de las actividades económicas más importantes. En México por ejemplo, en el 2014 el sector minero ocupaba el tercer lugar en generación de divisas, representaba el 4.9 % del Producto Interno Bruto (PIB), más de doscientos mil empleos directos y más de un millón de empleos indirectos (Secretaría de Energía, 2014).

Aunque la minería se encarga de cubrir algunas necesidades de la sociedad y aporta significativamente a la economía de los países, esta industria tiene gran impacto en diferentes medios ambientales, porque en sus procesos de extracción, beneficio y refinación genera una gran cantidad de residuos que, además, pueden contener elementos potencialmente tóxicos como arsénico (As), mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd); que en caso de no ser manejados adecuadamente, pueden ser dispersados por agua, aire y/o viento y de esta manera afectar al agua, suelo, aire y/o a la biota (MMSD, 2006). Además la disposición del agua también se ve afectada, en las operaciones mineras el agua desempeña un papel muy importante, el agua que se utiliza generalmente proviene de aguas superficiales y en algunos casos de aguas subterráneas por lo que

se producen cambios notorios en los acuíferos locales causando disminución en la disponibilidad del agua (Pacheco, 2005).

También se produce contaminación atmosférica, por las partículas en suspensión que se generan por el tratamiento de reducción de tamaño de grano de los minerales. Además durante las operaciones de extracción, y tratamiento del mineral se produce material particulado atmosférico en la zona próxima de la mina afectando la calidad del aire, este material particulado puede influenciar en la calidad de las zonas urbanas (De la Rosa, 2008).

2.1.1 Residuos mineros

Para entender en qué etapas del proceso minero-metalúrgico se generan los residuos, a continuación, se describirá brevemente en qué consisten estas actividades. Generalmente los procesos para el minado, beneficio y transformación de metales comprenden las siguientes etapas (Lottermoser, 2007):

1. La exploración: se lleva a cabo para localizar y evaluar aquellos yacimientos minerales que contienen elementos de interés económico.
2. Minado: se extrae el material del yacimiento que contiene al mineral de interés económico (mena). En esta etapa se generan estériles de mina llamados comúnmente terreros, es decir, parte del yacimiento que no contiene al mineral de interés económico, que es necesario extraer para acceder a este y que generalmente consiste de un material geológico heterogéneo que puede contener rocas sedimentarias, metamórficas o ígneas; suelo, o sedimentos, y cuyas características físicas y químicas dependen de la mineralogía y geoquímica del yacimiento, del tamaño de partícula, etc.

3. Etapa de trituración y molienda: tiene el objetivo de reducir el material al tamaño adecuado para que esté en condiciones de pasar a las siguientes etapas de tratamiento y hacer más eficiente el proceso de concentración.
4. La concentración y extracción: se utilizan para separar la mena en el mineral de interés y en el mineral que no interesa económicamente (ganga), estos procesos pueden ser por lixiviación, comúnmente utilizado en los procesos de obtención de oro usando una solución de cianuro, por lixiviación ácida en procesos de obtención de cobre o procesos de flotación selectiva en donde se utilizan productos químicos que permiten a los minerales separarse (MMSD1, 2002). En esta etapa se generan residuos que pueden ser ya sea lodos de lixiviación y/o los jales, y que pueden contener aún parte de los metales de interés económico y además aquellos considerados como impurezas. Sus características físico-químicas varían de acuerdo a la mineralogía y geoquímica del yacimiento, del tipo de tecnología de proceso y del tamaño de partícula del material triturado.
5. Refinación: en este paso se procesa el material producido en los procesos de concentración y extracción para dejar a los elementos de interés en el estado más puro posible. En esta etapa se producen residuos metalúrgicos, por ejemplo, las escorias, que son generadas en procesos pirometalúrgicos como la fundición y los lodos generados en los procesos hidrometalúrgicos.

La cantidad de residuos que se generan en la industria minera dependen de las características geológicas del yacimiento, el tipo de extracción ya sea subterráneo o a cielo abierto, el metal que se extrae, así como el tamaño de la operación minera (MMSD, 2002).

En la Tabla 1 se muestra una estimación realizada en 1995 sobre la cantidad de mineral extraído y el porcentaje de residuos generados.

Tabla 1. Producción mundial de minerales y residuos de algunos metales, 1995 (MMSD, 2002)

Metal	Mineral extraído (millones de toneladas)	Porcentaje que se convierte en residuo, no incluye los residuos estériles (terceros) (%)
Hierro	25,503	60
Cobre	11,026	99
Oro	7,235	99.99
Plomo	1,077	97.5
Aluminio	856	70

2.2 Minería en México

La industria minera ha contribuido, desde la colonia hasta la actualidad, al desarrollo económico de México, debido a la diversidad y abundancia de minerales con los que cuenta.

La Secretaría de Economía reporta que México ocupaba en el 2014 el primer lugar en la producción de plata a nivel mundial, además se ubica entre los diez principales productores de oro, plomo, zinc, cobre, bismuto, fluorita, celestita, wollastonita, cadmio, diatomita, molibdeno, barita, grafito, sal, yeso y manganeso, principalmente.

La minería contribuye con el 4.9% del PIB y en el 2013 generó 337 mil 598 empleos directos y más de 1.6 millones de empleos indirectos (Secretaría de Energía, 2014).

Las actividades mineras en México, desde hace siglos, además de contribuir con la economía, han causado un gran impacto ambiental. La generación de residuos peligrosos es uno de los retos más importantes a los que se enfrenta esta actividad en nuestro país. Según el INE (Instituto Nacional de Ecología), la minería es una de las principales fuentes de generación residuos peligrosos, ocupando el segundo lugar, solo después de la industria manufacturera, generando principalmente, líquidos residuales del proceso, lodos, sólidos y escorias (INE, 1999).

2.3 Marco legal ambiental para la industria minera

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) creada en 1988, basada en el artículo 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que dice que toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar, es la legislación mexicana para prevenir y controlar problemas ambientales y es responsabilidad de la industria minera cumplir con lo que dicta, ya que esta ley establece las condiciones a las que se sujetará la realización de la obra y las actividades que pueden causar desequilibrio ecológico o contaminación derivada de un mal manejo, además señala entre otras cosas, que todo inicio de obra debe contar con una autorización de impacto ambiental.

En cuestión de residuos, de manera general, en la legislación mexicana existe la Ley General para la Prevención y Gestión integral de los Residuos Peligrosos (LGPGyR), además del Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión integral de los Residuos Peligrosos, que establece que los residuos mineros se manejarán de acuerdo a los planes de manejo que elaboren los responsables de los procesos que los generen, y que la disposición final de residuos de la industria minera se efectuará de conformidad con la Norma Oficial Mexicana (NOM) correspondiente. Los generadores podrán disponer residuos mineros en minas subterráneas utilizando el proceso de relleno hidráulico o cualquier otro proceso.

De manera particular, algunas de las normas mexicanas vigentes que regulan a la industria minera se enlistan en la Tabla 2.

Tabla 2. Normas mexicanas vigentes que regulan a la industria minera

NOM-052-SEMARNAT-2005	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y listados de los residuos peligrosos.
NOM-141-SEMARNAT-2003	Que establece los requisitos para la caracterización del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales.
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
NOM-155-SEMARNAT-2007	Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.
NOM-159-SEMARNAT-2011	Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.
NOM-157-SEMARNAT-2009	Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros

2.3.1 Clasificación de residuos mineros en México

En México, Según la NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros, los residuos se clasifican en función del proceso que los genera, y establece la siguiente clasificación general:

- Residuos provenientes del minado, como terreros.
- Residuos provenientes del beneficio de minerales, entre ellos los jales de flotación, los reactivos gastados de los procesos de flotación, los jales cianurados, mineral gastado de sistemas de lixiviación en montones, entre otros.
- Residuos de los procesos pirometalúrgicos como escorias, catalizador gastado, polvo de horno.
- Residuos de los procesos hidrometalúrgicos como lodos de lixiviación en tanques.

2.4 Movilización de metales y metaloides a partir de residuos mineros

Los residuos mineros pueden contener metales y metaloides, entre ellos Pb, Cd, Ag, Au, As, Se, etc. La disponibilidad de estos metales y metaloides y su potencial para lixiviarse de los perfiles de los residuos a los recursos hídricos y ser biodisponibles a otros medios (plantas, organismos) no se basa en la concentración total en la que se encuentren sino en su fracción móvil. La fracción móvil de un material, se define como la suma de la cantidad del metal que se encuentra en solución más la cantidad de metal que puede solubilizarse (Hlavay *et. al.*, 2004). Los metales pueden asociarse a diferentes fracciones minerales en los residuos mineros, tales como los sulfuros, óxidos, carbonatos, arcillas, materia orgánica y silicatos, la alteración de estas

fracciones puede causar que los metales y metaloides se disocien de estas y migren a la fracción móvil o a otras fracciones minerales. Es decir, los metales que se encuentran en los residuos mineros, no siempre se movilizan, todo depende de la estabilidad de las fases a la que se encuentren asociados.

En la Figura 1 se muestra las vías que puede seguir un metal, desde que se presenta geodisponible por procesos como el intemperismo o erosión, hasta su camino para llegar a ser biodisponible para organismos vivos, movilizándose.

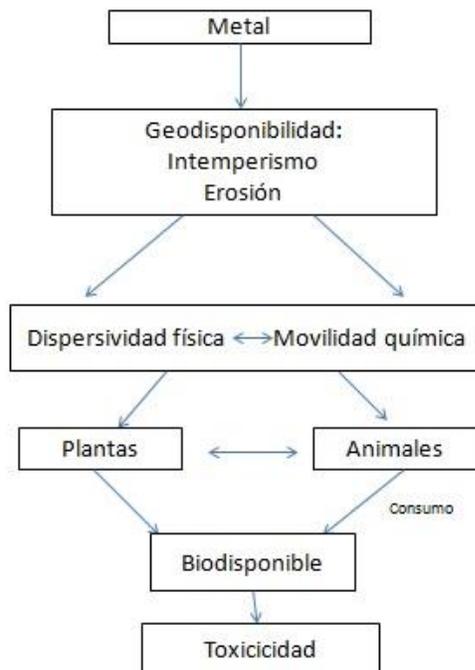


Figura 1. Relación entre la concentración de metales y la geodisponibilidad y biodisponibilidad

(Modificado de Smith y Huyck, 1999)

La alteración de las fases a las que se encuentran asociados los metales y metaloides depende de las condiciones y de la estabilidad de los residuos. Los residuos con el tiempo pueden ser modificados por procesos de alteración químicos, físicos y biológicos, relacionados con las condiciones climáticas del lugar en donde se encuentran.

Un proceso importante de alteración de residuos es la oxidación de sulfuros y la formación de drenaje ácido de roca (DAR), esto ocurre cuando los minerales sulfurosos se encuentran expuestos a ambientes oxidantes y humedad y se vuelven químicamente inestables dando paso a una serie de reacciones químicas se inician de forma espontánea, y generando soluciones ácidas con elevadas concentraciones de SO_4^{2+} , Fe^{3+} y de otros metales disueltos (Lottermoser, 2007).

La pirita (FeS_2) juega un papel muy importante en el proceso de generación de DAR ya que es el sulfuro más abundante que existe en los ambientes geológicos (Dold, 2002).

La oxidación de la pirita tiene lugar en cuatro diferentes etapas: a) cuando este mineral se expone al oxígeno en condiciones abióticas b) en presencia de oxígeno y microorganismos c) en presencia de oxígeno y hierro y d) por el oxígeno y hierro en presencia de microorganismos (Lottermoser, 2007).

Las Ecuaciones 1, 2 y 3 muestran cómo se lleva a cabo la oxidación de la pirita:

Oxidación de la pirita por oxígeno (paso 1):



Oxidación de hierro ferroso a férrico (paso 2):



Oxidación de la pirita por el hierro férrico (paso 3):



En el paso 1, la pirita se oxida en presencia de oxígeno y agua, para producir hierro ferroso disuelto (Fe^{2+}), sulfato e iones de hidrógeno, la liberación de éstos da como resultado una solución ácida (Ecuación 1). En la segunda etapa, el hierro ferroso disuelto (Fe^{2+}) se oxida a hierro férrico (Fe^{3+}), por el oxígeno y en un pH bajo (Ecuación 2). En el paso 3, el hierro férrico generado en la ecuación 2, actúa como agente oxidante de la pirita, esta oxidación a su vez genera más $\text{Fe}^{2+}_{(aq)}$ que se oxida y genera Fe^{3+} (Ecuación 2). A su vez el Fe^{3+} oxida pirita y así sucesivamente, formando un ciclo continuo hasta que la pirita o el Fe^{3+} se agotan.

Los procesos de alteración de los residuos se llevan a cabo por reacciones de precipitación/disolución, óxido-reducción, adsorción/desorción y formación de complejos (Plumlee, 1999).

2.4.1 Procesos de precipitación/disolución

La precipitación/disolución de minerales es controlada por una constante denominada “producto de solubilidad”, que puede ser utilizada para estimar si un mineral se disolverá o precipitará.

Las reacciones de precipitación/disolución disuelven fases minerales al mismo tiempo que forman minerales secundarios. La disolución de un mineral puede significar la liberación de metales y metaloides que estaban contenidos en él. Estas reacciones están controladas por el pH, temperatura y Eh, concentración de especies acuosas y la actividad iónica.

2.4.2 Óxido-Reducción

Las condiciones redox influyen directamente en la dinámica de los metales en los residuos, los metales que presentan más de un estado de oxidación generalmente son más móviles. Las transformaciones redox tienen implicaciones para el comportamiento del metal en el medio en que se encuentre. El estado redox del sistema también puede afectar el fraccionamiento de los elementos entre la solución y la fase sólida. Por ejemplo, el hierro en su estado trivalente y oxidado (Fe^{3+}) se hidroliza rápidamente y precipita como oxihidróxido de Fe (III), fase que proporciona entonces una superficie altamente reactiva e importante para la adsorción de otros metales en el medio; cuando ocurre la reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} , puede ir acompañada por la disolución de la fase de oxihidróxido de Fe (III) y entonces se podrían liberar los metales que se asociaron a él (Emerson, 2000).

Las condiciones redox y el pH hacen posible predecir qué especies son dominantes en ciertas condiciones geoquímicas, esto se hace visible en los diagramas Eh-pH utilizados en gran medida en Geoquímica (Dold, 2002).

2.4.3 Adsorción/desorción

La adsorción ocurre mediante la presencia de cargas eléctricas sobre la superficie de los minerales. La adsorción tiene un papel importante en la movilidad de metales y metaloides, ya que estos pueden quedar retenidos en las áreas superficiales de los adsorbentes que existan en lugar.

Las superficies cargadas dependen del pH del medio, por ejemplo, los óxidos de hierro presentan cargas superficiales, positivas y negativas de acuerdo al pH del medio. Cuando toman una carga

positiva pueden adsorber fuertemente el arsénico (AsO_3^{3-} , AsO_4^{3-}); cuando toman una carga negativa son capaces de adsorber cationes.

En la Figura 2, podemos observar, el porcentaje de adsorción de cationes sobre óxidos de hierro en función del pH del medio. El plomo y el cromo, se adsorben completamente a un pH mayor de 5, el cobre a un pH mayor de 6 y el zinc y el cadmio quedan adsorbidos completamente a un pH de 6.5 y 7 respectivamente.

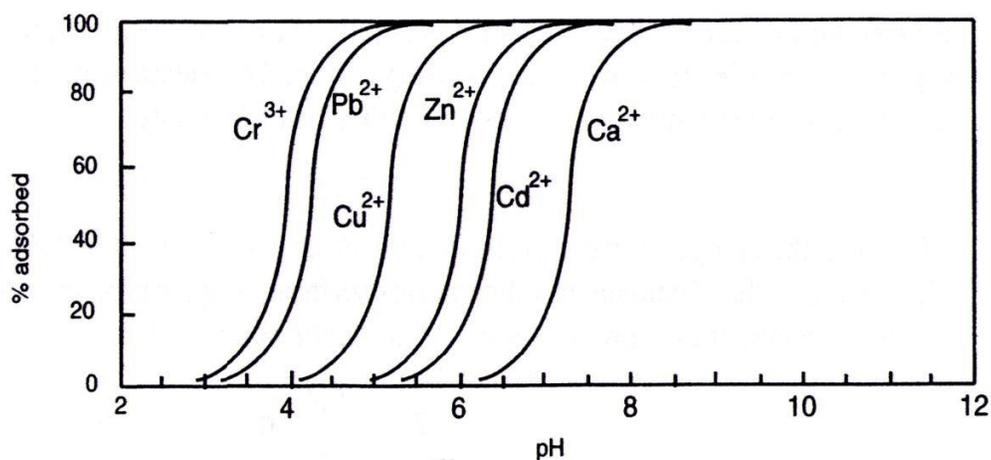


Figura 2. Diagrama de adsorción de cationes sobre oxihidróxido de hierro en función del pH (Drever, 1997)

En la Figura 3 observamos la adsorción de aniones sobre un oxihidróxido de hierro en función del pH. Vemos que el arsenito (AsO_3^{3-}) comienza a adsorberse a un pH de 4, alcanzando su máximo a un pH de 7.5 y empieza a desorberse a medida que el pH disminuye. El arsenato (AsO_4^{3-}) se adsorbe completamente a un pH de 10 y conforme va disminuyendo el pH, este comienza a desorberse.

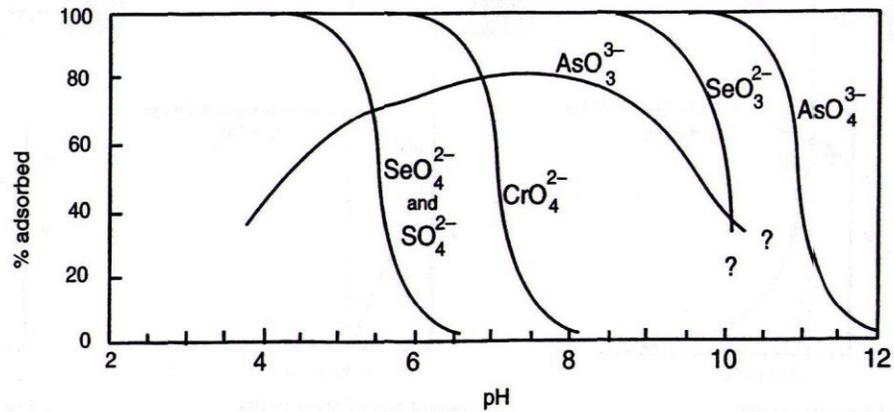


Figura 3. Diagrama de adsorción de aniones en oxihidróxido de hierro en función del pH

(Drever, 1997)

2.4.4 Formación de complejos

La formación de complejos se puede explicar por la teoría de ácido-base de Lewis, en dónde un ion metálico acepta pares de electrones y una molécula neutra polar orgánica o inorgánica (llamada ligando) dona los pares de electrones, formándose complejos.



En ocasiones, la formación de complejos es factor que influye en la solubilidad y movilidad de los metales, debido a sus cargas neutras o negativas. Y algunos ligandos orgánicos confieren una alta toxicidad a los metales, como por ejemplo los complejos metilados del mercurio (Plumlee, 1999).

2.5 Factores que afectan la movilidad de metales y metaloides

2.5.1 pH

El pH controla las reacciones de adsorción/desorción y precipitación/solubilización entre los metales y la superficie de contacto (Warren *et. al*, 2000). Cuando se presentan valores de pH bajos aumenta la solubilidad de la mayoría de los elementos traza, tales como Cu, Cr (III), Ni, Pb, Cd, Zn, Co, Mn entre otros (Han, 2007).

2.5.2 Arcillas

Los minerales de las arcillas, pueden controlar en cierta medida la movilidad de los metales, ya que tienen determinados valores de superficie específica y de descompensación eléctrica, por lo que tienen la capacidad de adsorber a los metales y metaloides; cuanto mayor es la superficie activa, mayores son sus posibilidades de adsorberlos e inmovilizarlos (Bourg, 1995).

2.5.3 Carbonatos

Como ya se explicó anteriormente, el pH influye directamente en la movilización de los metales, la presencia de carbonatos en el medio garantiza el mantenimiento de los valores altos de pH, y en estas condiciones muchos de los metales precipitan (Galán *et. al*, 2008). A diferencia de algunos metaloides como el arsénico que solubiliza a pH básico. Además los carbonatos tienen capacidad para retener metales y metaloides en el medio, por procesos como la adsorción o precipitación.

2.5.4 Oxihidróxidos de Fe y Mn

Los metales pueden ser incorporados en los oxihidróxidos de Fe y Mn por distintos procesos tales como reacciones de intercambio catiónico, adsorciones en superficie de grupos hidroxilo, por medio de la coprecipitación y la precipitación en forma de óxido o hidróxido (Warren *et. al*, 2000).

Los óxidos de Fe, son abundantes en la naturaleza, de ahí su importancia en el medio y su efecto en el comportamiento de los metales y metaloides, además poseen solubilidad baja y altas energías de cristalización. Tienen altas áreas de superficie, lo que los hace altamente reactivos. Hay más de 16 óxidos de Fe incluyendo óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos, todos contienen Fe (III) y grupos -O ó -OH, pero varían en su composición y en su estructura mineralógica (Warren *et. al*, 2000).

Los óxidos de Mn también presentan baja solubilidad y precipitan como cristales muy pequeños y por lo tanto poseen reactividades muy altas en sus superficies; se considera que son potencialmente más reactivos que los óxidos de Fe (Warren *et. al*, 2000).

2.5.5 Materia orgánica

La materia orgánica reacciona con los metales formando complejos denominados quelatos; entre ellos ocurre una quelación tan fuerte que pueden quedar estabilizados bajo ciertas condiciones ambientales. En otros casos también pueden formarse complejos organometálicos, lo que facilita la solubilidad del metal, la disponibilidad y su dispersión ya que estos compuestos pueden ser degradados por los organismos en el suelo (Galán *et. al*, 2008).

2.6 Extracciones secuenciales

Conocer las fases a las que se encuentran asociados los metales y metaloides es fundamental para entender la movilidad de estos elementos de la fracción sólida a la solución. Es decir, los metales y metaloides pueden movilizarse dependiendo de la estabilidad de la fracción a la que se encuentren asociados.

El método empleado para conocer el fraccionamiento y analizar la movilidad de metales y metaloides son las extracciones secuenciales. Las extracciones secuenciales se utilizan para definir operativamente la facilidad con la que los componentes se liberan de la fase sólida a la solución y se basa en la idea de que un disolvente químico es selectivo para una fase particular (Hlavay *et. al.*, 2004).

Un trabajo importante y pionero en el campo de las extracciones secuenciales es el de Tessier *et al.* 1979, en el que se presenta y describe de manera detallada el protocolo de aplicación para muestras de sedimentos. En este método de extracción secuencial se consideran 6 diferentes fases del suelo: fracción intercambiable, asociada a carbonatos, asociada a óxidos de hierro y manganeso, asociada a sulfuros y materia orgánica y la fracción residual (Tessier *et al.*, 1979). Actualmente hay diferentes procedimientos de extracción secuencial cuyas diferencias son básicamente las condiciones de extracción, es decir, la concentración del extractante, el pH operativo, la relación de solución/sólido, y la duración de la extracción. Así, procedimientos similares pero con diferencias en sus condiciones de extracción y en el tipo de muestra, pueden extraer distintas cantidades de metales y metaloides (Hlavay *et. al.*, 2004).

Los factores que más influyen para que la selectividad en los pasos de la extracción tenga éxito son: las propiedades químicas del agente extractante, los parámetros experimentales, la secuencia de los pasos individuales, los efectos de readsorción, la contaminación cruzada, la heterogeneidad (Hlavay *et.al.*, 2004).

Actualmente existe una amplia gama de procedimientos de extracción secuencial con diferencias en sus condiciones de extracción, las variaciones en el procedimiento dependen básicamente de los objetivos particulares que se pretendan alcanzar y de factores de diversa índole como la naturaleza y composición de la muestra sólida y las fases específicas que se pretendan extraer. En la Tabla 3 se presenta un resumen de algunos métodos de extracción secuencial utilizados en distintas matrices ambientales.

Tabla 3. Protocolos de Extracción Secuencial Selectiva para cationes

Método	Fracciones		Procedimiento	Matriz
Tessier <i>et al.</i> (1979)	1	Intercambiable	1 M MgCl ₂ (pH=7), 20 mL, 1 h.	Sedimentos
	2	Ligada a carbonatos	1 M NaOAc (pH=5), 20 mL, 1 h.	
	3	Reducible (ligada a óxidos Fe-Mn)	0.04 M NH ₂ OH HCl, 20 mL, 95 °C, 6 h.	
	4	Oxidable (ligada a materia orgánica)	15 mL 30 % H ₂ O ₂ and 3 mL 0.02 M HNO ₃ , 2 h, 85 °C, 3.2 M NH ₄ OAc, 5 mL, 85 °C, 3 h.	
	5	Residual	HF, HClO ₄ , HNO ₃	
BCR (2004)	1	Soluble en ácido (intercambiable y ligada a carbonatos)	40 mL de HOAc al 1 g de sedimentos. Agitar durante una noche a 22 °C	Suelos/sedimentos
	2	Reducible (ligada a óxidos Fe-Mn)	40 mL de NH ₂ OH·HCl. Agitar durante una noche a 22 °C	
	3	Oxidable (ligada a materia orgánica y sulfuros)	10 mL de H ₂ O ₂ , digerir durante 1 h a temperatura ambiente, a continuación, 1 h a 85 °C, a reducir a <3 mL, añadir 10 mL de H ₂ O ₂ , de calor a 85 °C durante 1 h reducir a <1 mL. Enfriar, agregar 50 mL NH ₄ OAc, agitar durante la noche a 22 °C	
Dold (2003)	1	Soluble en agua	1.0 g en 50 mL en H ₂ O. Agitar 1 h, a RT.	Residuos mineros

	2	Intercambiable	1 M NH ₄ -acetato pH 4.5. Agitar por 2 h a RT	
	3	Oxihidróxidos de Fe (III)	0.2 M NH ₄ -oxalato, pH 3.0. Agitar por 1 h en oscuridad a RT.	
	4	Óxidos de Fe (III)	0.2 M NH ₄ -oxalato, pH 3.0. En un baño de agua caliente a 80 °C por 2 h.	
	5	Materia orgánica y sulfuros de Cu secundarios	35 % H ₂ O ₂ en un baño de agua caliente por 1 h.	
	6	Sulfuros primarios	Mezcla de KClO ₃ y HCl, seguido por 4 M de HNO ₃ en ebullición.	
	7	Residual	Digestión con HNO ₃ , HF, HClO ₄ , HCl.	
Geological Society of Canada GCS (Zimmerman y Weindorf, 2010)	1	Intercambiable	30 mL 0.1 M NaNO ₃ , 1.5 h, 25 °C	Suelos/sedimentos
	2	Adsorbida	30 mL 1 M NaHOac pH5/CH ₃ COOH, 1.5 h, 25 °C	
	3	Materia orgánica	30 mL 0.1 M Na ₄ P ₂ O ₇ , 1.5 h, 25 °C	
	4	Oxihidróxidos amorfos	30 mL de 0.25 mol NH ₂ OH·HCl en 0.5 mol HCl, 1.5 h, 60 °C	
	5	Óxidos cristalinos	30 mL 1 M NH ₂ OH·HCl en 25% HOAc, 1.5 h, 90 °C	
	6	Residual	HF, HNO ₃ , HClO ₄	
	7			
Parviainen (2009)	1	Soluble en agua	1.000 g de muestra en 50 mL de H ₂ O ₂ desionizada, agitar por 1 h en RT	Residuos mineros
	2		20 mL de 1.0 M CH ₃ COONa, agitar por 6 h en RT	

		Intercambiable, adsorbida y ligada a carbonatos		
	3	Oxihidróxidos de Fe	0.2 M $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ agitar por 1 h en la oscuridad en RT	
	4	Óxidos de Fe	0.2 M $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ en baño de agua a 80 °C por 2 h	
	5	Sulfuros	750 mg de KClO_3 y 5 + 10 mL de 12 M HCl + 10 mL de 4 M HNO_3 , en un baño de agua a 90 °C por 20 min	
Vázquez (2007) (modificado de Tessier 1979 y Xiangdong 2001)	1	Soluble en agua	H_2O a un pH 5.5, agitación 20 min a 30 rpm	Residuos mineros
	2	Intercambiable	MgCl_2 (0.5M), agitación 20 min a 30 rpm	
	3	Carbonatos	CH_3COONa (1M) pH 5.5, agitación 5 h a 30 rpm	
	4	Óxidos de Fe	$\text{NH}_4\text{OH.HCl}$ (0.04 M) a 25% v/v con CH_3COOH , 96 °C por 4 h, agitación 20 min a 3000 rpm	
	5	Sulfuros	* H_2O_2 al 30% a pH 2 ajustado con HNO_3 , segunda etapa al 37% $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (3.2M) v/v, con HNO_3 96°C por 8h agitación 20 min	
	6	Residual	Digestión total, HF: HNO_3 :	

Los métodos de ES mencionados anteriormente son diseñados para la extracción de metales catiónicos, por lo que no es conveniente utilizar estos métodos para conocer el fraccionamiento de elementos que preponderantemente se asocian de forma aniónica (p. Ej.: As) en distintas fases (Keon, 2001). Varios autores han propuesto métodos de ES para la extracción de aniones, especialmente de As; en la Tabla 4, se muestra un resumen con los principales métodos.

Tabla 4. Protocolos de Extracción Secuencial para Aniones

Método	Fracciones	Procedimiento	Matriz	
Keon <i>et al</i> (2001)	1	As unido iónicamente	1 M MgCl ₂ , pH 8, 2 h, 25 °C	Sedimentos
	2	As fuertemente adsorbido	1 M NaH ₂ PO ₄ , pH 5, 16 y 24 h, 25 °C	
	3	As ligado a carbonatos	1 N HCl, 1 h, 25 °C	
	4	As unido a oxihidróxidos de Fe amorfos	0.2 M oxalato de amonio/ácido oxálico, pH 3, 2 h, 25 °C en oscuridad	
	5	As unido a oxihidróxidos de Fe cristalinos	0.05 M Ti(III)-citrato-EDTA-bicarbonato, pH 7, 2 h, 25 °C	
	6	As unido a silicatos	10 M HF, 1 y 24 h, 25 °C adicionar 5 g ácido bórico a 16 h	
	7	As coprecipitado con pirita	16 N HNO ₃ , 2 h, 25 °C	
	8	As residual	16 N HNO ₃ + 30% H ₂ O ₂	
Mclaren <i>et al.</i> (1998)	1	As intercambiable	2 gr de muestra y Membrana de intercambio aniónico en 30 mL de agua desionizada. 24 h	Suelo
	2	As asociado a superficies minerales del suelo	30 mL NaHCO ₃ (5 M, pH 8.5. 16 h)	
	3	As adsorbido en minerales de Fe y Al	30 mL de NaOH (0.1 M) 16 h.	
	4	As adsorbido en las superficies internas de los agregados del suelo	30 mL de NaOH (0.1 M) se dispersa por 3 min con una sonda ultrasónica y después se agita por 16 h.	

	5	As asociado a Ca	30 mL de HCl (1 M) 16 h. La solución se centrifuga, se filtra en una membrana de 45 micras, El residuo del suelo se seca en horno a 60 ° C durante 48 h y después se muele finamente en un mortero de ágata	
	6	As residual	Se determina el As residual analizando el residuo del suelo secado en el paso 5.	
Wensel <i>et al.</i> (2001)	1	Intercambiable	(NH ₄) ₂ SO ₄ (0.05 M). Agitar por 4 h a 20 °C	Suelo
	2	As fuertemente adsorbido	(NH ₄)H ₂ PO ₄ (0.05 M). Agitar por 16 h a 20 °C.	
	3	Óxidos Fe amorfos	NH ₄ -oxalato (0.2 M); pH 3.25. Agitar por 4 h en la oscuridad a 20 °C.	
	4	Óxidos de Fe cristalinos	NH ₄ -oxalato (0.2 M); + ácido ascórbico (0.1 M); pH 3.25. 30 min en un baño de agua a 90 °C.	
	5	Residual	HCl + HNO ₃ . Agitar 1 h por 70 °C.	
Vázquez (2007) (modificado de Tessier, 1979 y Keon, 2001)	1	Soluble en agua	H ₂ O a un pH 5.5, Agitación 20 min a 30 rpm	Suelo/residuos
	2	Intercambiable	MgCl ₂ (0.5M). Agitación 20 min a 30 rpm	
	3	Unido a carbonatos	CH ₃ COONa (1M) pH 5.5 Agitación 5 h a 30 rpm	
	4	Intercambiable aniónicamente	NaH ₂ PO ₄ Agitación de 2 periodos de 24 h. Periodo 1 (1M), Periodo 2 (1.5 M) a 30 rpm.	
	5	Unido a óxidos de Fe	NH ₂ •OH.HCl (0.04 M) a 25% v/v con CH ₃ COOH, 96°C por 4 h, Agitación 20 min a 30 rpm	
	6	Unido a M.O y sulfuros	H ₂ O ₂ al 30% a pH 2 ajustado con HNO ₃ , segunda etapa al 37% CH ₃ COONH ₄ (3.2M) v/v,	

			con HNO ₃ 96°C por 8h agitación 20 min a 30 rpm	
	7	Residual	HF, HNO ₃	

2.7 Contaminación de recursos hídricos por residuos mineros

La minería puede causar contaminación de cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos debido a entre otras cosas, la dispersión de contaminantes a partir de los residuos mineros que genera. La contaminación del agua por residuos de mina puede ser durante décadas e incluso siglos después del cierre de una mina. Los impactos que se generan, dependen de la composición de minerales que se extraen, la estabilidad del terreno en donde se encuentran los residuos, la tecnología empleada para la construcción de los depósitos y del manejo adecuado de los residuos por parte de las compañías mineras (ARM, 2004).

Si los residuos son sulfurosos, al ser expuestos al ambiente, se lleva a cabo la oxidación de estos y se generan soluciones ácidas (DAR) que pueden filtrarse hasta el agua subterránea, verterse en los arroyos, ríos o lagos cercanos. El DAR degrada severamente la calidad del agua y puede acabar con la vida acuática.

El agua puede también contaminarse por los metales y metaloides que se encuentran en los residuos, estos pueden ser lixiviados al estar en contacto con el agua y filtrarse hacia al agua subterránea o llegar a cuerpos de agua superficiales.

La filtración de soluciones que contienen metales y metaloides depende de las condiciones geoquímicas en las que se encuentren, algunos metales pueden coprecipitar o adsorberse en una fase sólida e inmovilizarse y no llegar hacia los cuerpos de agua (Pauwels *et al.* 2010).

Evaluar el potencial de movilización de metales y metaloides a partir de residuos es importante para proponer las medidas necesarias para la remediación de los sitios contaminados o prevenir la contaminación de recursos hídricos por metales mediante el manejo adecuado de los residuos mineros.

CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

3.1 Minería en Cerro de San Pedro, SLP

El municipio Cerro de San Pedro está localizado al centro del estado de San Luis Potosí, colinda al Norte y al Oeste con los municipios de Soledad de Graciano Sánchez, al este con Armadillo de los Infantes y al Sur con el municipio de San Luis Potosí (Figura 4). En este sitio se localiza un yacimiento con elevado contenido de oro y plata, además de otros metales (SEMIP, 1992).



Figura 4. Localización de Cerro de San Pedro (Modificado de Martínez, 2010)

La actividad minera inició en 1592 cuando se descubrió que en el sitio había minerales de oro y plata. Las actividades mineras de exploración, extracción y beneficio impulsaron el surgimiento de haciendas como Real del Monte Caldera, Portezuelo, San Francisco de los Pozos, Armadillo,

Cuesta de Campa, La Pila, Pardo y los pueblos de San Miguel de Mexquitic y San Luis Potosí (Salazar, 2000).

A finales del siglo XIX, se contabilizaban en el sitio al menos 16 minas activas, sin embargo, la explotación se intensificó debido a las actividades de la Compañía Metalúrgica Mexicana en 1904, que posicionó al municipio dentro del mercado mundial, situación que se acentuó cuando dicha empresa fue comprada por la compañía ASARCO (American Smelting and Refining Company) en 1923 (Martínez, 2010).

La extracción en ese periodo fue del orden de 10,000 toneladas mensuales de mineral con contenido de oro, plata, plomo y zinc (Balbotin, 1972).

En 1948, la compañía ASARCO abandona Cerro de San Pedro, sin realizar la adecuada disposición de los residuos generados. Después de esa fecha, los derechos de concesión y explotación quedan en propiedad de particulares y de algunas compañías, entre ellas La Victoria y Anexas S.A; quien también en algún punto de la historia abandona las actividades dejando sus residuos sin ningún control adecuado (Martínez, 2010).

Las actividades mineras siguieron aunque a pequeña escala y de manera artesanal por parte de particulares, hasta que en 2005 la compañía minera San Xavier tomó por derecho de concesión las actividades (Martínez, 2010).

Durante las etapas de producción a lo largo de los años se generaron diferentes tipos de residuos de mina, de acuerdo a los distintos procesos utilizados para la extracción del material. Razo y colaboradores (2007) reportaron 23 depósitos de residuos mineros abandonados, siendo principalmente material estéril depositado en forma de terreros y residuos tipo jales de lixiviación con cianuro en piletas.

En este trabajo se destaca en especial a los residuos llamados “Patio Victoria” (Figura 5) ubicados al suroeste del poblado Cerro de San Pedro (Razo, 2007). Estos residuos son de un gran volumen (150,000 toneladas) y estudios previos han demostrado su peligrosidad al ambiente asociada a la generación de DAR y la movilidad química de arsénico y cadmio (Vázquez, 2011). Se estima que estos residuos corresponden al material estéril del socavón Victoria y del tiro San Pedro, aunque se desconoce qué tipo de procesamiento los generó.

En el sitio también hay residuos tipo escoria, provenientes de los procesos de fundición.



Figura 5. Depósito de residuos en Cerro de San Pedro llamados “Patio Victoria”

Actualmente, la explotación minera se lleva a cabo por parte de la Minera San Xavier, la cual es subsidiaria de la compañía New Gold Inc. El proyecto minero consiste en el minado a tajo abierto y el beneficio de mineral se realiza por medio del proceso de lixiviación en montones con una solución en base de cianuro de sodio.

3.2 Aspectos socio-demográficos

El municipio Cerro de San Pedro tenía en el 2010 una población total de 4021 personas, siendo 2,031 hombres y 1990 mujeres. El porcentaje de población con respecto al estado es de 0.16. Su densidad de población era de 32.81 hab/km² (INEGI, 2010).

3.3 Aspectos socio-económicos

La población económicamente activa era de 1476 habitantes, con 1418 habitantes ocupados y 58 desocupados (INEGI, 2010).

La tasa de participación económica de acuerdo al censo de población y vivienda 2010, era de 49.30 %, siendo 73.89 % hombres y 25.07 % mujeres.

En el municipio Cerro de San Pedro, el porcentaje de analfabetismo es de 6.93 % y el grado promedio de escolaridad era de 7.77 años (INEGI, 2010).

El 62.74 % de la población contaba con derechos a servicios de salud gratuito.

El índice de marginación en el municipio es de -0.87, teniendo un grado de marginación bajo (INEGI, 2010).

El índice de desarrollo humano en el 2005 era de 0.80 teniendo un grado de desarrollo humano medio (INEGI, 2010).

3.4 Geología y geomorfología

3.4.1 Geología Regional

El municipio Cerro de San Pedro, según la Carta Geológico Minera y Geoquímica de San Luis Potosí, escala 1:50,000 (Tristan *et al.*, 2002), se localiza en la parte centro sur de la Mesa Central de México. Paleogeográficamente cubre parte de la porción oriental de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, la cual es una cuenca extensa que contiene más de 700,000 km³ de sedimentos marinos del Triásico Superior, Jurásico Superior, Cretácico Inferior y Cretácico Superior. Este sitio también abarca parte del talud de la parte occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (Carillo-Bravo, 1982). La mayor parte de la carta geológica en la que se enmarca el sitio de estudio, se encuentra cubierta por productos volcánicos especialmente piroclásticos y derrames de lava desde composiciones intermedias hasta silícica del Terciario (Oligoceno), que corresponden al Campo Volcánico de San Luis Potosí (Labarthe *et al.*, 1982).

3.4.2 Geología de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra casi en los límites con la plataforma Valles-San Luis Potosí, se distinguen formaciones sedimentarias desde el Aptiano (Cretácico Inferior) hasta el Turoniano (Cretácico Superior). La mayor parte de las rocas sedimentarias son calcáreas, con algunas intercalaciones arcillosas; En algunas partes se encuentran derrames de rocas ígneas terciarias que cubren a esta secuencia sedimentaria. En la parte central del yacimiento se localiza un cuerpo intrusivo terciario de composición monzodiorítica (MSX, 2010).

3.4.3 Yacimiento Mineral

El depósito mineral de Cerro de San Pedro se caracteriza por una zona superior de minerales de oro y plata asociados con óxidos de hierro limoníticos, y una zona inferior de sulfuros con contenido de oro, plata, zinc y plomo, ambas alojadas en un pórfido intrusivo monzodiorítico, el cual fue emplazado en una secuencia sedimentaria calcárea a calcáreo-arcillosa de edad Cretácica. Todo este complejo fue cubierto por rocas volcánicas félsicas de edad Terciaria pertenecientes al Campo Volcánico de San Luis Potosí. (New Gold, 2012).

3.5 Hidrografía

El área de estudio se ubica dentro de la Región Hidrológica 37 El Salado, en la cuenca GRH37. El sistema de la cuenca es de tipo endorreico, en donde las corrientes superficiales concentran el agua en la parte más baja en donde se infiltra o se evapora. Se limita al Sur por la sierra de San Miguelito, al Este por la serranía de San Pedro, sierra de Álvarez y sierra Las Paradas, al Norte por el cerro Los Lirios y El Ojito, y al Oeste por la sierra El Durazno, sierra el Maestrante y cerro El Almagre.

Esta cuenca se caracteriza por una serie de cuencas cerradas, con pocas elevaciones importantes y por lo tanto carece de grandes corrientes superficiales. Las corrientes superficiales son del régimen torrencial efímero y por lo general se forman en épocas de lluvias y su curso es muy reducido, ya que el agua desaparece en las llanuras al corto tiempo por evaporación o infiltración

Las escorrentías superficiales son intermitentes y no hay lagos o manantiales ni existen aprovechamientos de agua subterránea (CONAGUA, 2005).

La corriente principal en la zona de estudio es el arroyo San Pedro, que captura la mayoría de las corrientes de la Sierra de San Pedro. Este arroyo fluye de este a suroeste y ocupa una extensión de aproximadamente 10,900 km² hasta su desembocadura en el valle de San Luís Potosí. Sus afluentes más importantes son los arroyos San Nicolás, Jesús María y Los Méndez.

3.6 Clima

El área de estudio presenta básicamente 4 tipos de clima, todos del tipo del grupo B, climas secos, según la clasificación mundial de tipo de clima de Köppen, modificada por Enriqueta García.

Los cuatro tipos de clima que se pueden encontrar son los siguientes (MSX, 2010):

1. Bs1hw, es un clima semiárido, semicálido, con una temperatura media anual mayor de 18°C, con una temperatura en el mes más frío menor a 18°C, y en el mes más cálido mayor a 22°C, presenta lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
2. Bs1kw, que es un clima semiárido, templado, con una temperatura media anual entre 12 y 18°C, con una temperatura en el mes más frío entre -3 y 18 C, y en el mes más caliente menor a 22°C, presenta lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2 % del total anual.
3. BSohw, que es un clima árido, semicálido, con una temperatura media anual entre 18 y 22°C, con una temperatura en el mes más frío menor a 18°C, y en el mes más caliente mayor a 22°C, presenta lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

4. BSokw, que es un clima árido, templado, con una temperatura media anual entre 12 y 18°C, con una temperatura en el mes más frío entre -3 y 18°C, presenta lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2 % del total anual.

3.6.1 Meteorología

En el sitio existe la estación meteorológica MSX-CSP-01, teniendo las coordenadas 22° 13' 33" N, 100° 48' 17" O, a una altitud de 2264 m.s.n.m.

Los datos registrados por la estación, del periodo 2002 al 2008, son los siguientes (MSX, 2010):

Temperatura

Se presenta una temperatura media anual de 15.2°C, máxima anual promedio de 21.6°C y una mínima anual promedio de 10.6°C.

Precipitación

Se presenta una precipitación total anual de 131.1 mm, una máxima anual de 306.1 mm, una máxima en 24 h de 36.6 mm y una máxima en 1 h de 21.5 mm.

Evaporación

Se presenta una evaporación media anual de 1817.9 mm.

Dirección y velocidad del viento promedio

Según la rosa de vientos registrada para el periodo 2001-2006 el viento dominante sopla en dirección de oeste a este con una velocidad promedio anual de 4.93 m/s.

3.7 Edafología

Los suelos que predominan en el área de estudio son el leptosol y el xerosol. El suelo leptosol descansa sobre un estrato duro y continuo, su espesor es menor a 10 cm, puede sustentar cualquier tipo de vegetación. El suelo xerosol es un suelo de zonas áridas, su ubicación está restringida a las zonas áridas y semiáridas del centro y norte del país; la vegetación que sustenta son matorrales y pastizales; contienen materia orgánica, su capa superficial es clara y debajo puede haber acumulación de arcillas, carbonatos o sulfatos (González, 2005).

CAPÍTULO 4. JUSTIFICACIÓN

La industria minera produce una gran cantidad de residuos en los diferentes tipos de extracción para recuperar metales esenciales para el desarrollo económico. Los residuos mineros pueden contener metales y metaloides, entre ellos Pb, Cd, Ag, Au, As, Se, etc. La disponibilidad de estos metales y metaloides y su potencial para movilizarse a partir de los residuos y perfiles de suelo impactados hacia el agua subterránea así como la posibilidad de que estén disponibles a otros medios (plantas, organismos) no se basa en la concentración total en la que se encuentren sino en su fracción móvil.

Los metales que se encuentran en los residuos mineros, no siempre se movilizan, todo depende de una serie de factores como la especiación, el pH, las condiciones redox, la presencia de materia orgánica, óxidos de hierro o manganeso y carbonatos, entre otros. (Alloway, 1995).

Cada sitio minero tiene características específicas de las condiciones en las que se encuentran los residuos y su potencial de movilización de metales y metaloides. Estudiar específicamente cada sitio es de suma importancia para entender el comportamiento ambiental de los residuos y su peligrosidad al ambiente.

En las actividades mineras de Cerro de San Pedro, en sus diferentes etapas de desarrollo, se han generado diversos tipos de residuos. Algunos estudios han evaluado parte de los depósitos encontrados en CSP, concluyendo que son residuos con altas concentraciones de metales y metaloides (Razo 2007, Vázquez 2011), sin embargo, existen en el sitio depósitos de residuos de los cuales no se cuenta con información sobre las características de peligrosidad al ambiente. Estos residuos pueden contener metales y metaloides que de acuerdo con diversos factores

podrían tener un alto potencial de movilización e impacto en los recursos hídricos, pudiendo afectar a otros medios como organismos y plantas.

La caracterización del potencial de movilización de metales y metaloides en los residuos mineros de la microcuenca San Pedro del municipio Cerro de San Pedro es esencial para conocer en qué condiciones se encuentran tales elementos y bajo qué circunstancias podrían moverse.

Un mejor conocimiento de las condiciones de movilización de los metales y metaloides en los depósitos de residuos que se encuentran en la subcuenca San Pedro, contribuye de gran manera al desarrollo de propuestas para medidas de prevención y/o remediación en los sitios de estudio con el fin de lograr una minería responsable.

CAPÍTULO 5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente Proyecto consiste en la evaluación de los residuos mineros ubicados en la cuenca San Pedro ubicada en el distrito minero Cerro de San Pedro, con el fin de identificar cuáles de ellos tienen el potencial para liberar metales y metaloides y de esta manera representen un riesgo para la calidad de los recursos hídricos de la cuenca, haciendo énfasis en las características particulares de los residuos, así como identificando los factores clave que faciliten los procesos de movilización/retención de elementos.

5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar un inventario de residuos históricos, en la subcuenca del río San Pedro ubicada en el distrito minero Cerro de San Pedro, San Luis Potosí.
- Caracterizar fisicoquímicamente aquellas muestras representativas de los residuos históricos presentes en la subcuenca del río San Pedro.
- Caracterizar mineralógicamente muestras representativas de los residuos históricos presentes en la subcuenca del río San Pedro.
- Identificar el potencial de movilización de metales y metaloides a partir de los residuos e investigar la fracción operacional a la que están asociados.

CAPITULO 6. METODOLOGÍA

6.1 Inventario de residuos históricos

En un sitio minero puede existir una gran cantidad y diversidad de depósitos de residuos mineros, y evaluar las características fisicoquímicas, químicas, mineralógicas así como el potencial de movilidad de metales y metaloides al agua subterránea de cada uno de ellos puede resultar un proceso largo y costoso.

Es por eso que con el fin de muestrear y analizar los residuos de una manera más eficiente, en el tiempo y con recursos óptimos, se diseñó e implementó un instrumento de evaluación llamado “Inventario de Residuos” que tiene el objetivo de identificar, del total de depósitos de residuos en el sitio minero, aquellos que puedan representar un peligro ambiental hacia los medios ambientales que lo rodean, de acuerdo a ciertas consideraciones.

Para el desarrollo de este instrumento, se analizaron qué características de campo presentes en los depósitos de residuos podrían estar indicando un riesgo de movilidad de elementos potencialmente tóxicos. Las características que se tomaron en cuenta y el criterio para determinar si el depósito las presentaba se enlistan en la Tabla 5.

Tabla 5. Características y criterios de campo para la evaluación de los depósitos de residuos mineros

Características		Criterio
Alteraciones químicas	Oxidación de minerales sulfurosos	Tal como se explicó en el apartado 2.3.1 y 2.3.2, la oxidación de los minerales sulfuros genera DAR y este moviliza metales y metaloides. En campo se puede identificar el proceso porque el depósito presenta coloración amarillenta u ocre, en algunas zonas o en el depósito en general. El color amarillo u ocre en los depósitos es debido a la precipitación de hidróxidos de Fe que ocurre en los procesos de oxidación. Los hidróxidos de Fe son de color amarillo-naranja (Dueñas, 2010). Es necesario tener en cuenta algunos antecedentes de la mineralogía del depósito, ya que en ciertos sitios, el color ocre podría no estar indicando procesos de oxidación sino minerales oriundos de la zona de estudio
	Generación DAR	El DAR promueve la movilidad de metales y metaloides al disolver iones metálicos. La evidencia de que se están llevando a cabo procesos de DAR, son la presencia en la superficie del depósito de charcos o escurrimientos de color rojizo (ion Fe (III)) (Lottermoser, 2007).
Composición mineralógica	Sulfuros	La presencia de sulfuros en el depósito va a determinar la ocurrencia de procesos de oxidación y consecuentemente la generación de DAR. Los sulfuros son estables y muy insolubles bajo las condiciones reductoras que existen en el subsuelo, pero al exponerlos a condiciones atmosféricas se desestabiliza su estructura mediante reacciones de oxidación. Se puede identificar en campo por su color, generalmente son opacos con colores y rayas distintivos. La pirita que suele ser la más abundante tiene un color gris-amarillo bronce con color de raya gris parda o negra y tiene un brillo metálico resplandeciente (UPV, 2009).
	Sulfatos	En la reacción de oxidación de los sulfuros, los sulfatos aparecen como productos (ver sección 2.3.1). Algunos sulfatos como la anglesita ($PbSO_4$) o la jarosita tienen solubilidad muy bajas (los productos de la solubilidad son: $10^{-7.9}$ y 10^{-11} respectivamente) (Ferguson, 1990) y podrían inmovilizar elementos, pero aun así la presencia de estos en los residuos podría indicar que se han llevado a cabo procesos de oxidación y generación de DAR, de ahí su importancia. Se pueden identificar en campo por su color que es generalmente blanco (UPV, 2009).
	Óxidos de Fe-Mn	La presencia de óxidos de Fe-Mn en el depósito, estos materiales son de una coloración que va desde el amarillo-ocre-rojizo. Además, al hacerle prueba del tacto mancha los dedos del color del mineral. Los minerales más comunes presentes en los residuos pueden ser la gohetita, ferrihidrita, hematita.

	Carbonatos	Presencia de minerales como calcita, rocas calizas. Estas se pueden identificar a simple vista o a través de la aplicación de HCl al 10 % determinado su nivel de reacción (efervescencia) visible y audible.
	Arcillas	Las arcillas se pueden identificar realizando una prueba de tacto humedeciendo este material y comprobando su plasticidad y maleabilidad.
Elementos de erosión	Erosión laminar	La erosión es el proceso físico que consiste en el desprendimiento, transporte y deposición de partículas del suelo. Si este proceso de dispersión se lleva a cabo en los depósitos de residuos, podrían dispersarse elementos y llegar a movilizarse (ver sección 2.4). Las formas más comunes de erosión son: la erosión laminar, la erosión en surcos y la erosión en cárcavas (Loredo <i>et al</i> , 2007). La erosión laminar es el proceso inicial y se observa en la superficie del depósito, el grado de deslave del material en capas.
	Erosión en Surcos	Es un grado más avanzado de la erosión, se observan en el depósito la existencia de pequeños canales o grietas
	Erosión en Cárcavas	La erosión en cárcavas es el proceso más severo, puede iniciar movimientos de masas en las pendientes abruptas y esto puede tener implicaciones en la estabilidad física de los residuos y en la renovación de superficies reactivas. Se observan en el depósito la presencia de surcos grandes y profundos que evidencian la pérdida de material por efectos de la lluvia.
Elementos de dispersión	Pendiente abrupta	La pendiente abrupta se relaciona con procesos de dispersividad y posteriormente procesos de movilidad de elementos, ya que por procesos hidráulicos se puede remover el material fácilmente. En campo se establece el nivel de la pendiente en relación entre el depósito y la superficie del terreno; siendo plana (de 0° a 1°), ligeramente suave (de 1° a 3°), suave (de 3° a 5°), moderada (de 5° a 15°) y fuerte (mayor a 15°) (MOPUT, 1991).
	Arrastre fluvial	En campo se puede identificar el arrastre fluvial por la presencia de corrientes de agua adyacentes a los depósitos. El arrastre fluvial dispersa las partículas o fragmentos del material que componen al depósito.
	Arrastre pluvial	En campo se verifica con la presencia de montículos que han sido arrastrados por la acumulación de lluvia en el material, se observan surcos en la superficie y al final de éstos el material depositado.
	Arrastre eólico	Se identifica presencia de polvo en el ambiente por aire o la presencia de este en la vegetación aledaña al depósito

	Presencia de partículas finas	Las partículas finas son un factor de relevancia ambiental que influye directamente en la movilidad de los metales y metaloides. Se establece por apreciación del experto al determinar la relación de material fino existente (menor a 2mm) en la totalidad del depósito.
Otros	Materia Orgánica	Identificación visual de capas de color negro relacionadas al sustrato vegetal y determinado por la aplicación de H ₂ O ₂ , estableciendo su nivel de reacción (efervescencia) visible y audible.
	Presencia de vegetación	Establecer la densidad y cobertura de especies vegetales (flora) presentes en el depósito y alrededor del mismo.
	Volumen aproximado (m ³)	Determinar el largo, ancho y alto del depósito.
	Área de cobertura (m ²)	Determinar el largo y ancho del depósito.

Se realizó una ponderación de estas características, es decir, se les asignó un valor numérico en la escala del 1 al 10, siendo las de mayor magnitud aquellas que tienen mayor interrelación con la movilidad, seguidas con las que tienen una relación media y las de menor magnitud las que tienen poca relación con la movilidad de metales y metaloides.

Las que tienen una interrelación mayor en relación con la movilidad son: la generación de drenaje ácido (DAR); la oxidación de minerales sulfurosos, la presencia de minerales sulfurosos, la presencia de cárcavas y surcos.

Las características que tienen una interrelación media, son: los sulfatos, la erosión laminar, el cuál es un proceso inicial de la erosión, los arrastres fluvial, pluvial y eólico y presencia de partículas finas.

También se tienen características que podrían atenuar la movilidad (representadas en la Tabla 6 en color azul), entre las más significativas se encuentran los carbonatos, las arcillas, materia orgánica, la presencia de vegetación.

Al volumen de los depósitos, se le otorgó un valor numérico mayor, medio y menor si sobrepasaba los 50,000 m³, de 10,000 a 50,000 m³, y entre 1,000 y 10,000 m³.

El valor numérico que se otorgó a cada una de las características de campo se encuentra en la Tabla 6, la suma de las características que promueven la movilidad de metales y metaloides es 109 y de las características atenuantes es 22, en total suman 131 puntos.

Tabla 6. Valor numérico de las características de campo

Características		Valor	
		Característica /presencia	Característica / ausencia
Alteraciones Químicas	DAR	10	0
	Oxidación	9	0
Composición Mineralógica	Sulfuros	8	0
	Sulfatos	5	0
	Óxidos	5	0
	Carbonatos	7	0
	Arcillas	5	0
Elementos de erosión	Laminar	6	0
	Surcos	8	0
	Cárcavas	10	0
Elementos de dispersión	Relieve: Pendiente abrupta	8	0
	A. fluvial	7	0
	A. Pluvial	5	0
	A. eólico	2	0

	Part. Finas	6	0
Otros	M.O	3	0
	Vegetación entorno	3	0
	Vegetación deposito	4	0
	Volumen	1,5 o 10	0
	Área	1,5 o 10	0
	Adversas	Total	109
Atenuantes	Total	22	
	Total	131	

Nota: En color rojo, los correspondientes a las características adversas, en color azul, los correspondientes a las características atenuantes.

Para asignarle un valor numérico total a cada depósito de residuos, se creó un índice de selección nombrado “Índice de Selección Ambiental” (ISA), que es igual al total de las características adversas entre el valor total por la sumatoria de las características adversas que presenta cada depósito de residuos, menos el total de las características atenuantes entre el valor total por la sumatoria de las características atenuantes que presenta cada depósito de residuos.

$$ISA = [(103/131) * \sum \text{Características adversas del depósito}] - [(22/131) * \sum \text{Características atenuantes del depósito}]$$

Y para establecer qué tipo de caracterización ambiental se realizaría a cada depósito de residuos se creó una escala de acuerdo al ISA (Figura 6), si el ISA está entre 0.75 y 1, se haría un muestreo dirigido, una caracterización fisicoquímica, química y mineralógica además de investigar la movilidad de metales y metaloides en agua meteórica e investigar la fracción operacional a los

que estos se asocian, si el ISA está entre 0.50 y 0.75, se haría una caracterización fisicoquímica, química y mineralógica y estudios de movilidad en agua meteórica, cuando el ISA resultaba entre 0.25 y 0.50 se haría solo una caracterización fisicoquímica y química, si en cambio el ISA resultaba entre 0 y 0.24 estaría indicando, de acuerdo a este instrumento de evaluación de campo, ninguna peligro de movilidad de elementos potencialmente tóxicos.

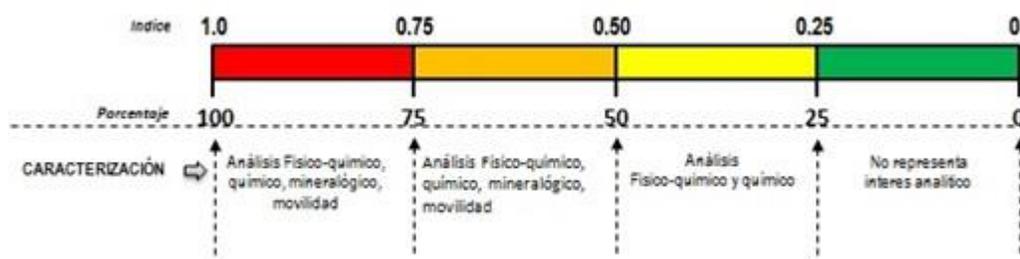


Figura 6. Escala de selección para caracterización y muestreo

6.1 Aplicación del “Inventario de residuos” al sitio de estudio

El área de estudio seleccionada para llevar a cabo el “Inventario de residuos históricos” fue la subcuenca del río San Pedro, ubicada en el distrito minero Cerro de San Pedro. En esta subcuenca se encontraron, a través de antecedentes y recorridos por el sitio, diecisiete depósitos residuos mineros representados en la Figura 7; a cada uno de los depósitos se les asignó una identificación de la siguiente manera: SP-Nº asignado/INV. En el Anexo 7, se encuentran las Fichas de campo de los depósitos encontrados.

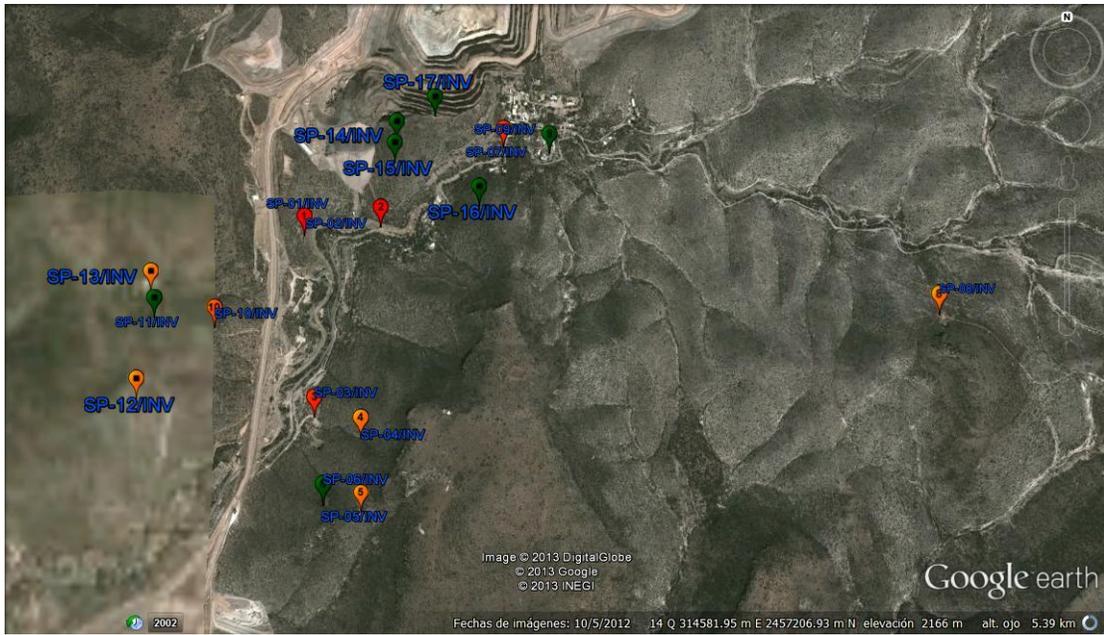


Figura 7. Depósitos de residuos mineros en la subcuenca del río San Pedro

Se realizó un levantamiento con un formato de campo de las características establecidas para este instrumento en el sitio de estudio, si el depósito presentaba la característica de campo se le asignaba el valor numérico correspondiente y si no se le asignaba el valor de cero. Algunas de las imágenes de los residuos se muestran en las Figuras 8 y 9.



Figura 8. Residuos SP-01/INV



Figura 9. Residuos SP-05/INV

El resultado del ISA para cada uno de ellos se enlista en la Tabla 7. Como podemos observar en la Tabla, en la escala más alta (1-0.75) se sitúan dos depósitos de residuos, SP-01/INV y SP-02/INV, ya que estos presentaban la mayoría de las características adversas, tal como se observa en la Figura 8, en donde se puede apreciar el avanzado proceso de oxidación por los colores amarillo, ocre y rojizo de los depósitos, charcos de color rojo y ácidos, manchones blancos que indican presencia de sulfatos, y cuentan con una pendiente muy pronunciada etc., estos residuos además no presentan ninguna característica atenuante. Estos residuos pertenecen al depósito llamado “Patio Victoria”

En la siguiente escala se sitúan dos más, SP-07/INV Y SP10/INV, estos residuos presentan un volumen aproximado de 90,000 m³ y 19,000 m³, se encuentran en una pendiente abrupta, están compuestos de partículas muy finas y tienen elementos de erosión avanzada, entre otras características adversas, sin embargo no presentan evidencia de generación de DAR ni las características relacionadas con este proceso.

En la siguiente escala (0.25-0.50) se encuentran seis depósitos de residuos, estos presentan características muy similares, no presentan ninguna evidencia de generación de DAR, sin embargo se conforman de partículas finas, son de un volumen medio y se encuentran en una pendiente abrupta muy cercana al arroyo; en la última escala se encuentran los últimos siete depósitos, los cuales no presentaron ninguna evidencia de peligrosidad ambiental.

En el Anexo 1, se encuentra el procedimiento detallado para el cálculo del ISA de cada uno de los depósitos.

Tabla 7. Resultado “ISA” para cada depósito de residuos mineros en la subcuenca del río San Pedro

No.	Depósito	ISA
1	SP-01	0.84
2	SP-02	0.84
3	SP-07/INV	0.52
4	SP-10/INV	0.51
5	SP-03/INV	0.35
6	SP-04/INV	0.29
7	SP-05/INV	0.26
8	SP-08/INV	0.35
9	SP-12/INV	0.27
10	SP-13/INV	0.47
11	SP-09/INV	0.21
12	SP-06/INV	0.14
13	SP-11/INV	0.17
14	SP-14/INV	0.23
15	SP-15/INV	0.23
16	SP-16/INV	0.22
17	SP-17/INV	0.22

Nota: En color rojo, los correspondientes a la escala de 0.75-1, en color naranja: 0.5-0.75, en color amarillo: 0.25-0.5, en color verde: 0-0.25.

La decisión que se tomó sobre acciones posteriores en cada uno de ellos, de acuerdo a la escala de selección para los residuos mineros, se presenta en Tabla 8.

Tabla 8. Caracterización realizada a los residuos mineros de la subcuenca San Pedro

No. Inventario	Caracterización
SP-01	Fisicoquímica, química, mineralógica, análisis de movilidad, fracción operacional
SP-02	Fisicoquímica, química, mineralógica, análisis de movilidad, fracción operacional
SP-07/INV	Fisicoquímica, química, mineralógica, análisis de movilidad, fracción operacional
SP-10/INV	Fisicoquímica, química, mineralógica, análisis de movilidad, fracción operacional
SP-03/INV	Fisicoquímica, química, mineralógica, análisis de movilidad
SP-04/INV	Fisicoquímica
SP-05/INV	Fisicoquímica
SP-08/INV	Fisicoquímica
SP-12/INV	Fisicoquímica
SP-13/INV	Fisicoquímica
SP-09/INV	Fisicoquímica
SP-06/INV	Fisicoquímica

Si bien, los residuos, SP-06/INV y SP-09/INV no tienen significancia y no era necesario realizarles ninguna prueba, se decidió hacerlo para comprobar la validez de este instrumento, además se decidió realizar la prueba de movilidad al residuo SP-03/INV para comprobar la validez de este instrumento.

Así, con la creación de esta herramienta, se determinaron el número de sitios de muestreo y los análisis a realizar en cada una de las muestras obtenidas.

6.2 Muestreo

El muestro se realizó en los meses de enero a marzo del 2014, los sitios de inventario en los que se llevó a cabo el muestro se enlistan en la Tabla 9, además se señala la clave de identificación asignada a las muestras y su localización geográfica.

Tabla 9. Ubicación geográfica de las muestras

No. Muestra	ID de muestra	Ubicación Geográfica		
		X	Y	msnm
1	SP01-Rs-M1	313712	2457448	2000
2	SP01-RS-M2	313688	2457533	2002
3	SP01-RS-M3	313745	2457595	2001
4	SP02-RS-M1	313845	2457579	2005
5	SP02-RS-M2	313912	2457582	2013
6	SP02-RS-M3	313997	2457548	2005
7	SP07-RS-M1	315878	2457204	2130
8	SP10-RS-M1	313370	2457207	2049
9	SP04-Rs-M1	313907	2456812	2070
10	SP05-RS-M1	313917	2456568	2130
11	SP06-RS-M1	313781	2456590	2070
12	SP03-RS-M1	313907	2456812	2024
13	SP08-RS-M1	315878	2457204	2182
14	SP09-RS-M1	314561	2457834	2025
15	SP12-RS-M1	313096	2456961	2049
16	SP13-RS-M1	313135	2457341	2002

Para recolectar las muestras se retiró primeramente el material superficial y con la ayuda de un arnés se realizó un canal a lo largo de las paredes del depósito de 10 cm de profundidad para

tomar muestras compósito. Se recolectó aproximadamente 1 kg de muestra. Se realizó tamizado con una malla de 2 mm y cuarteo *in situ*, las muestras se colectaron en bolsas de polipropileno.

En el sitio SP-01/INV, se tomaron 3 muestras compósito. En el depósito se observan diferentes coloraciones y distintos tipos de pendientes, primeramente un color ocre en donde se tomó la primer muestra y con una pendiente menos pronunciada, seguido de un color más amarillo donde fue tomada la segunda muestra y por ultimo un color gris muy oscuro en donde se tomó la muestra 3 y en dónde las pendientes resultaron más abruptas. En la Figura 10, se presenta la imagen satelital de los puntos de muestreo para el sitio SP01-Rs.



Figura 10. Imagen satelital de los puntos de muestreo para el sitio SP01-Rs

El sitio SP-02/INV presenta una coloración ocre-rojiza, se tomaron tres muestras compósito a lo largo del depósito para evaluar de manera más completa al depósito debido a su gran tamaño. En la Figura 11 se presenta la imagen satelital de los puntos de muestreo para el sitio SP02-Rs.



Figura 11. Imagen satelital de los puntos de muestreo para el sitio SP02-Rs

A las muestras tomadas en los depósitos SP-01 y SP-02, las llamaremos muestras de “Patio Victoria”.

Algunas Fotografías del muestreo se presentan en la Figura 12.



Figura 12. Fotografías del muestreo en Patio Victoria

Para los sitios restantes (ver Tabla 9), se tomó una sola muestra por depósito debido a que los estos son homogéneos y de considerablemente menor tamaño. Las muestras se tomaron retirando el material superficial y realizando un canal a lo largo del depósito a los 10 cm de profundidad y recolectando una muestra compósito. Se recolectó aproximadamente 1 kg de muestra. Se realizó tamizado con una malla de 2mm y cuarteo *in situ*, las muestras se colectaron en bolsas de polipropileno. En la Figura 13 se presenta la toma de la muestra SP07-Rs-M1.



Figura 13. Fotografías del muestreo de SP07-Rs-M1

Las muestras SP-01-M1, SP-01-M2, SP-01-M3, SP-02-M1, SP-02-M2 Y SP-02-M3, se les asignó el nombre Patio Victoria. A las muestras SP-07 y SP-10, el nombre de residuos de Platería y el Porvenir III, respectivamente, mientras que al resto de las muestras, se les nombrara como terreros, para fines del presente trabajo.

6.3 Preparación de muestras

Todas las muestras se secaron a temperatura ambiente durante 48 a 72 h en un cuarto sin corrientes de aire (Figura 14). Una vez secas, se tamizaron en una criba de acero inoxidable de la serie Tyler de 2 mm (Figura 15).



Figura 14. Fotografía de secado de muestras a temperatura ambiente



Figura 15. Fotografía de cribado de muestras en malla 2 mm

Cada una de las muestras se redujo por el método de cuarteo, posteriormente se pasaron por un molino mecánico marca Retsch con mortero de ágata para reducir el tamaño de partícula.

6.4 Caracterización mineralógica de las muestras

6.4.1 Difracción de Rayos X

Se realizó la identificación de fases minerales por Difracción de Rayos X en algunas de las muestras, las muestras fueron seleccionadas de acuerdo a los resultados del “Inventario de Residuos” (ver Tabla 8). Además, se realizó el análisis a las muestras SP05-RS-M1, SP06-RS-M1 y SP08-RS-M1, para validación del “Inventario de Residuos”.

La preparación de las muestras para el análisis en DRX consistió en el molido de la muestra a un tamaño fino para después compactarlas en un portamuestras y colocarlas en el difractómetro para ser analizadas.

Los análisis se realizaron en el Instituto de Metalurgia de la UASLP, en el difractómetro marca Rigaku modelo DMAX 2200 equipado con filtro de níquel y una fuente de radiación $K\alpha$ de cobre ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$).

6.4.2 Análisis en Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Se realizó un análisis en el MEB de las muestras de Patio Victoria y de los residuos SP-07 y SP-10, las muestras fueron seleccionadas de acuerdo a los resultados del “Inventario de Residuos”.

El análisis se realizó en el microscopio Philips, modelo XL30. Con dimensiones cámara de 284 x 280 mm, el voltaje de aceleración utilizado fue de 20 kv, se utilizó además el detector de electrones retrodispersados (BSE) con un movimiento de la muestra X y Y de 50 mm.

6.5 Caracterización fisicoquímica de las muestras

6.5.1 Determinación de pH

Se realizó la medición del pH a todas las muestras de residuos de acuerdo al método de la EPA 9045C, que consiste en mezclar la muestra sólida con agua destilada (relación 1:10) durante 10 min, y medir con un potenciómetro calibrado previamente con sustancias buffer patrón de 4, 7 y 10.

6.6 Caracterización química de las muestras

6.6.1 Digestiones ácidas totales

Para conocer la concentración total de metales y metaloides (Pb, Cd, Zn, Cu, Fe, As, Ca), todas las muestras se sometieron a una digestión ácida total. El método utilizado ha sido validado previamente por Almaguer, 2010.

La digestión ácida total se llevó a cabo en un sistema abierto en una placa de calentamiento en un periodo de cinco días.

El primer día se agregó 0.1 g de la muestra en viales de polietileno y posteriormente se agregaron 1 mL de HNO₃ y 1 mL de HF. El segundo día se calentaron las muestras con los ácidos a 100°C por 8 h. El tercer día se liberaron los vapores generados, abriendo los viales, y esperando a que la muestra se disolviera para volver a cerrar. El cuarto día se agregó 1 mL de HCl y se calentó a 100°C por 8 h. El quinto día se agregó 1 mL de HNO₃ y 1 mL de agua desionizada, se dejó

por 6 h, y posteriormente se aforó en tubos de fondo cónico de 50 mL cada una de las muestras con agua desionizada.

6.7 Determinación de movilidad con agua meteórica

La NOM-141-SEMARNAT-2003 establece los criterios para determinar la peligrosidad ambiental de jales mineros, en esta norma se establece el procedimiento de movilidad de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en agua en equilibrio con CO₂ (agua meteórica, pH=5.5) y considera que la fracción que es soluble en agua es la que representa un riesgo ambiental ya que podría transferirse a otros medios.

En este trabajo se determinó la movilidad en agua en equilibrio con CO₂ utilizando el método establecido en la norma mencionada, cuya referencia es la prueba ASTM D 3987-85 de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés)

Las muestras que se sometieron a la prueba fueron las siguientes: SP01-Rs-M1, SP01-Rs-M2, SP01-Rs-M3, SP02-Rs-M1, SP02-Rs-M2, SP02-Rs-M3, SP07-Rs-M1, SP10-Rs-M1. Estas muestras se seleccionaron de acuerdo al “Inventario de Residuos”.

Las muestras fueron colocadas en tubos de fondo cónico con la solución de extracción en una relación 1:20 muestra/extractante, se utilizó 1 g de muestra y 20 mL de agua en equilibrio con CO₂. Los tubos de fondo cónico se mantuvieron en agitación continua durante 18 h, en un agitador orbital (Figura 16).



Figura 16. Fotografía de muestras en agitación continua por 18 h

Al término de la extracción se dejaron sedimentar las muestras, para posteriormente determinar el pH (Figura 17).



Figura 17. Fotografía de medición del pH después de la extracción

Para separar la fase acuosa se utilizó una membrana de $0.45 \mu\text{m}$ de apertura de poro acoplada a una bomba de vacío (Figura 18).



Figura 18. Fotografía de separación de fase acuosa en una membrana de 0.45 μm acoplada en una bomba de vacío

Para preservar la fase acuosa, se acidificó con HNO_3 al 37 %.

Como control de calidad, se analizaron un blanco y las muestras por duplicado.

6.8 Análisis de la movilidad mediante un protocolo de extracción secuencial

Para identificar la fracción a la que se encuentran asociados los metales y metaloides y analizar la movilidad de estos, se realizaron pruebas de extracción secuencial selectiva. El protocolo de extracción secuencial que se utilizó en este trabajo, tanto para cationes como aniones, fue el de Vázquez 2007, modificado de Tessier 1979, Xiangdong 2001 y Keon *et. al* 2001 (Tabla 10 y 11), con una modificación de Ortega 2012, este método fue utilizado en las muestras de Cerro de San Pedro ya que se contaban con las condiciones necesarias para su desarrollo, además que ha sido probado en muestras de suelo cercano a los depósitos de residuos de Cerro de San Pedro (Ortega, 2012). Cada una de las etapas de extracción se describe a continuación:

Fracción 1. Soluble en agua. La extracción de esta fracción provoca la liberación de los metales solubles en agua. Para realizar esta fracción se utilizó 0.5 g de muestra y se agitó con 8 mL de

agua desionizada a pH de 5.5 por 20 minutos en un equipo rotatorio marca Heidolph, modelo REAX20 a 30 rpm. Posteriormente los viales se centrifugaron a 3000 rpm durante 20 min, se separó y filtró el sobrenadante por medio de sifoneó y con un filtro de 0.45µm. La solución filtrada se acidificó con HNO₃ al 37% y se aforó a 50 mL con agua desionizada.

Fracción 2. Intercambiable catiónicamente. En esta fracción se encuentran los metales fácilmente intercambiables (no adsorbidos específicamente). La liberación de metales ocurre por intercambio iónico al agregar soluciones salinas altamente diluidas (Ecuación 5).



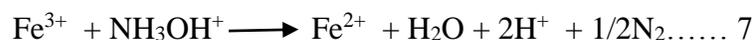
En esta fracción se agregaron 8 mL de MgCl₂ (1 M) al residuo de la fracción 1. Se mantuvo en agitación por 20 min a 30 rpm, se centrifugó, sifoneó, filtró, para recuperar el sobrenadante y se acidificó con HNO₃.

Fracción 3. Ligada a carbonatos. Para disolver los metales unidos a los carbonatos se realiza una disolución ácida (Ecuación 6).



Para esta fracción se agregaron 8 mL de CH₃COONa (1 M) ajustado a pH 5 con CH₃COOH, al residuo de la fracción 2, se agitaron las muestras por un periodo de 5 h a 30 rpm, posteriormente se centrifugó, sifoneó, filtró, para recuperar el sobrenadante y se acidificó con HNO₃.

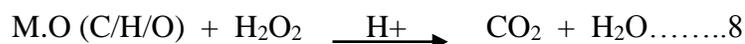
Fracción 4. Ligada a óxidos de Fe. Para la disolución de los metales asociados con óxidos de Fe y Mn, generalmente se utiliza un reactivo reductor, en este caso se usó el clorhidrato de hidroxilamina (NH₂OH.HCl). Este reactivo en solución produce la especie NH₃OH⁺, la cual reduce al Fe (III) a Fe (II) (ecuación 7). Como las sales reducidas de estos metales son solubles los metales asociados se liberan.



En esta etapa se agregaron 8 mL de $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ (0.07 M) al 25 % v/v con CH_3COOH al residuo de la fracción ligada a carbonatos. En el método de ESS de Vázquez 2007 la concentración de $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ fue de 0.04 M, en este trabajo se utilizó la modificación de Ortega 2012 en donde la concentración aumentó a 0.07 M, por ser muestras con alto contenido de óxidos de hierro.

Una vez agregado el $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ las muestras se mantuvieron dentro de un baño de agua por 6 h a 96 °C. Posteriormente, se agitaron por 20 min y se prosiguió con el procedimiento de recuperación del sobrenadante descrito en las etapas anteriores.

Fracción 5. Ligada a materia orgánica y sulfuros. Los metales se liberan de esta fracción utilizando soluciones oxidantes. En la Ecuación 8 y 9 se representan dos ejemplos del proceso de liberación de metales ligados a la materia orgánica y la liberación de metales ligados a la pirita.



En esta etapa las reacciones de oxidación se llevaron a cabo en un baño de agua a 85 °C por 2 h con 1.5 mL de H_2O_2 ajustado a pH de 2 con HNO_3 . Pasadas las 2 h, se agregaron otros 1.5 mL de H_2O_2 ajustado a pH de 2 con HNO_3 , y se calentaron en un baño de agua bajo las mismas condiciones por un tiempo de 3 h. Una vez finalizado el tiempo, las muestras se dejaron enfriar y se agregaron 2.5 mL de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (3.2 M) al 20 % v/v con HNO_3 , para evitar la precipitación de los metales de la solución. Posteriormente se agitó por 20 min a 30 rpm, y se

prosiguió con el procedimiento de recuperación del sobrenadante descrito en las etapas anteriores.

Fracción residual. En esta fracción los metales se encuentran unidos a sólidos cristalinos de silicio y aluminio (cuarzo, feldespatos, arcillas) y estos se liberan por procesos de digestión con mezclas de ácidos fuertes concentrados (ácido nítrico-fluorhídrico). En esta etapa se realizó una digestión total de las muestras, este procedimiento se realizó con los residuos de la etapa de extracción anterior. El procedimiento de digestión se describe en el apartado 6.6.1.

Para la extracción secuencial para aniones, además de las etapas anteriores se agregó la fracción intercambiable aniómicamente al procedimiento de ESS, la cual se describe a continuación.

Fracción 4 (para aniones). Intercambio aniónico. En el procedimiento de extracción secuencial para aniones se agregó esta etapa, después de la fracción ligada a carbonatos, el reactivo utilizado fue NaH_2PO_4 (1 M). Este reactivo en contacto con la muestra pone al As fuertemente adsorbido en solución, por medio del intercambio aniónico del HPO_4^{2-} por HAsO_4^{2-} .

Para esta fracción se realizaron dos etapas de agitación de 24 h con 10 mL de la solución. Posterior a este periodo de extracción se continuó con el procedimiento de recuperación del sobrenadante descrito en las etapas anteriores.

Tabla 10. Protocolo de ESS propuesto por Vázquez (2007) utilizado para cationes

Fracción	Condiciones
1. Soluble a agua meteórica	*H ₂ O a un pH 5.5, Agitación 20 min a 30 rpm
2. Intercambiable	*MgCl ₂ (0.5M). Agitación 20 min a 30 rpm
3. Carbonatos	*CH ₃ COONa (1M) pH 5.5 Agitación 5 h a 30 rpm
4. Óxidos de Fe y Mn	*NH ₂ .OH.HCl (0.04 M) a 25% v/v con CH ₃ COOH, 96°C por 4 h, Agitación 20 min a 30 rpm
5. Materia Orgánica y Sulfuros.	*H ₂ O ₂ al 30% a pH 2 ajustado con HNO ₃ , segunda etapa al 37% CH ₃ COONH ₄ (3.2M) v/v, con HNO ₃ 96°C por 8h agitación 20 min a 30 rpm
6. Residual	*Digestión ácida total, HF, HNO ₃ , HCl

Tabla 11. Protocolo de ESS propuesto por Vázquez (2007) utilizado para aniones

Fracción	Condiciones
1. Soluble en Agua Meteórica	*H ₂ O a un pH 5.5, Agitación 20 min a 3000 rpm
2. Intercambiable	*MgCl ₂ (0.5M). Agitación 20 min a 3000 rpm
3. Carbonatos	*CH ₃ COONa (1M) pH 5.5 Agitación 5 h a 3000 rpm
4. Intercambiable Aniónico	*NaH ₂ PO ₄ Agitación de 2 periodos de 24 h. Periodo 1 (1M), Periodo 2 (1.5 M) a 3000 rpm.
5. Óxidos de Fe y Mn	*NH ₂ ·OH·HCl (0.04 M) a 25% v/v con CH ₃ COOH, 96°C por 4 h, Agitación 20 min a 3000 rpm
6. Materia Orgánica y Sulfuros.	*H ₂ O ₂ al 30% a pH 2 ajustado con HNO ₃ , segunda etapa al 37% CH ₃ COONH ₄ (3.2M) v/v, con HNO ₃ 96°C por 8h agitación 20 min a 3000 rpm
7. Residual	*Digestión ácida total, HF, HNO ₃ , HCl

6.9 Análisis cuantitativo

Las concentraciones de metales (Pb, Cd, Zn, Cu, Fe, Ca, As) en todas las pruebas se midieron en un Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma de Acoplamiento Inductivo, ICP-OES por sus siglas en inglés, de la marca Thermo modelo ICAP 7400 ICP-OES DUO.

En esta técnica, la introducción continua de la muestra líquida y un sistema de nebulización forma un aerosol que es transportado por el Argón a la antorcha del plasma, acoplado inductivamente por radiofrecuencia. En el plasma, debido a las altas temperaturas generadas, los analitos son atomizados e ionizados generándose los espectros de emisión atómicos de líneas características. Los espectros son dispersados por la red de difracción y el detector sensible a la luz se encarga de medir las intensidades de las líneas (Jones, 2000).

6.9.1 Control de Calidad

6.9.1.1 Límites de detección (LD) y Límites de cuantificación (LC)

Los límites de detección y cuantificación en mg/L para el ICP-OES se muestran en la Tabla 12.

El cálculo de los mismos se muestra en el Anexo 2.

Tabla 12. Límite de detección (LD) y Límite de cuantificación por elemento (LC) (mg/L)

	LD	LC
Pb	0.0363	0.109
As	0.036	0.1082
Cd	0.035	0.1052
Zn	0.0315	0.0947
Cu	0.0354	0.1063
Fe	0.0355	0.1066
Ca	0.037	0.1112

6.9.1.2 Exactitud

El MCR (Material de Referencia Certificado) utilizado fue Montana soil 2710A, en la Tabla 13 se muestran los porcentajes de recuperación. Los valores de referencia, los valores medidos, así como el cálculo de los porcentajes de recuperación se encuentran en el Anexo 3.

Tabla 13. Porcentaje de recuperación del MCR Montana soil 2710^a

Elemento	%
Pb	97
As	96
Cd	95
Zn	95
Cu	88
Fe	93
Ca	91

CAPITULO 7. RESULTADOS

7.1 Caracterización mineralógica por Difracción de Rayos-X (DRX) y Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

7.1.1 DRX

Para los residuos Patio Victoria, los principales componentes identificados en orden de abundancia se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 14. Minerales identificados en las muestras de Patio Victoria en DRX

Orden de abundancia	Mineral	
1	Yeso	CaSO ₄ .2H ₂ O
2	Cuarzo	SiO ₂
3	Jarosita	K ₃ (H ₃ O)Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
4	Muscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
5	Kaolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄

El difractograma de rayos x, para la muestra SP-01-M2 y SP-02-M3 se presenta en la Figura 19 y 20.

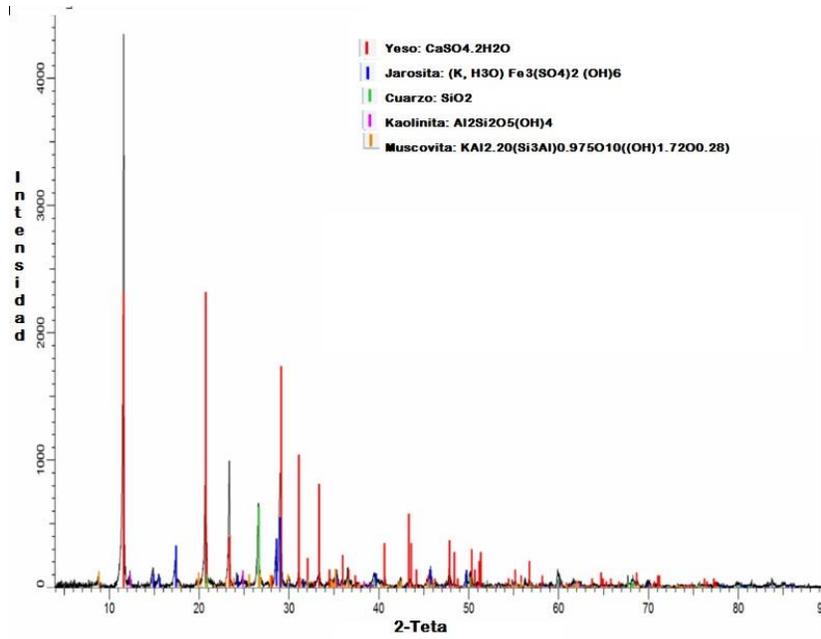


Figura 19. Difractograma de rayos-x de SP-01-M2

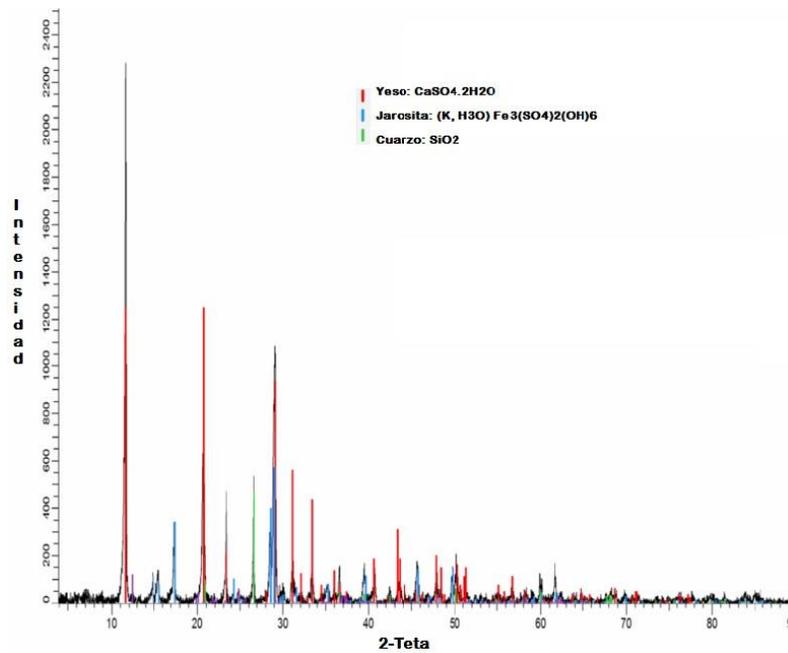


Figura 20. Difractograma de rayos-x de SP-02-M3

Para el depósito de residuos SP-07, los minerales encontrados por orden de abundancia se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Minerales encontrados en muestra SP-07 mediante DRX

Orden de abundancia	Mineral	
1	Calcita	CaCO_3
2	Cuarzo	SiO_2
3	Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
4	Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
5	Kaolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
6	Jarosita	$\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$

El difractograma para la muestra SP-07, se presenta en la Figura 21.

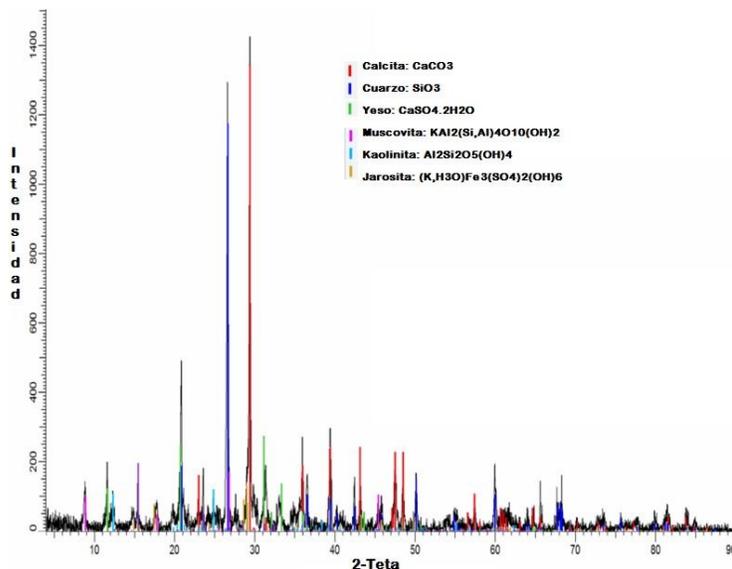


Figura 21. Difractograma de rayos-x de SP-07

Para la muestra SP-10, los principales minerales encontrados se muestran en la Tabla 16, por orden de abundancia.

Tabla 16. Minerales encontrados en muestra SP-010 mediante DRX

Orden de abundancia	Mineral	
1	Calcita	CaCO ₃
2	Cuarzo	SiO ₂
3	Hematita	Fe ₂ O ₃
4	Muscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂

El difractograma para la muestra SP-07, se presenta en la Figura 22.

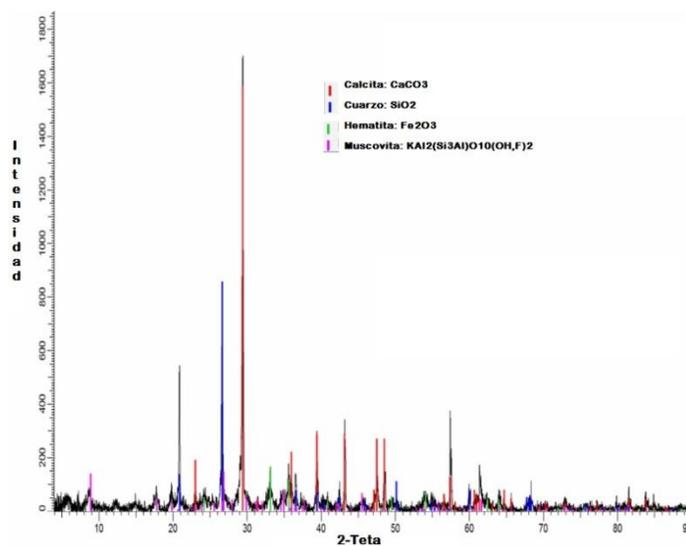


Figura 22. Difractograma de rayos-x de SP-10

Para los residuos del tipo terrero (SP-03), los principales componentes identificados fueron calcita (CaCO₃) y cuarzo (SiO₂), estos se presentan en la Figura 23.

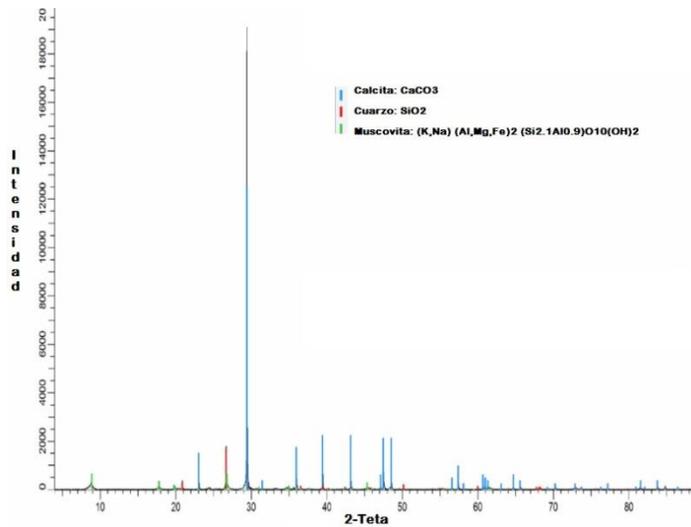


Figura 23. Difractograma de rayos-x de SP-03

7.1.2 MEB

7.1.2.1 Patio Victoria

Los resultados del análisis por MEB para las muestras de Patio Victoria, se muestran a continuación. En la Figura 24, se puede observar la presencia de pirita alterada por condiciones de acidez. Además en la Figura 25 se pudo observar pirita con una inclusión de azufre.

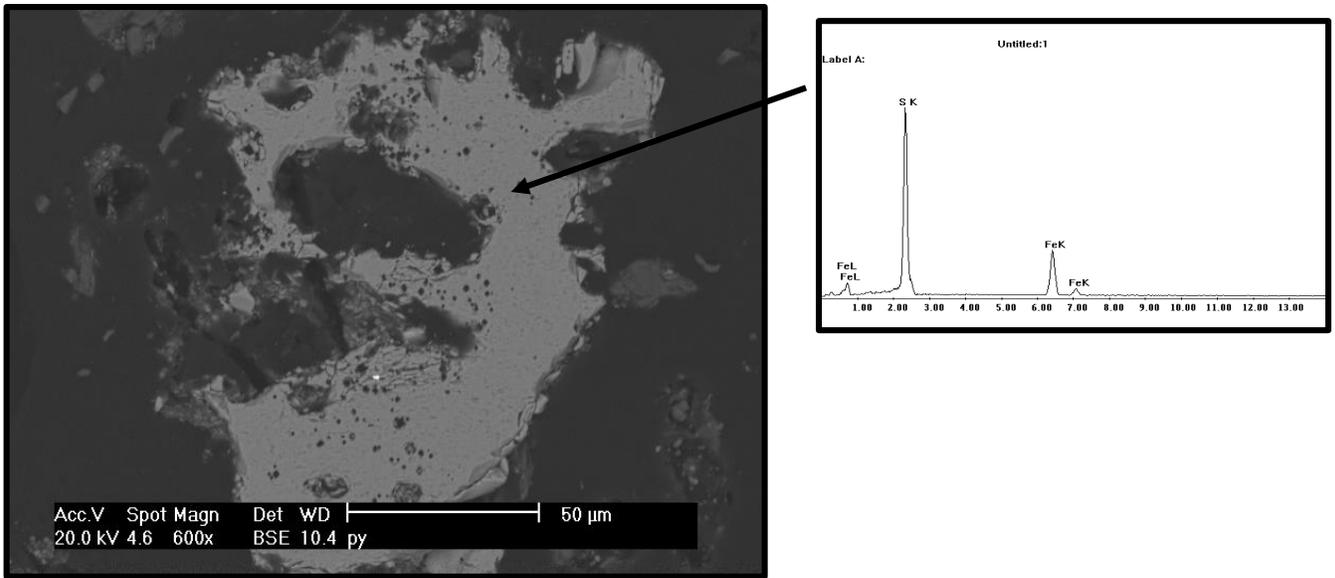


Figura 24. Partícula de pirita alterada por condiciones de acidez y el espectro de microanálisis correspondiente a la pirita

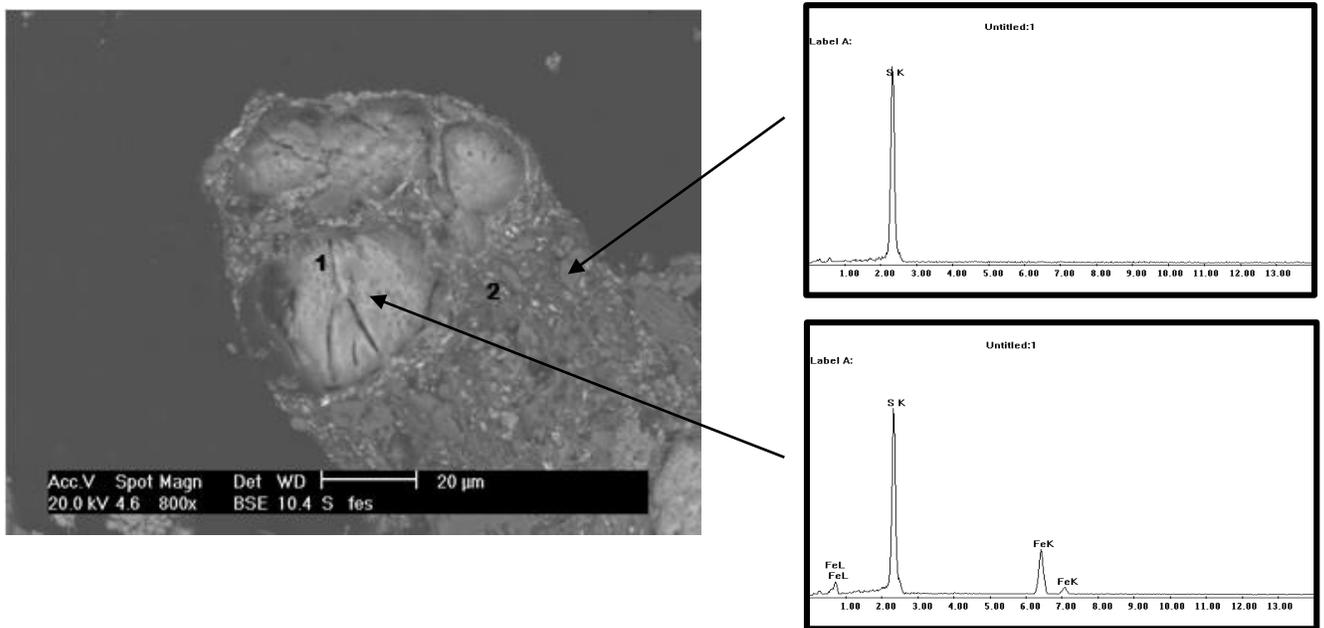


Figura 25. Formación de azufre elemental (2) junto a pirita (1) junto a los espectros de microanálisis

En la Figura 26, observamos la presencia de galena (PbS) rodeada por el mineral anglesita (PbSO₄), mientras que en la Figura 27, se observan sulfatos de hierro y anglesita como resultado de la alteración de la galena, que se observa al centro.

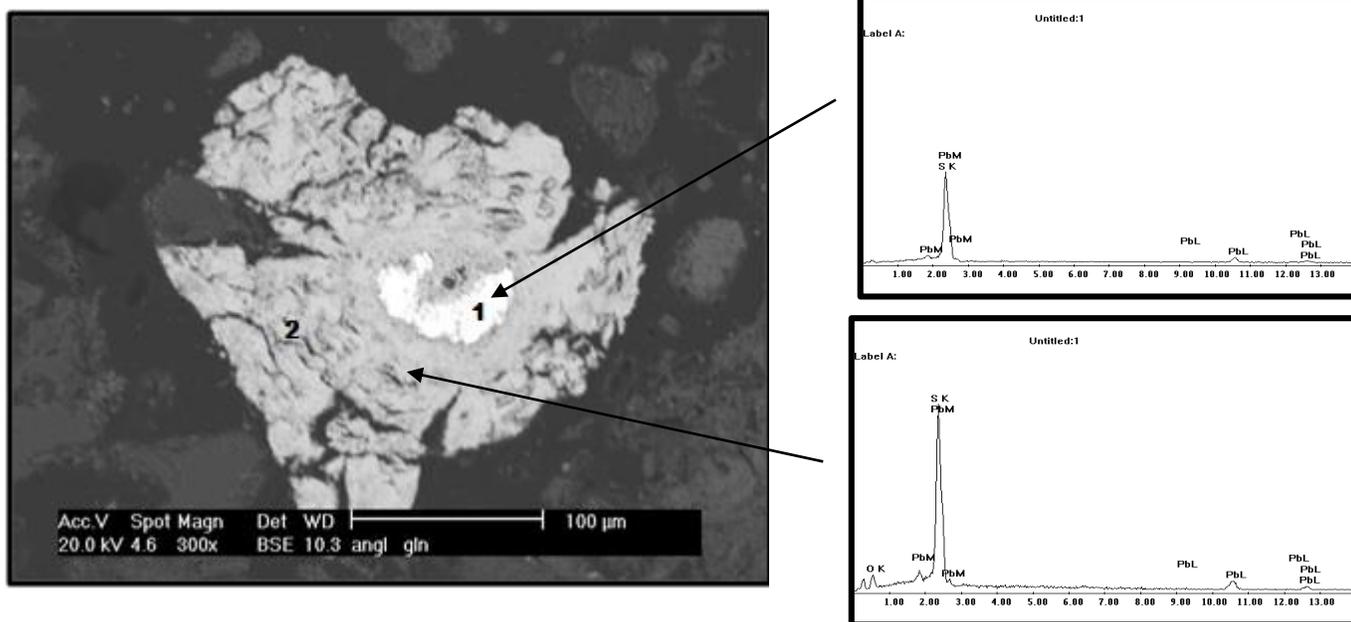


Figura 26. Galena (1) rodeada por anglesita (2) por procesos de alteración junto a los espectros de microanálisis

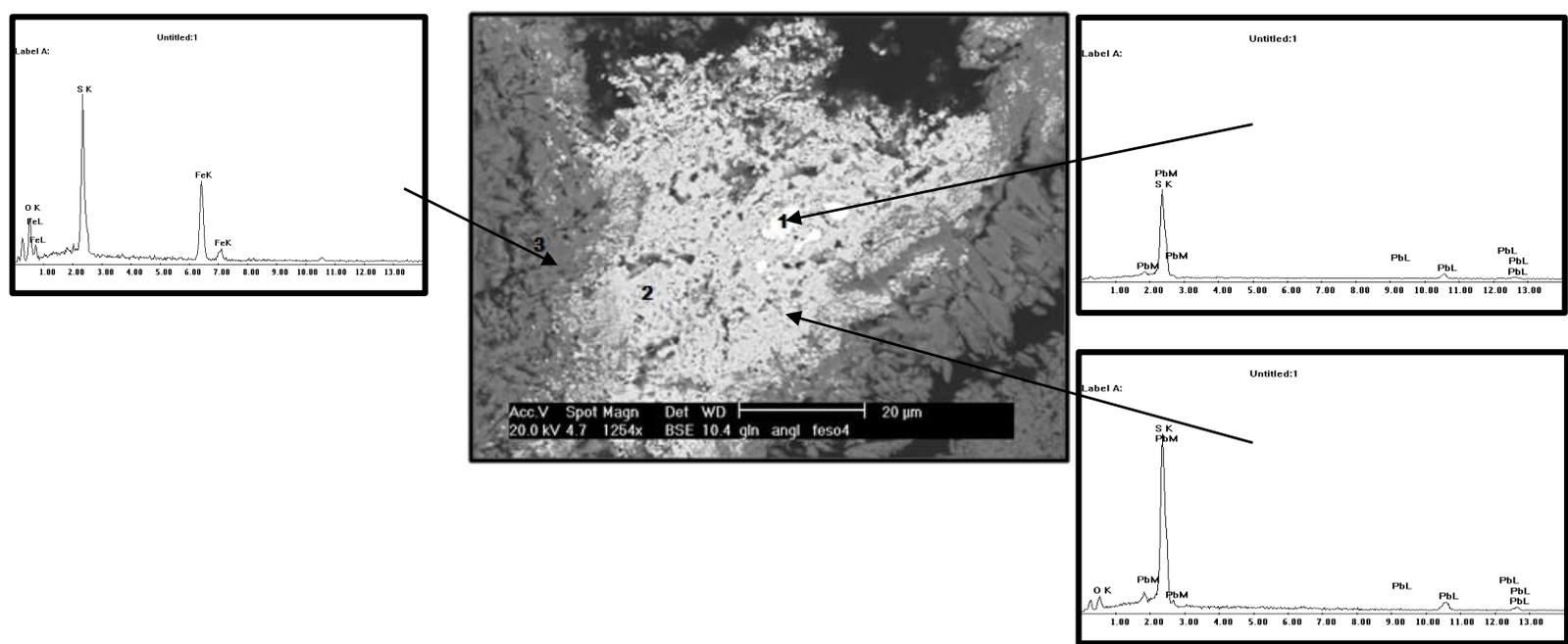


Figura 27. Sulfatos de hierro (3) y anglesita (2) como resultado de la alteración, también se observa galena (1) sin alterar al centro, junto a los espectros de microanálisis

En la Figura 28 también podemos observar una partícula de anglesita en unión con óxidos de hierro.

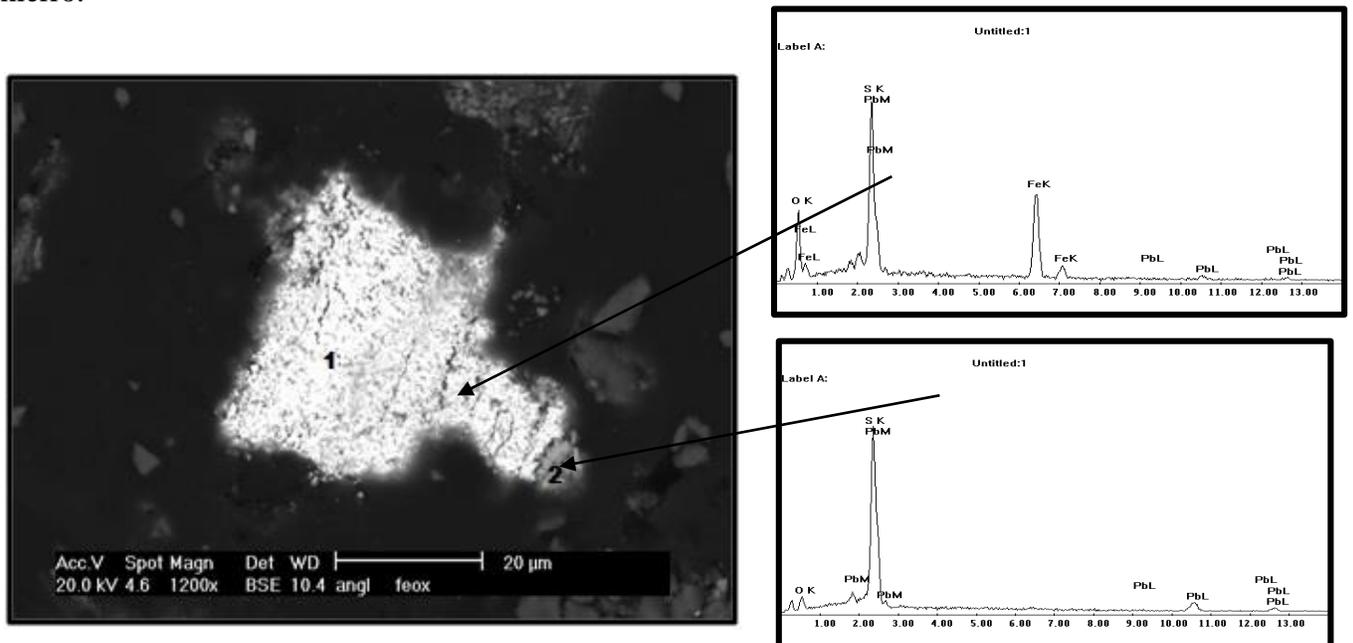


Figura 28. Partícula de anglesita (1) en unión con óxido de hierro (2) junto a los espectros de microanálisis

Además también se encontraron partículas de esfalerita incluidas en cuarzo (Figura 29).

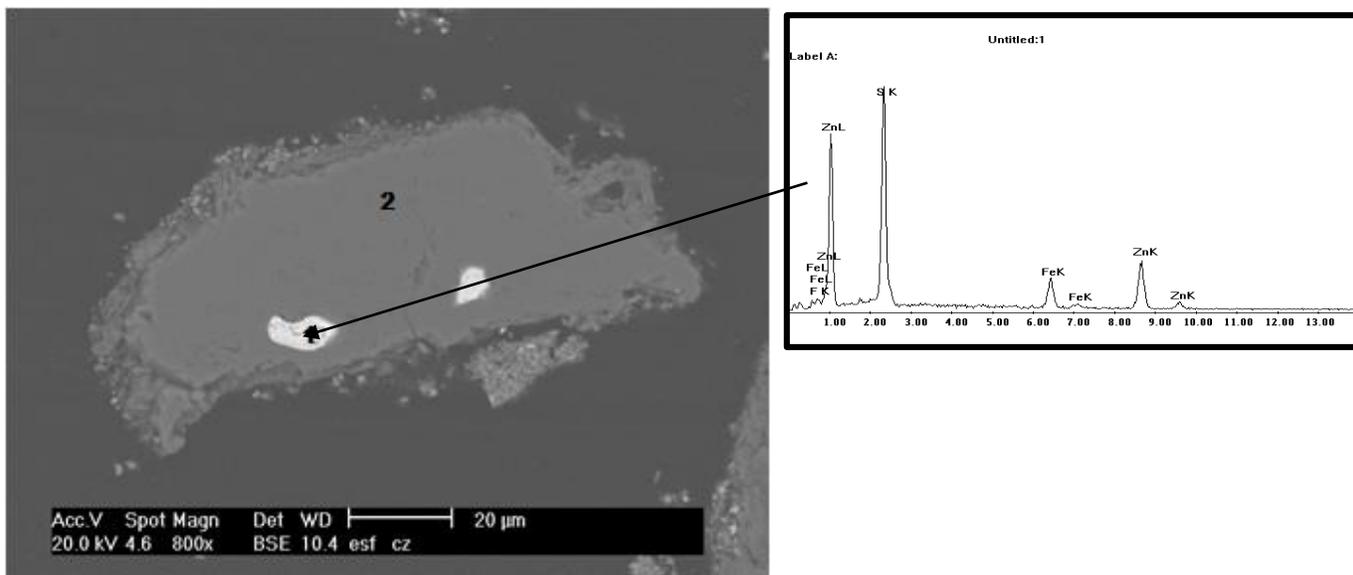


Figura 29. Partícula de esfalerita atrapada en cuarzo junto a espectro de microanálisis de la esfalerita

En las muestras de Patio Victoria, también se encontró una partícula libre de sulfato de plomo con contenido de hierro y arsénico (Figura 30).

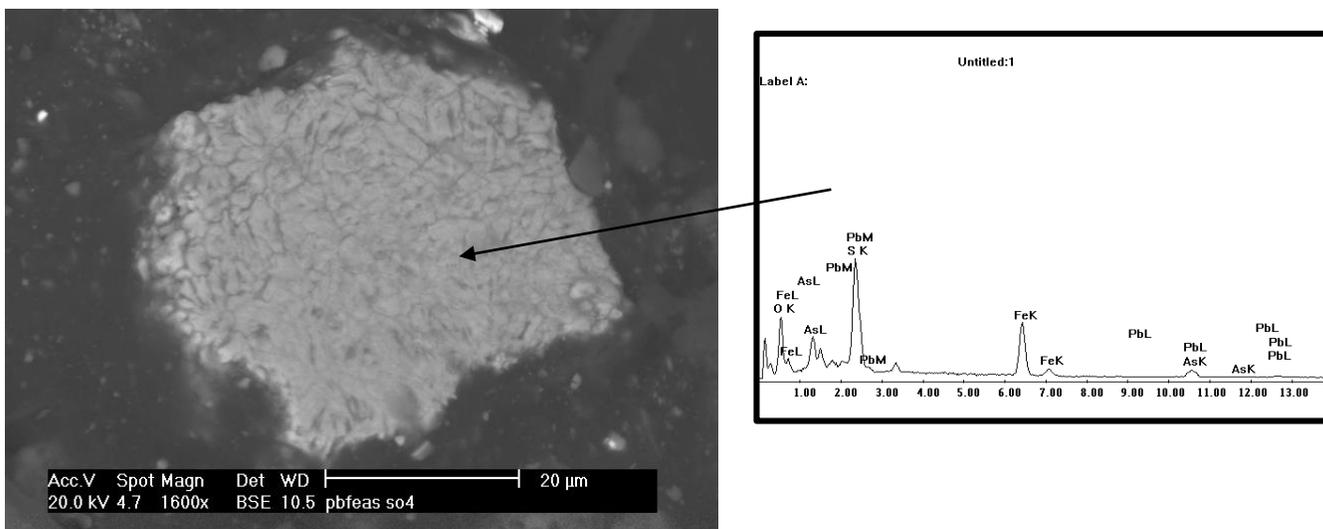


Figura 30. Partícula libre de sulfato de plomo con contenido de hierro y arsénico junto al espectro de microanálisis

7.1.2.2 Residuos

7.1.2.3 SP-07 y SP-10

Los resultados del análisis por MEB para las muestras SP-07 se muestran a continuación.

En la Figura 31, se puede observar la presencia de óxidos de hierro asociados a cuarzo.

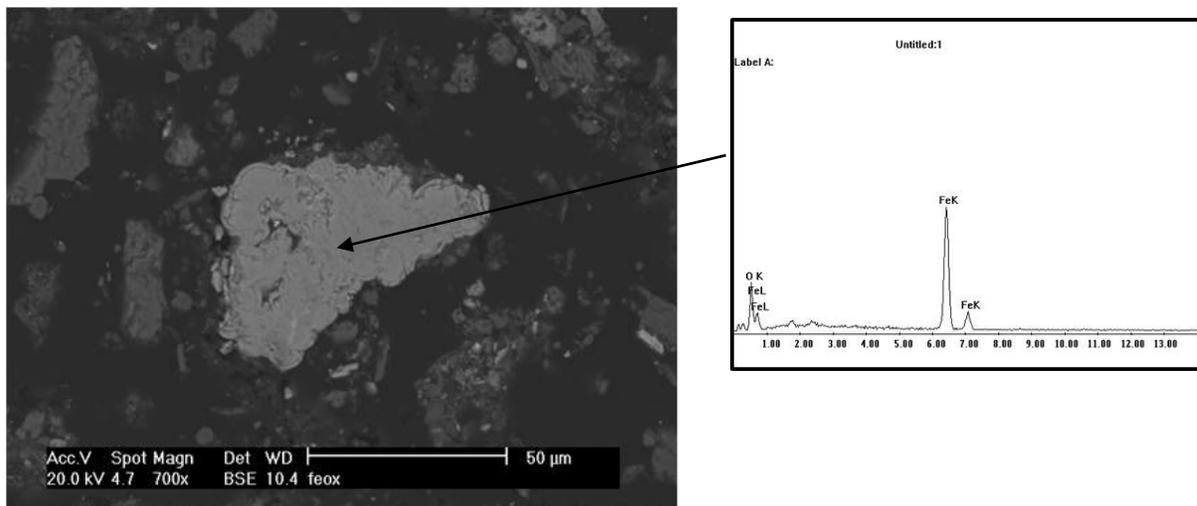


Figura 31. Partícula de óxidos de hierro asociados a cuarzo junto al espectro de microanálisis del óxido de hierro

En la Figura 32, se puede observar una partícula libre de arseniato de plomo.

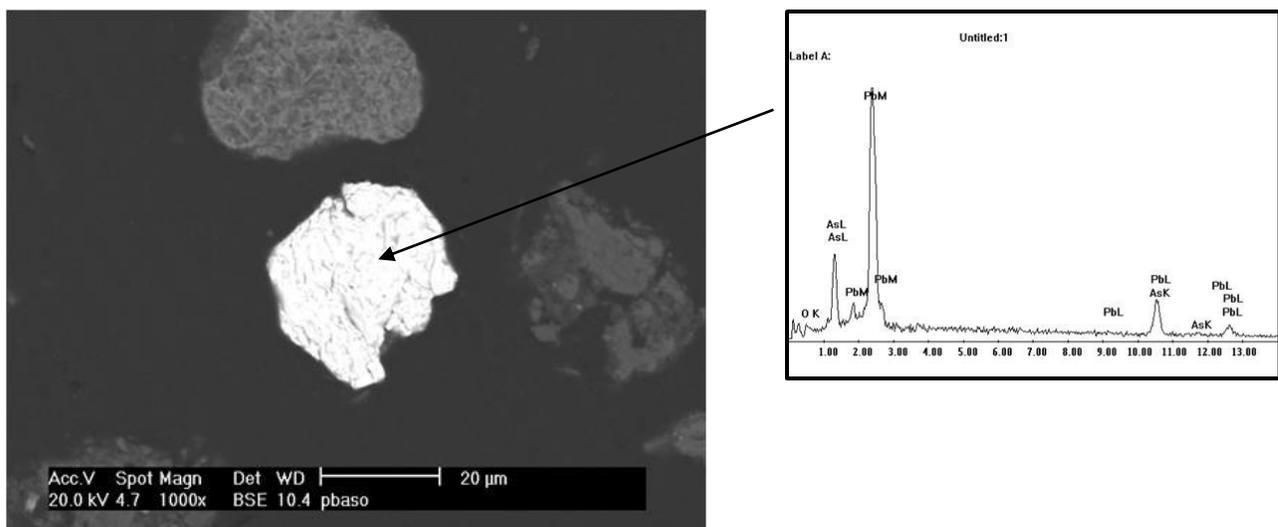


Figura 32. Partícula libre de arseniato de plomo junto al espectro de microanálisis

En la Figura 33, puede observarse fases de arseniato de plomo asociadas a óxidos de hierro.

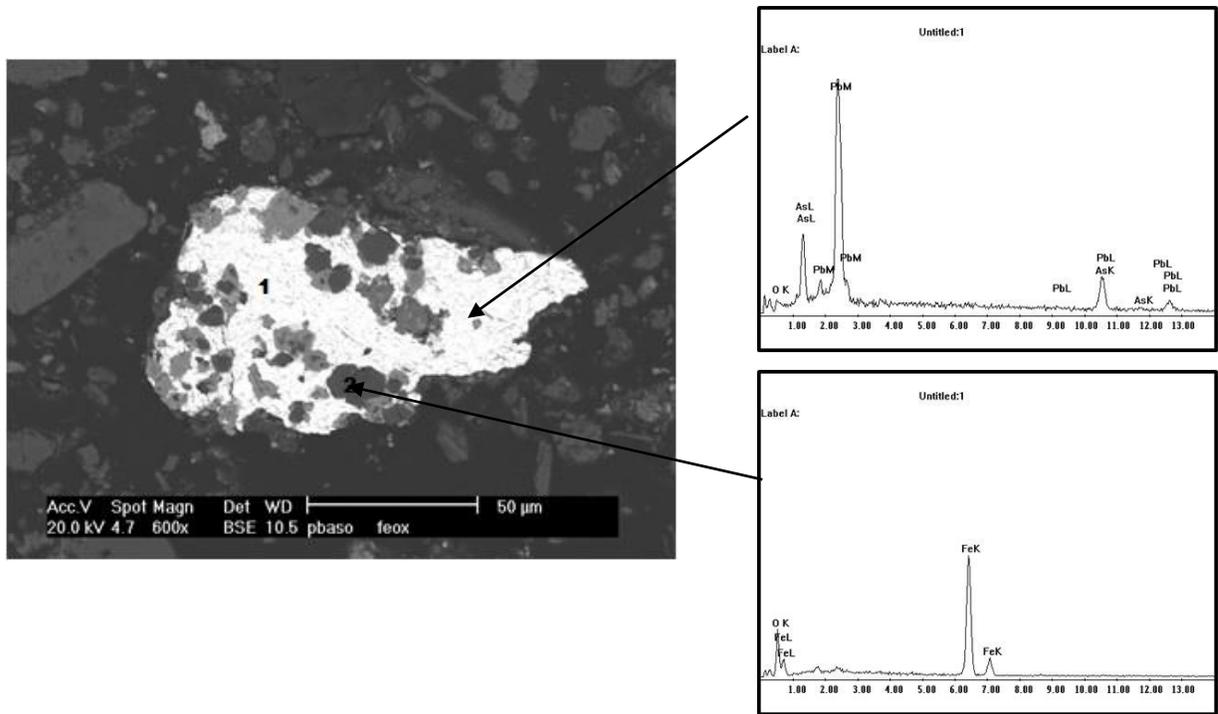


Figura 33. Arseniato de plomo (1) asociado a óxidos de hierro (2) junto al espectro del microanálisis

En la Figura 34, se puede observar una partícula libre de cerusita (PbCO_3).

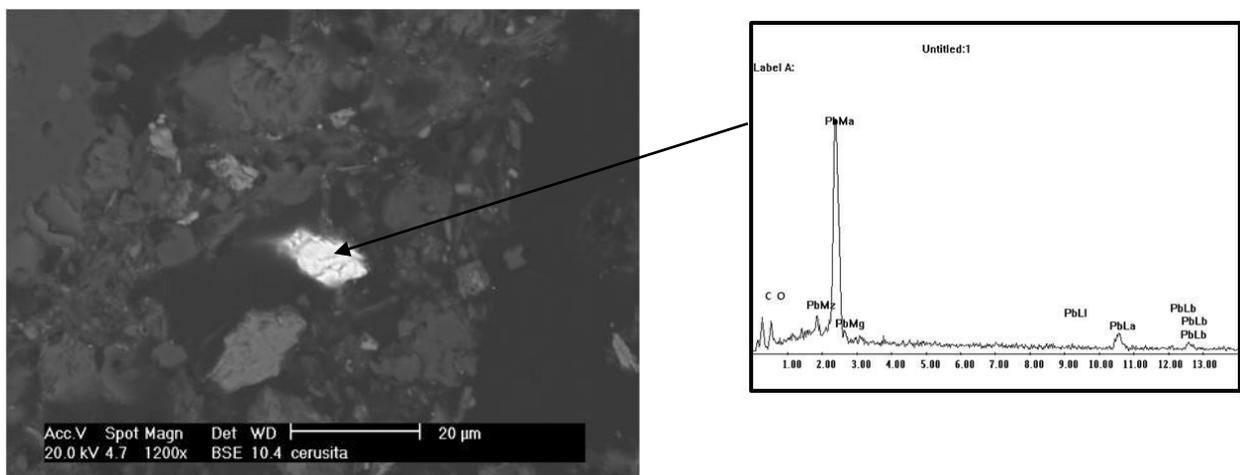


Figura 34. Partícula libre de cerusita junto al espectro del microanálisis de la cerusita

Los resultados del análisis por MEB para las muestras SP-010 se muestran a continuación.

En la Figura 35 y 36, se puede observar partículas Pb en asociación óxidos de manganeso.

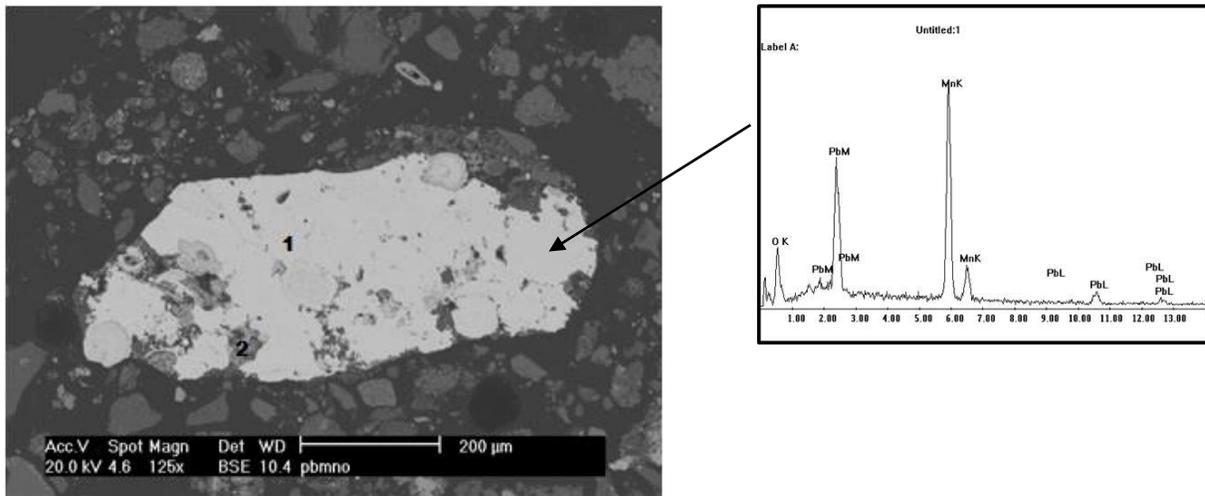


Figura 35. Partícula de Pb asociadas a óxidos de Mn junto al espectro del microanálisis

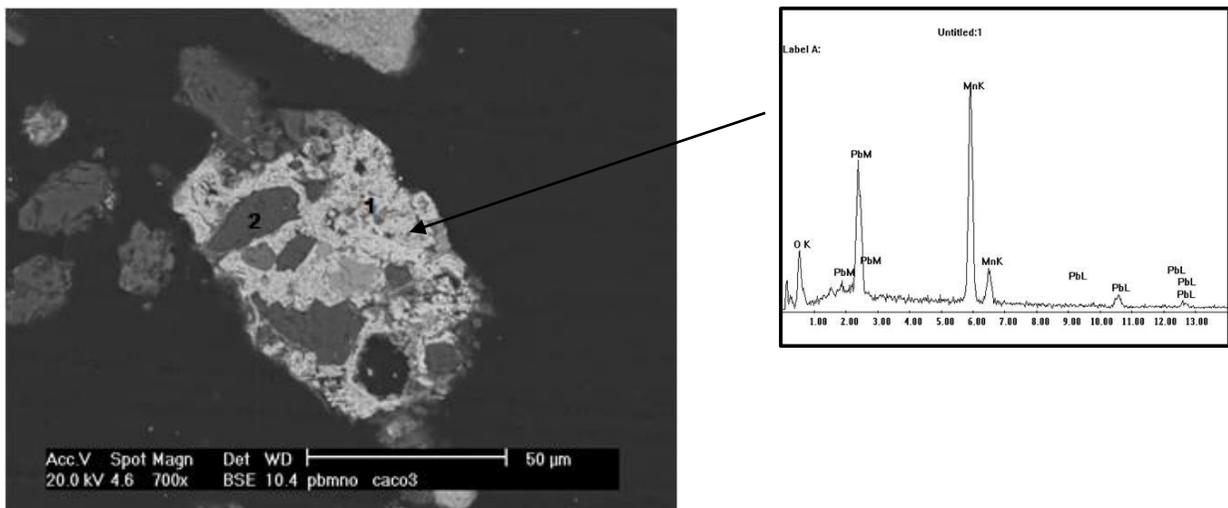


Figura 36. Partícula de Pb (1) asociadas a óxidos de Mn

En la Figura 37, se observa una fase de arseniato de plomo asociada a calcita.

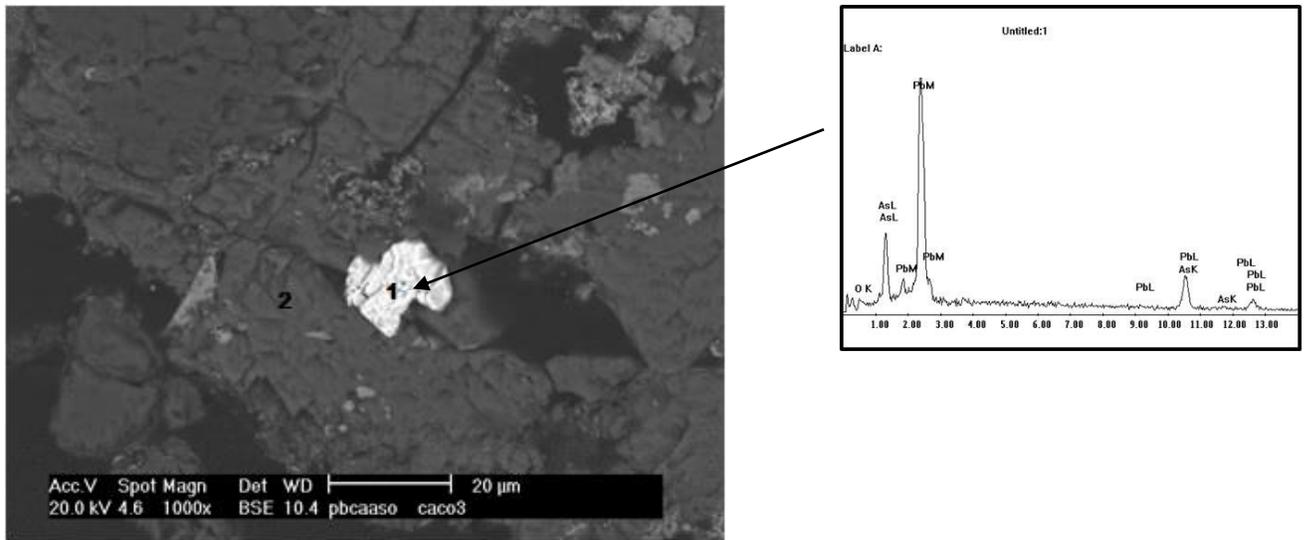


Figura 37. Fase de arseniato de plomo (1) asociada a calcita (2) junto al espectro del microanálisis del arseniato de plomo

En la Figura 38, se puede observar óxidos con contenido de hierro, manganeso y zinc, asociados a feldespatos.

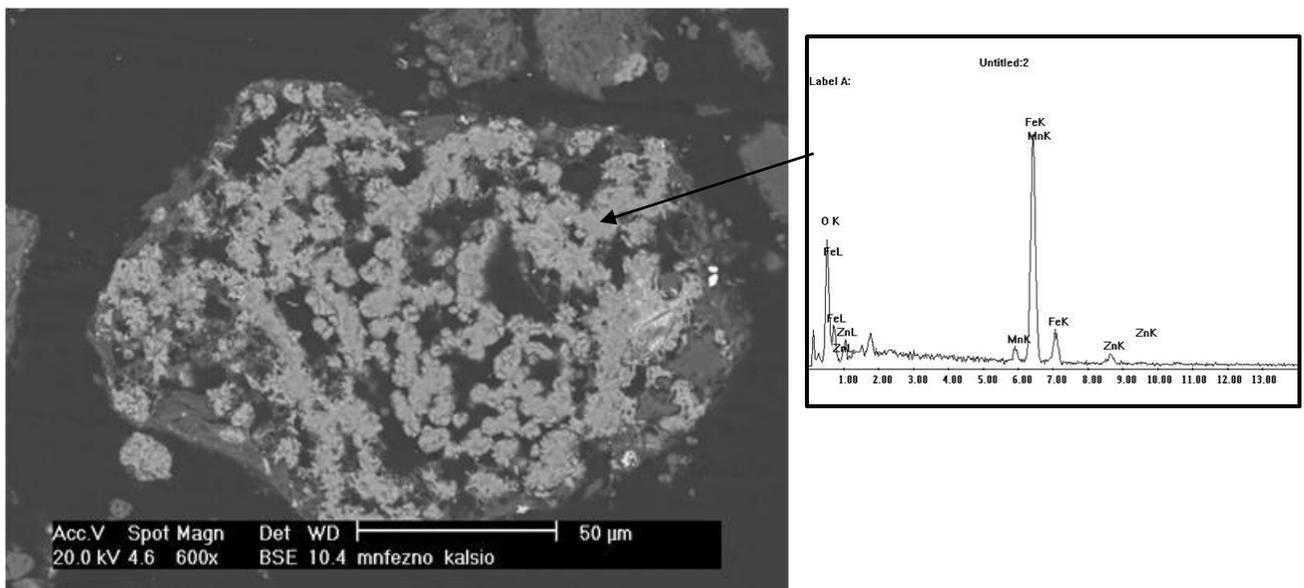


Figura 38. Óxidos con contenido de Fe, Mn y Zn, asociados a feldespatos junto al espectro del microanálisis

En la Figura 39, se observan fases de arseniato de plomo asociados a óxidos de hierro.

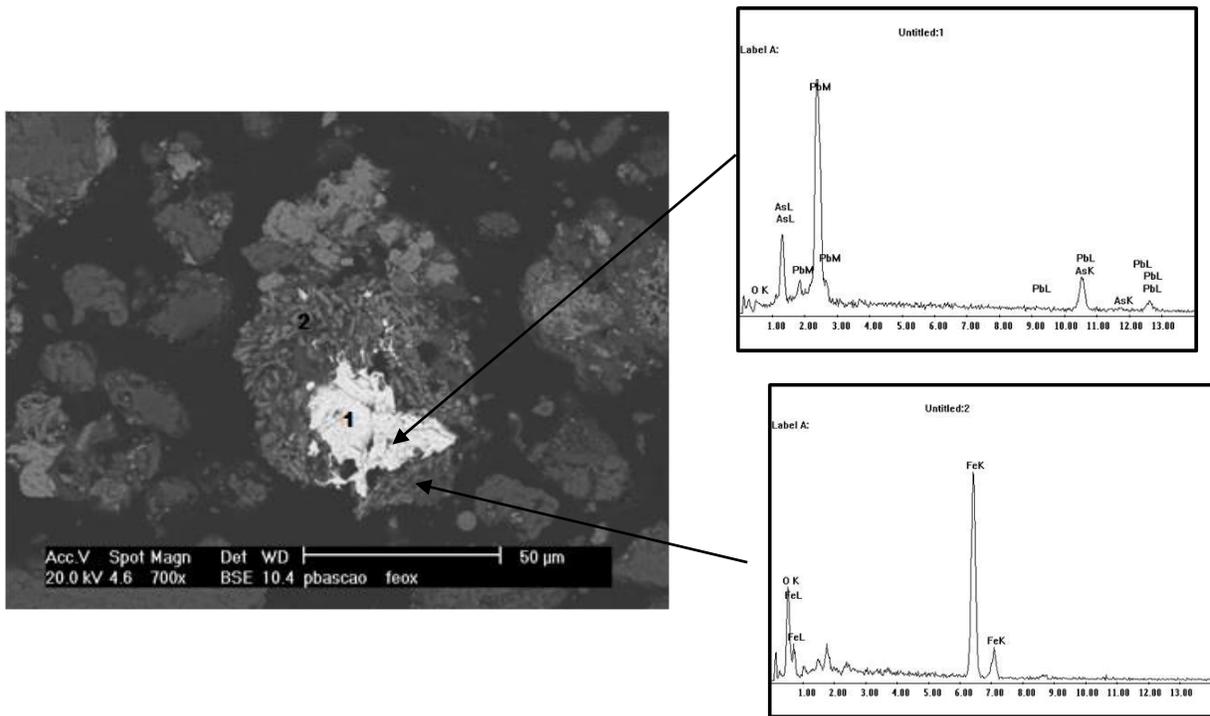


Figura 39. Fases de arseniato de plomo (1) asociadas a óxidos de hierro (2)

En la Figura 40, se pueden observar óxidos de hierro asociados a feldespatos.

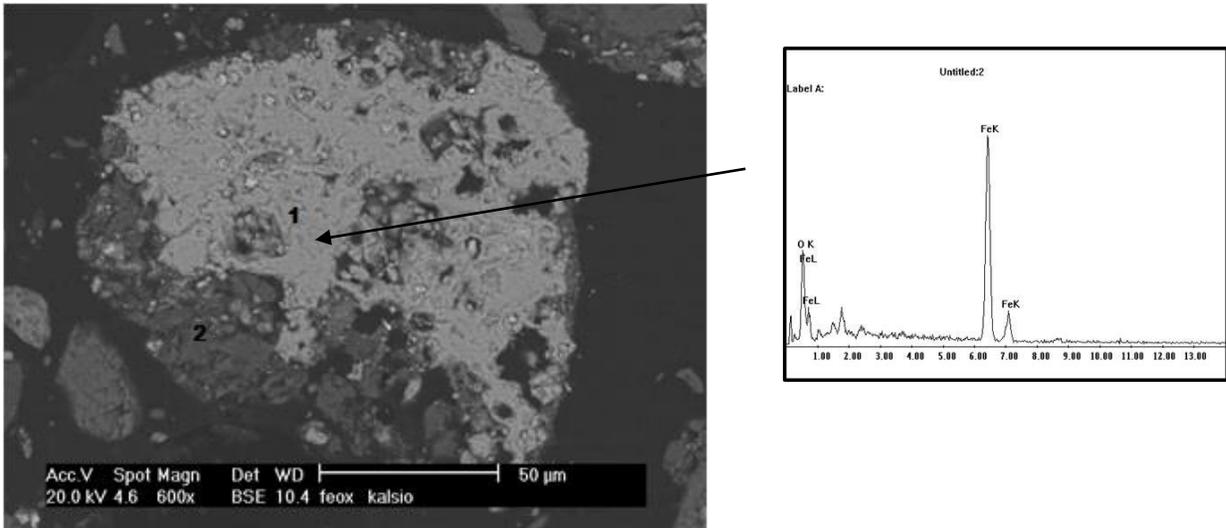


Figura 40. Óxidos de hierro (1) asociados a feldspatos (2) junto al espectro del microanálisis de los óxidos de hierro

En la Figura 41, se puede observar una partícula de cerusita asociada a calcita.

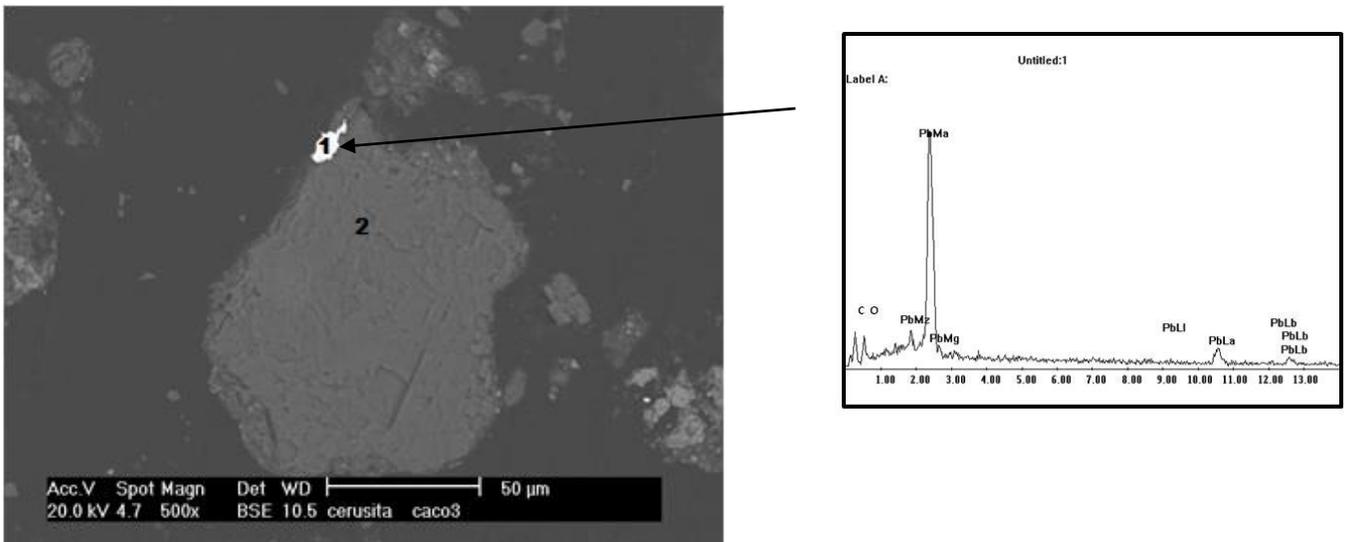


Figura 41. Partícula de cerusita asociada a calcita junto al espectro del microanálisis de la cerusita

7.2 Determinación de pH

Los valores del pH para las muestras de Patio Victoria, se muestran en la Tabla 16. También se muestra el pH de los residuos (SP-07, SP-10) y de las muestras de los terreros.

Tabla 17. Valores de pH de las muestras de residuos de Cerro de San Pedro, SLP

Muestra		pH
Patio Victoria	SP01-RS-M1	3
	SP01-RS-M2	4
	SP01-RS-M3	2
	SP02-RS-M1	5
	SP02-RS-M2	3
	SP02-RS-M3	3
Platería	SP07-RS-M1	8
Porvenir III	SP10-RS-M1	8
Terreros	SP03-RS-M1	8
	SP05-RS-M1	8
	SP06-RS-M1	8
	SP08-RS-M1	8
	SP04-RS-M1	8
	SP13-RS-M1	7

Como se puede observar el pH de las muestras de Patio Victoria es ácido, encontrándose en un intervalo de 2 a 5; en el resto de las muestras encontramos un pH entre 7 y 8.

7.3 Concentración total de elementos de interés en muestras de residuos de Cerro de San Pedro, SLP

En la Tabla 17, se presenta el promedio de las concentraciones totales (mg/kg) de Pb, As, Cd, Cu, Zn, Fe y Ca para las muestras de residuos de Cerro de San Pedro. En el Anexo 4 se muestra la concentración total para cada una de las muestras estudiadas.

Tabla 18. Promedio de la concentración total (mg/kg) de elementos de interés en muestras de residuos de Cerro de San Pedro, SLP

		Pb	Cv*	As	Cv	Cd	Cv	Cu	Cv	Zn	Cv	Fe	Cv	Ca	Cv
Patio Victoria	SP-01	15700	0.3	1440	0.4	51	0.6	93	0.13	2969	0.5	114163	0.28	62682	0.15
	SP-02	12840	0.32	1546	0.11	44	0.05	112	0.18	3135	0.34	122726	0.23	65720	0.12
Platería	SP-07	9934		1808		93		207		9495		74074		123785	
Porvenir III Terreros	SP-10	10370		2256		47		184		3616		106004		145724	
	(SP03-SP13)	657.9	1.59	175	1.20	<0.03		<0.03		365	1.31	27789	0.56	176791	0.63

*Dónde Cv representa el coeficiente de variación de las diferentes muestras tomadas. En Platería y Porvenir III, se tomó una sola muestra y no hubo repeticiones.

Dónde 0.03 es el límite de detección del elemento en el método utilizado (LD)

Como podemos observar, el Pb y el Fe en Patio Victoria es mayor 1.5 y 1.3 veces respectivamente que en los residuos SP- 07 y SP-10; y 24 y 4 veces mayor respectivamente que en los terreros.

El contenido de Cu y Zn en los residuos SP-07 y SP-10 es mayor 1.9 y 2.15 veces, que en los residuos de Patio Victoria; mientras que el Zn es 26 veces mayor que en los terreros.

El Ca es mayor 2.7 veces en los Terreros que en Patio Victoria y 1.3 veces mayor que en los residuos SP-07 y SP-10.

7.4 Movilidad de metales en H₂O en equilibrio con CO₂

La prueba de extracción de metales y metaloides con agua en equilibrio con CO₂ que se establece en distintas normas mexicanas como la NOM-141-SEMARNAT/SSA1-2004, propone el procedimiento para evaluar la peligrosidad de los residuos mineros. En la Tabla 18 se presentan los resultados del promedio de la concentración de metales (mg/kg) para esta prueba, así como los porcentajes de movilidad con respecto a la concentración total, las muestras que se sometieron a esta prueba se seleccionaron de acuerdo al “Inventario De Residuos Históricos De Cerro de San Pedro, SLP”. En el Anexo 5 se muestra la concentración total para cada una de las muestras estudiadas en la prueba.

Tabla 19. Resultados del promedio de la concentración de metales (mg/kg) de la Prueba de movilidad con agua en equilibrio con CO₂

		Pb	%	As	%	Cd	%	Cu	%	Zn	%	Fe	%	Ca	%
Patio Victoria	SP-01	33	0.21	20	1.4	17	33	15	16	644	55	3092	3	8009	13
	SP-02	13	0.11	3	0.2	14	32	22	20	659	53	2637	2	8140	12
Platería Porvenir III	SP-07	15	0.15	<0.03	-	<0.03	-	<0.03	-	17	0.1	13	0.2	6962	6
	SP-10	<0.03	-	<0.03	-	<0.03	-	<0.03	-	<0.03	-	<0.03	-	704	0.5
Terreros	SP03	<0.03	-	<0.03	-	<0.03	-	<0.03	-	<0.03	-	<0.03	<0.03	653.62	0.3

Dónde 0.03 es el límite de detección del elemento en el método utilizado (LD)

Como se puede observar el metal más móvil en Patio Victoria es el Zn pues en promedio el 50 % de su concentración total se moviliza. El Cd también presenta una movilidad importante pues el 30 % de su concentración total es móvil.

El Pb y el As presentan poca movilidad, con un porcentaje con respecto a la concentración total de 0.15 y 1.39 %.

El Fe, S y Ca, presentan una movilidad en agua de 2.4, 1.32 y 12 % respectivamente, significando concentraciones móviles altas debido a que de manera total presentan concentraciones promedio de 100,000 ppm.

En los residuos 07 y 10 la movilidad de metales y metaloides en agua no es de consideración, pues la mayoría de las concentraciones no fueron detectables o están en valores muy bajos, entre 0.1 y 02 % de la concentración total.

Para la muestra SP-03 la concentración móvil de los metales y metaloides no fue detectable, con excepción del Ca que presentó un promedio de 0.3 % móvil. Estos resultados validan “El Inventario de Residuos Históricos”, evidenciando que en los depósitos de minerales señalados como de bajo peligro ambiental no hay movilidad en agua de metales y metaloides que pudieran afectar a los cuerpos de agua de la cuenca.

7.5 Extracciones Secuenciales

Para conocer la fracción a la que se asocian los metales y metaloides en las muestras de Patio Victoria y residuos SP-07 y SP-10, se realizaron dos procedimientos de Extracción Secuencial (Vázquez, 2007; Ortega, 2012). Las muestras fueron elegidas de acuerdo a los resultados del

“Inventario de Residuos”. El primer procedimiento está dirigido a cationes y consta de 6 fracciones: Fracción 1 (soluble en agua), fracción 2 (intercambiable catiónicamente), fracción 3 (ligada a carbonatos), fracción 4 (ligada a óxidos de Fe y Mn), fracción 5 (asociada a materia orgánica y sulfuros) y fracción 6 (fracción residual).

El segundo procedimiento está dirigido a aniones y consta de 7 fracciones: Fracción 1 (soluble en agua), fracción 2 (intercambiable catiónicamente), fracción 3 (ligada a carbonatos), fracción 4 (intercambiable aniónicamente), fracción 5 (ligada a óxidos de Fe y Mn), fracción 6 (asociada a materia orgánica y sulfuros) y fracción 7 (fracción residual).

A continuación se presenta la distribución de los metales y metaloides presentes en las muestras de residuos, según los resultados de las pruebas de ES. En el Anexo 6 se muestra la concentración total para cada una de las muestras estudiadas en las diferentes fracciones de la extracción secuencial.

7.5.1 Plomo

7.5.1.1 Distribución de Pb en Patio Victoria

En la Figura 42 se presenta la distribución en porcentaje del Pb en las distintas fracciones operacionales para las muestras de Patio Victoria. En orden de abundancia, la distribución del Pb en las distintas fracciones (Fr) de acuerdo a los resultados de la ES para cationes, es la siguiente:

$$\text{Fr6} > \text{Fr4} > \text{Fr3} > \text{Fr2} > \text{Fr5} > \text{Fr1}$$

El Pb se presenta principalmente en forma residual en todas las muestras, mientras que en la fracción soluble e intercambiable el porcentaje de Pb es bajo, con excepción de la primera

muestra en donde el Pb se presenta en un 10 % en la fracción intercambiable. En la fracción de sulfuros y MO el Pb en promedio está en 5.8 %.

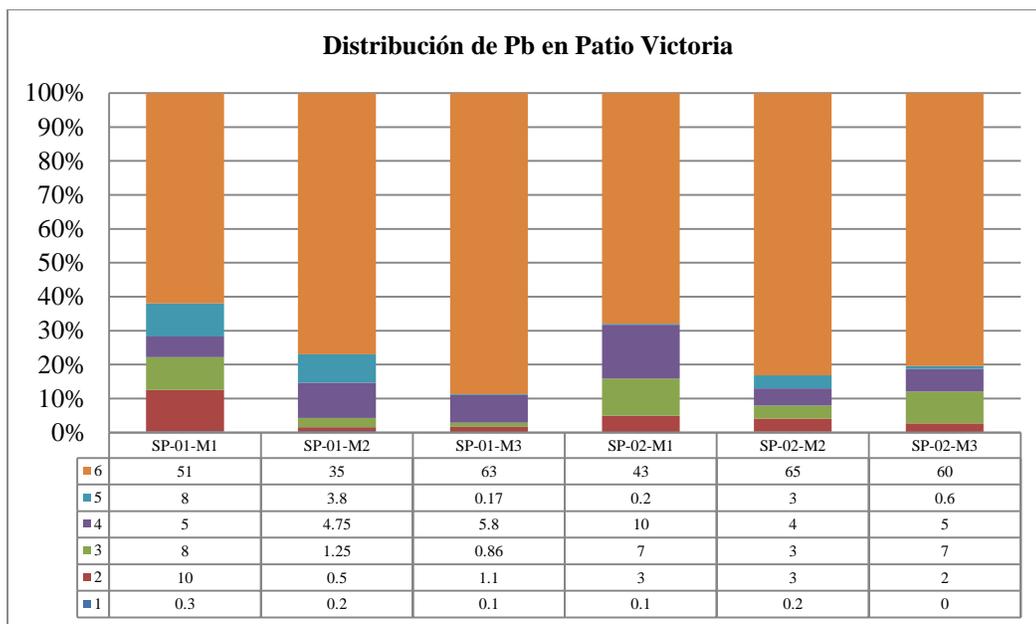


Figura 42. Distribución de Pb en Patio Victoria

- (1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Pb puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

7.5.1.2 Otros residuos

En la Figura 43 se presenta la distribución del Pb en los residuos SP-07 y SP-10. La mayor parte del Pb se presenta en la fracción residual con el 34 % de la concentración total, seguidamente el Pb en esos residuos se presenta mayormente asociado a la fracción de óxidos de Fe y Mn.

Para la muestra 07, el 12 % del Pb se encuentra en la fracción de carbonatos, mientras que para la muestra 10, se presenta un bajo porcentaje en esta fracción (2%).

En la fracción de sulfuros el Pb se presenta en 07 y 10 en un 4 y 7 % respectivamente.

En las fracciones 1 y 2 el Pb no fue detectable dentro de los límites de detección del ICP-OES.

La distribución del Pb en la muestra 07 queda de la siguiente manera:

Fr6>Fr4>Fr3>Fr5

La distribución del Pb en la muestra 10 queda de la siguiente manera:

Fr6>Fr4>Fr5>Fr3

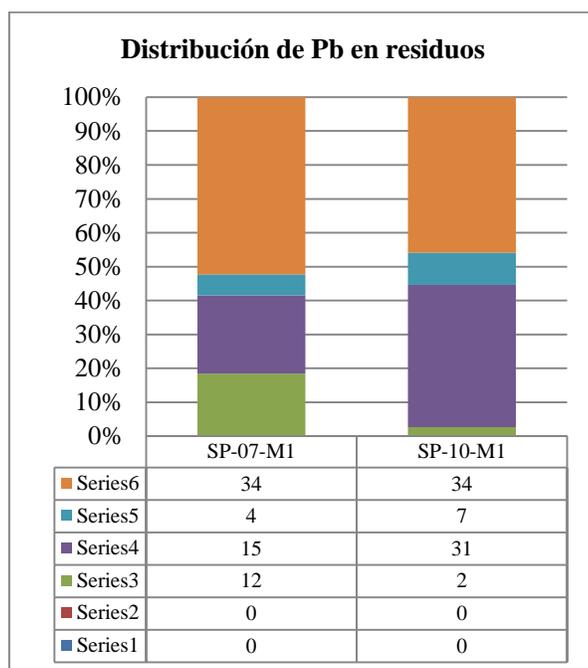


Figura 43. Distribución de Pb en las muestras 07 y 10

- (1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Pb puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

7.5.2 Arsénico

7.5.1.1 Distribución de As en Patio Victoria

La distribución de As de acuerdo al protocolo de ES para aniones, en Patio Victoria se muestra en la Figura 44.

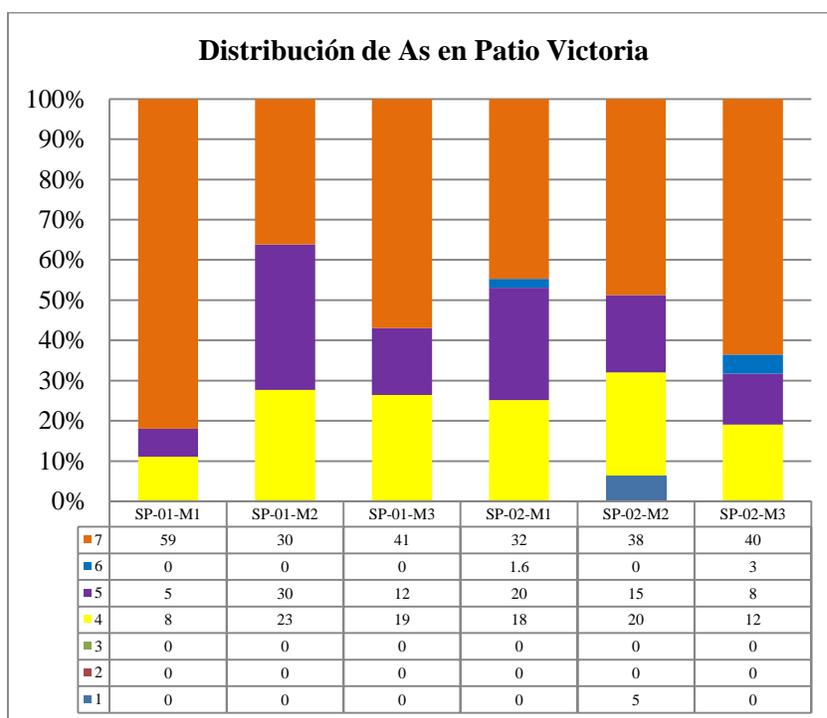


Figura 44. Distribución de As en Patio Victoria

- (1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción intercambiable aniómicamente (5) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (6) Fracción ligada a sulfuros y M.O (7) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del As puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

El As se encuentra en la fracción intercambiable aniómicamente, de un 23 a un 8 %; en la fracción asociada a óxidos de Fe y Mn el porcentaje de As está entre un 30 y un 10 %.

El As está asociado principalmente de un 50 a un 30 % a la fracción residual.

7.5.1.2 As distribuido en otros residuos

La distribución de As de acuerdo al protocolo de ES para aniones, para las muestras 07 y 10 se muestra en la Figura 45.

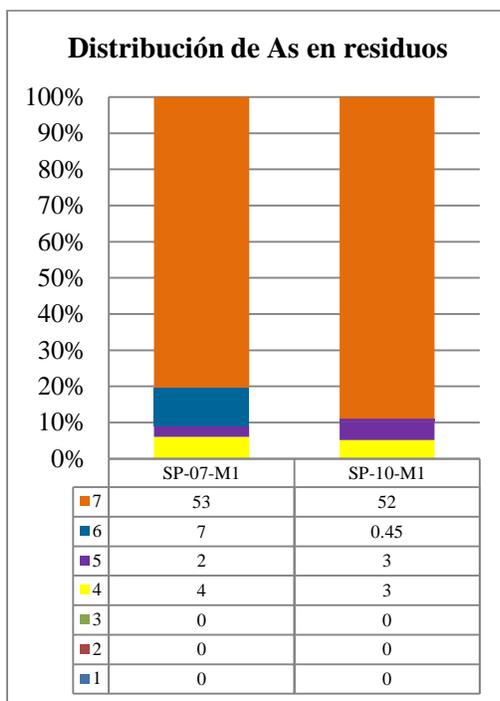


Figura 45. Distribución de As en residuos 07 y 10

- (1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción intercambiable aniómicamente (5) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (6) Fracción ligada a sulfuros y M.O (7) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del As puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

El As se distribuye principalmente en la fracción residual en un 50 %. Para la muestra 07, el 7 % del As se encuentra en la fracción asociada a sulfuros, mientras que para la muestra 10 el As en esta fracción es despreciable.

En la fracción intercambiable el As se encuentra entre un 4 y un 3 %, mientras que para la para la fracción de óxidos de Fe y Mn se encuentra en un 2 y un 3 %.

En las fracciones 1, 2 y 3 el As no fue detectable dentro de los límites de detección del ICP-OES.

7.5.3 Cadmio

7.5.3.1 Distribución de Cd en Patio Victoria

La recuperación de Cd en el procedimiento de ES no fue buena, de la concentración total, la mayor recuperación en una de las muestras de Patio Victoria fue del 57 %, el resto de las muestras oscilan entre un 30 y un 10 % de recuperación. Esto puede deberse a que las concentraciones en las diferentes fracciones no son detectables dentro de los límites de detección del equipo ICP-OES, la concentración total apenas supera ese límite. En la Figura 46 se puede observar que la única fracción en dónde se detecta el Cd, es en la fracción soluble en agua, con excepción de la muestra SP-01-M3, en dónde el 16 % de la concentración total se presenta en la fracción intercambiable.

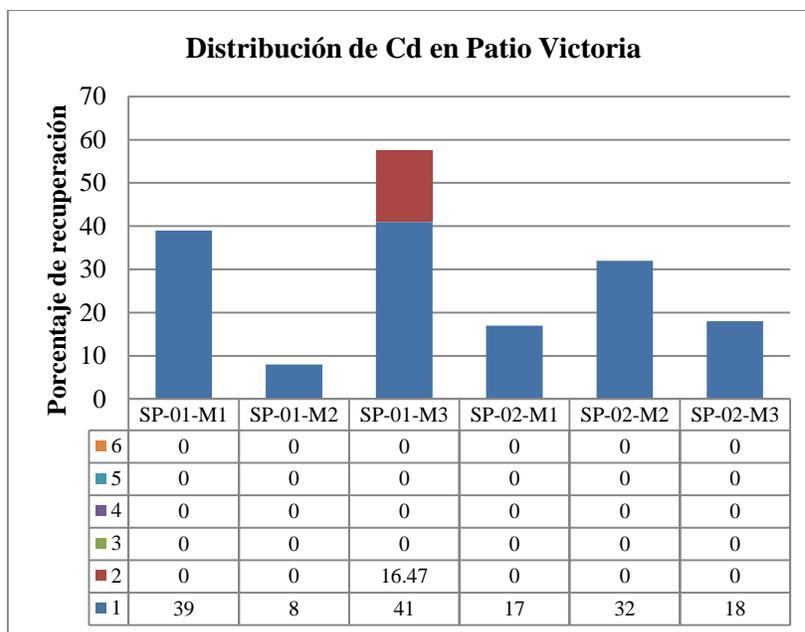


Figura 46. Distribución de Cd en Patio Victoria

(1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo utilizado.

7.5.3.2 Distribución de Cd en otros residuos

La concentración total de Cd está cerca del límite de detección, por lo que la mayoría de concentraciones en las fracciones de la ES no fueron detectables. Como se observa en la Figura 47, en los residuos SP-07 no pudo leerse ninguna concentración y en SP-10 el 67 % se presentó en la fracción asociada a óxidos de Fe y Mn.

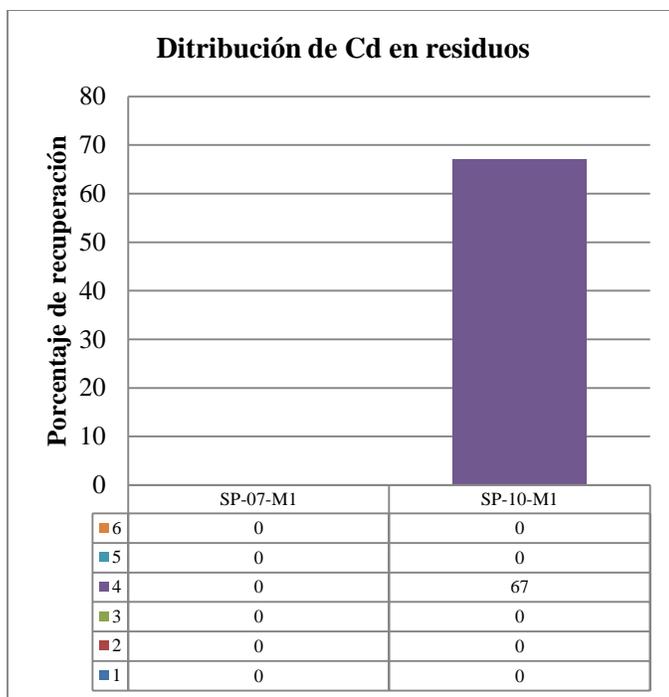


Figura 47. Distribución de Cd en otros residuos

(1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

7.5.4 Zn

7.5.4.1 Distribución de Zn en Patio Victoria

La distribución de Zn de acuerdo al protocolo de ES para cationes en Patio Victoria se muestra en la Figura 48.

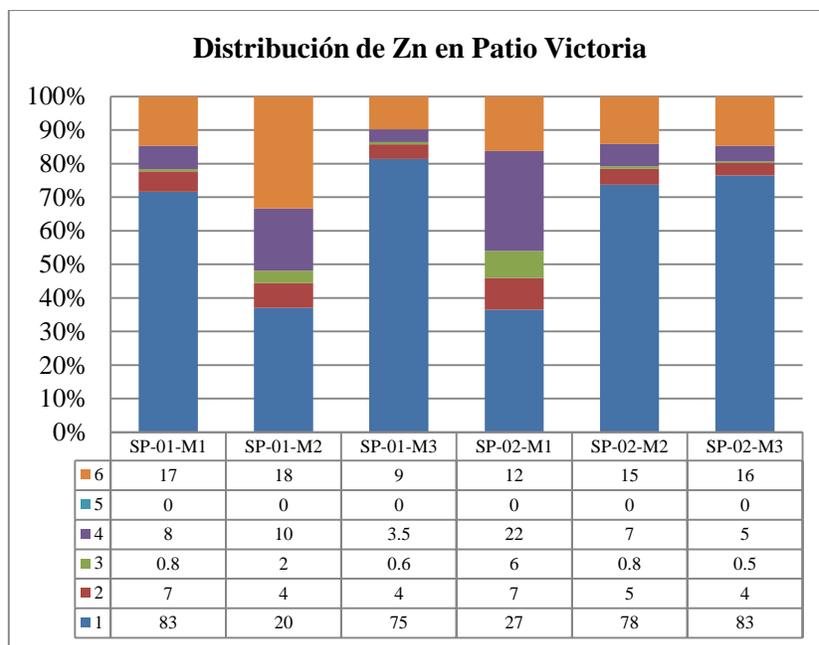


Figura 48. Distribución de Zn en Patio Victoria

- (1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Zn puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

El Zn se encuentra principalmente en la fracción soluble en agua con un porcentaje de 83 a un 20 % y en los óxidos de Fe y Mn, se encuentra hasta en un 22 %.

En la fracción intercambiable el Zn se encuentra en las muestras de Patio Victoria de un 7 a un 4 %, mientras que en la fracción de carbonatos el porcentaje es bajo oscilando entre un 6 y un 0.5 %.

El contenido de Zn en la fracción asociada a sulfuros y M.O no fue detectable.

La distribución de Zn en Patio Victoria de acuerdo a la ES es la siguiente:

$$Fr1 > Fr6 > Fr4 > Fr2 > Fr3$$

7.5.4.2 Distribución de Zn en otros residuos

Como se puede observar en la Figura 49 el Zn en los residuos 07 y 10 se encuentra principalmente en la fracción ligada a óxidos de Fe y Mn con un 48 y 38 % respectivamente.

En la muestra 07 el Zn se encontró en un 15 % en la fracción ligada a sulfuros y M.O, mientras que en la muestra 10 no fue detectable para esta fracción.

En la fracción asociada a carbonatos para las muestras 07 y 10, el Zn se presentó de manera similar con un 6.5 y 5 % respectivamente.

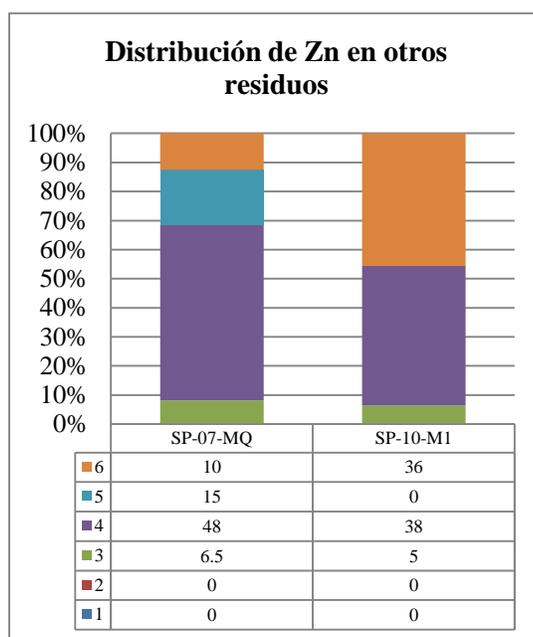


Figura 49. Distribución de Zn en residuos 07 y 10

- (1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Zn puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

La distribución de Zn en la muestra 07 de acuerdo a la ES es la siguiente:

Fr4>Fr5>Fr6>Fr3

La distribución de Zn en la muestra 10 de acuerdo a la ES es la siguiente:

Fr4>Fr6>Fr3

7.5.5 Cu

7.5.5.1 Distribución de Cu en Patio Victoria

Como se observa en la Figura 50, el Cu se distribuye principalmente en la fracción residual, en la fracción soluble en agua el Cu presenta un porcentaje de un 35 a un 15 %, a excepción de la muestra SP-01-M2 en donde no se detectó Cu en esta fracción.

En la fracción asociada a óxidos de Fe y Mn el Cu se encontró de un 20 a un 7 % mientras que en la fracción asociada a sulfuros y M.O, el Cu se encontró de un 19 a un 8 %, en las muestras SP-01-M1, SP-01-M3 Y SP-02-M3 no se detectó Cu en esta fracción

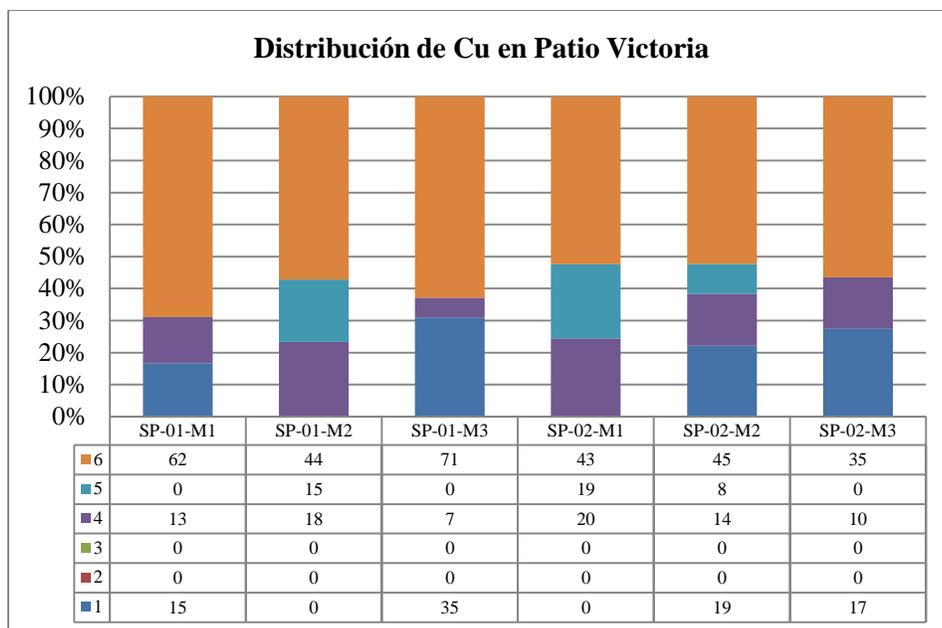


Figura 50. Distribución de Cu en Patio Victoria

(1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Cu puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

7.5.5.2 Distribución de Cu en otros residuos

En la Figura 51 se presenta la distribución de Cu en los residuos 07 y 10. Como podemos observar, el Cu se distribuye de manera similar para las dos muestras de residuos. Se encuentra principalmente en la fracción 4, asociada a óxidos de Fe y Mn, con un 38 y 40 %.

En la fracción residual, el Cu se encuentra en un 24 y 28 % y finalmente el menor porcentaje para las muestras 07 y 10 se encuentra en la fracción 5 asociadas a sulfuros y M.O, en un 16 y 10 % respectivamente.

En las fracciones 1, 2 y 3 el Cu no fue detectado.

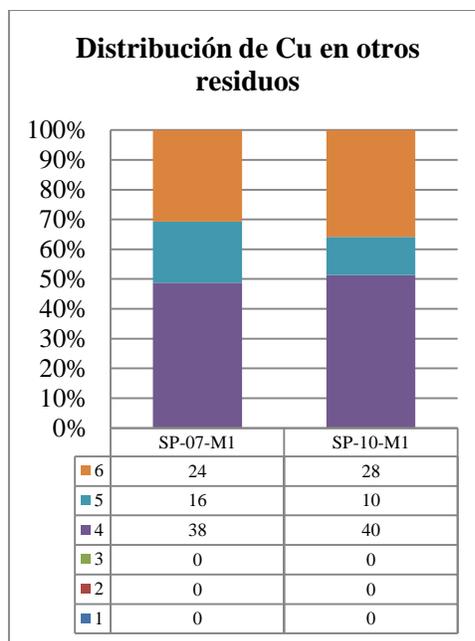


Figura 51. Distribución de Cu en residuos 07 y 10

- (1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Cu puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

7.5.6 Fe

7.5.6.1 Fe en Patio Victoria

Como se observa en la Figura 52, el Fe se encuentra enlazado a la fracción asociada a óxidos de Fe y Mn, de un 35 a un 15 % en las muestras de residuos de Patio Victoria.

En la fracción soluble en agua el Fe se presenta en la muestra SP-01-M3 en un 9 %, mientras que en el resto de las muestras se encuentra de un 5 a un 1.5 %.

También podemos observar que el Fe se encuentra unido a la fracción de sulfuros y M.O en un 5 % en promedio. En las fracciones 2 y 3 el porcentaje de Fe es muy bajo oscilando entre un

0.6 y 0.1 %. El Fe está unido principalmente a la fracción residual, los valores fluctúan entre un 50 y un 19 %.

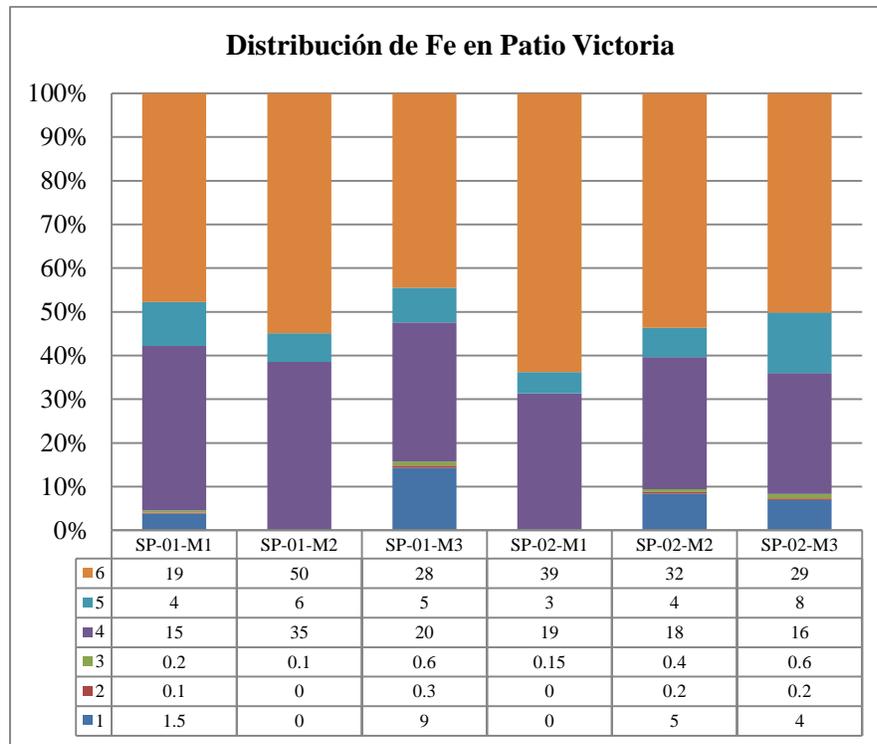


Figura 52. Distribución de Fe en Patio Victoria

(1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Fe puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

La distribución de Fe de acuerdo a la ES para cationes es la siguiente:

$$Fr_6 > Fr_4 > Fr_5 > Fr_1 > Fr_2 \sim Fr_3$$

7.5.6.2 Distribución de Fe en otros residuos

En la Figura 53 se presenta la distribución de Fe en las muestras de residuos 07 y 10.

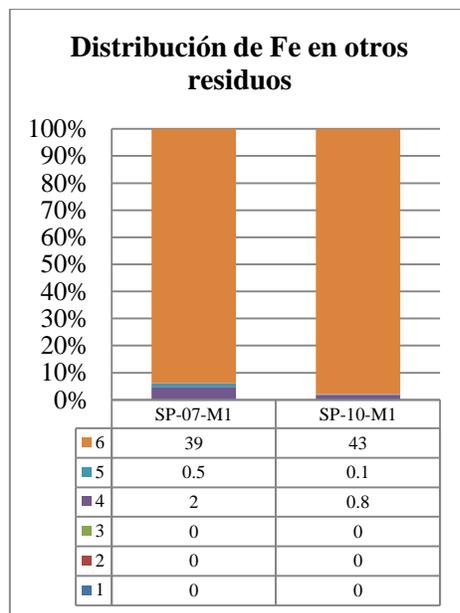


Figura 53. Distribución de Fe en residuos 07 y 10

- (1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Fe puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %. El 0 indica que no fue detectable dentro de los límites de detección del equipo.

En los residuos 07 y 10 el Fe se encuentra principalmente en la fracción residual y solo un 2 y 0.8 % en la fracción asociada a óxidos de Fe y Mn, mientras que en la fracción 5, el porcentaje de Fe es mínimo.

En las fracciones 1, 2 y 3 el Fe está por debajo de los límites de detección del equipo utilizado para la medición.

La distribución de Fe en las muestras de residuos 07 y 10 es la siguiente:

$$Fr6 > Fr4 > Fr5$$

7.5.7 Ca

7.5.7.1 Distribución de Ca en Patio Victoria

La distribución de Ca se muestra en la Figura 54.

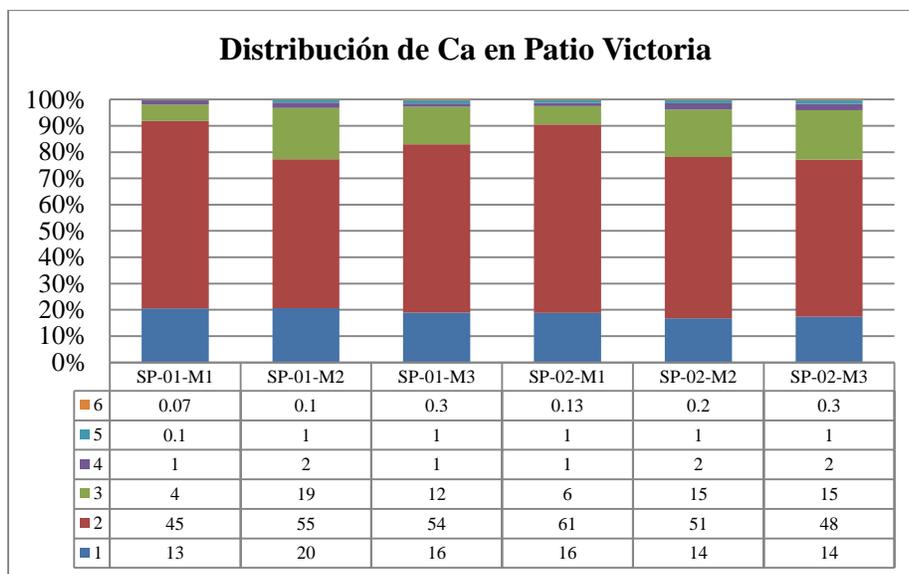


Figura 54. Distribución de Ca en Patio Victoria

(1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Ca puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %.

La mayor parte del Ca se enlaza en la fracción intercambiable de un 60 a un 45 %. Una parte importante también se enlaza en la fracción soluble en agua con un 20 a un 13 % y en porcentajes muy similares en la fracción asociada a carbonatos de un 19 a un 4 %.

Los menores porcentajes se encuentran en las tres últimas fracciones, con 1 % en la fracción 4 y 5 y de 0.3 y 0.1 % en la fracción residual.

La distribución de Ca en Patio Victoria de acuerdo a la ES para cationes, es la siguiente:

Fr2>Fr1~Fr3>Fr4~Fr5>Fr6

7.5.7.2 Distribución de Ca en residuos 07 y 10

Como se observa en la Figura 55, el Ca se enlaza principalmente, en las dos muestras de residuos, a la fracción asociada a carbonatos con el 50 % del Ca total; mientras que en la fracción ligada a óxidos de Fe y Mn, se encuentra el 9 y el 11 %.

En la muestra 07 el Ca se enlaza con un 7 % a la fracción soluble en agua, mientras que en la muestra 10 el porcentaje de Ca es muy bajo en esta fracción con solo un 0.2 %.

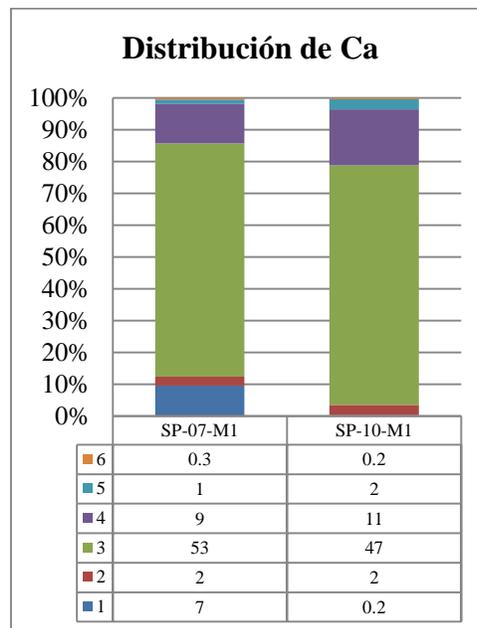


Figura 55. Distribución de Ca en residuos 07 y 10

- (1) Fracción soluble en agua, (2) Fracción intercambiable (3) Fracción ligada a carbonatos (4) Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn (5) Fracción ligada a sulfuros y M.O (6) Fracción residual.

El porcentaje de recuperación del Ca puede obtenerse de los resultados de la tabla, para fines explicativos se realizó la gráfica al 100 %.

La distribución de Ca en la muestra del residuos 07 de acuerdo a la ES para cationes es la siguiente:

$$\text{Fr3} > \text{Fr4} > \text{Fr1} > \text{Fr2} > \text{Fr5} > \text{Fr6}$$

La distribución de Ca en la muestra del residuos 10 de acuerdo a la ES para cationes es la siguiente:

$$\text{Fr3} > \text{Fr4} > \text{Fr2} \sim \text{Fr5} > \text{Fr1} \sim \text{Fr6}$$

CAPITULO 8. DISCUSIÓN

8.1 Patio Victoria

Las muestras de residuos de Patio Victoria presentan en promedio un pH ácido de 3. En los sitios en donde se encuentran gran cantidad de minerales sulfurosos y poco contenido de carbonatos se suelen producir condiciones ácidas, mientras que en los sitios ricos en minerales carbonatados aún con cantidades considerables de sulfuros, a menudo se producen condiciones alcalinas (Anju *et al.* 2011). Como se observa en los resultados del MEB, en el sitio se encuentran minerales sulfurosos como la pirita, que al oxidarse producen DAR y pH ácidos (ver sección 2.3). Tampoco se encontró contenido de carbonatos en los resultados de DRX, lo que indica que probablemente no hay potencial de neutralización significativa en el material investigado.

8.1.1 Concentración total de elementos de interés

El contenido de Pb, Fe y S de los residuos del Patio Victoria, es mayor que en el resto de los residuos estudiados en este trabajo. Si bien, el origen de los residuos de Patio Victoria no se sabe con seguridad, este material pudo originarse de algún proceso de concentración para obtener los elementos de interés económico, esto puede concluirse debido al alto contenido de Pb y de otros metales, así como el tamaño de partícula del material.

8.1.2 Movilidad de metales y metaloides

8.1.2.1 Pb

El Pb presenta baja movilidad en agua, según la prueba de movilidad en agua meteórica simulada y el primer paso del protocolo de ES para cationes, el porcentaje móvil de Pb en agua fue de un 0.2 % en promedio.

De acuerdo al ES para cationes, el Pb se encuentra en un 10 % en la fracción intercambiable en la muestra SP-01-M1, lo que podría indicar que un ion de mayor valencia o de mayor radio iónico como el Mg, Ca, Ba, etc. podría desplazar fácilmente a este porcentaje de Pb, dejándolo libre y fácilmente disponible para otros medios

En la fracción de sulfuros, el Pb se encuentra en promedio en un 6 %, lo que indicaría que se encuentra presente probablemente asociado a minerales como la galena. En los resultados del MEB (sección 7.1.2.1) podemos confirmar el contenido de galena (PbS). Los procesos de oxidación de la galena se muestran en las siguientes ecuaciones (Ecuación 10 y 11), estos procesos liberan al Pb que contienen.



La formación de anglesita en el sitio, como se observa en los resultados del MEB, Figura 56, estabiliza en cierta medida la galena presente en el sitio, ya que la anglesita es un mineral con muy baja solubilidad ($K_{ps} = 10^{-7.9}$), y al cubrir la superficie de la galena impide que entre en contacto con el O_2 . (Pasivación de la superficie Mineral).

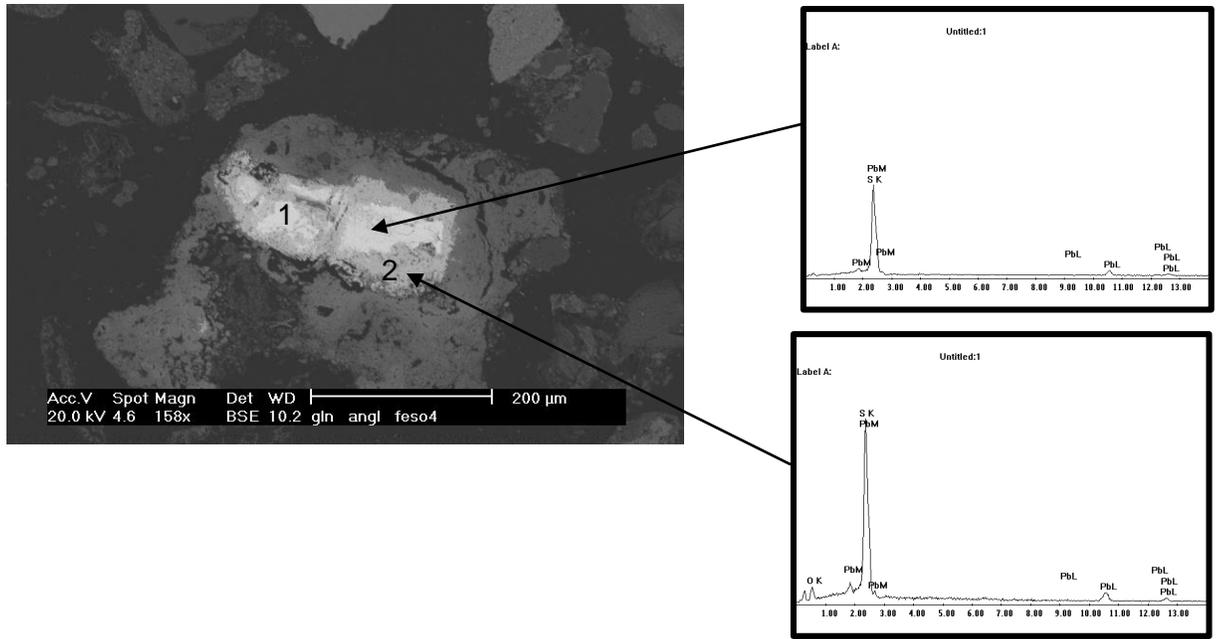
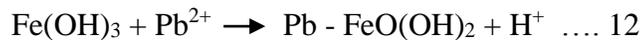


Figura 56. Recubrimiento de la galena (1) con el mineral anglesita (2) en una de las muestras correspondientes a “Patio Victoria”, junto a los espectros del microanálisis

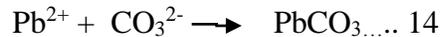
En los resultados de la ES, la anglesita (PbSO₄) podría estar presente en la fracción residual, ya que difícilmente se podría solubilizar en las fracciones anteriores debido a su baja solubilidad.

Por otra parte, también se encontró contenido de Pb en la fracción de óxidos de Fe y Mn, el Pb²⁺ que resulta de los procesos de alteración de la galena, puede precipitarse o coprecipitarse y adsorberse o incorporarse en los óxidos de Fe o Mn (Ecuación 12 y 13), y que en condiciones reductoras al redisolverse estas fases podría moverse.



También el Pb²⁺ podría adsorberse en los carbonatos y producirse minerales secundarios como la cerusita. Así mismo el Pb²⁺ podría coprecipitarse en minerales carbonatados como CaCO₃

(Ecuación 14). Esto explicaría que el Pb se encuentre enlazado en un 8 % en la fracción de carbonatos.

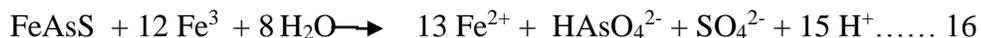
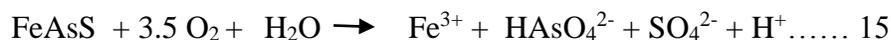


Como vemos, la presencia de galena en el sitio, ha generado diversas condiciones en las que el Pb se ha movilizó a otras fases, como la fracción móvil en agua o la intercambiable, si bien en los resultados de las extracciones secuenciales se observa un bajo porcentaje del Pb en las primeras fracciones, en la mayoría de las muestras, en la muestra SP-01-M1, se observa hasta un 10 % del Pb total en la fracción intercambiable, esto nos podría indicar que no encontramos Pb en las primeras fracciones porque este pudiera haber sido removido por el agua de lluvia.

Sin embargo como se observa en los resultados de la caracterización mineralógica y en las extracciones secuenciales, también han ocurrido una serie de procesos de inmovilización del Pb^{2+} que reduce y/o retrasaría su traslocación hacia los recursos hídricos, pues éste se ha adsorbido en fases más estables (óxidos de hierro y manganeso, anglesita) en las condiciones actuales del residuo.

8.1.2.2 As

En las muestras SP-02-M1 y M3, se encontró el 1.6 y el 3 % de As enlazado a la fracción de sulfuros, esto podría indicar que el As se encuentra como arsenopirita o como sustitución parcial en la red de la pirita. El As contenido en estos sulfuros podría movilizarse en condiciones oxidantes, tal como se muestra en las Ecuaciones 15 y 16 (PlumLee, 1999).



De acuerdo con la ES para aniones, después de la fracción residual el As se encuentra principalmente enlazado a los óxidos de Fe y Mn y a la fracción intercambiable aniónicamente. También se observa en los resultados de la caracterización mineralógica como el As se asocia a los óxidos (Figura 57).

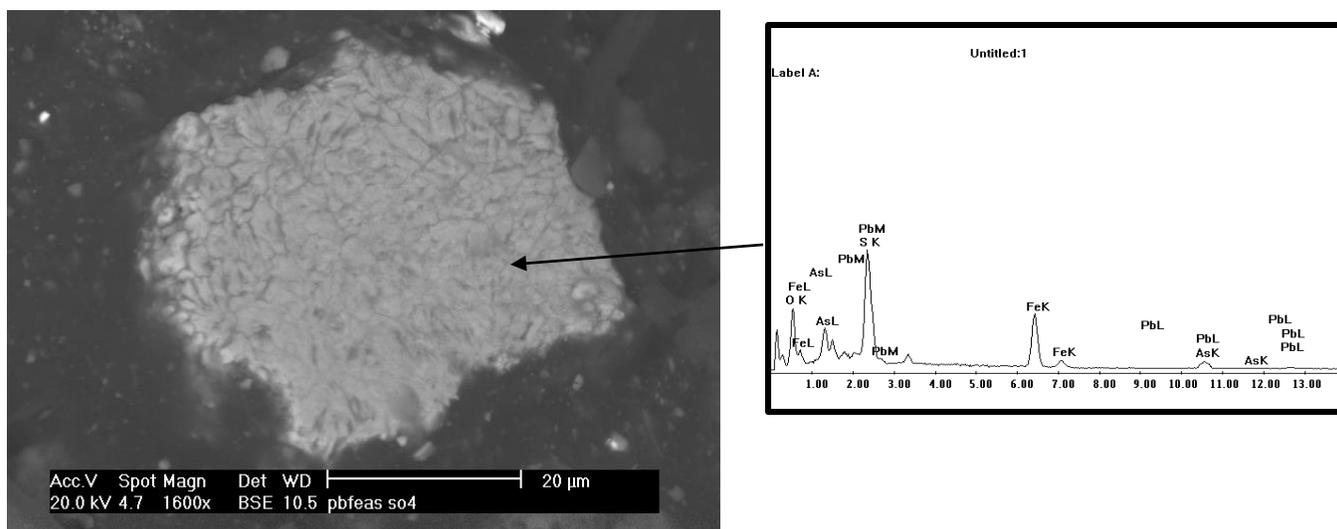


Figura 57. Partícula libre de sulfato de plomo, óxidos de hierro y arsénico, junto al espectro del microanálisis

Esto indica que aunque el As presente en los sulfuros podría movilizarse con la oxidación, en el sitio están ocurriendo procesos como la adsorción y coprecipitación de As en oxihidróxidos de Fe, o en las superficies de las arcillas cargadas positivamente, esta adsorción suele ser particularmente fuerte en condiciones de pH ácido, (Manning y Goldberg, 1997), explicando así su presencia en las fracciones 4 y 5 (Ecuación 17).



En condiciones oxidantes el As suele presentarse como arseniatos (H_3AsO_4^- , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} y AsO_4^{3-}), tal como se observa en el diagrama eh-ph (Figura 57),

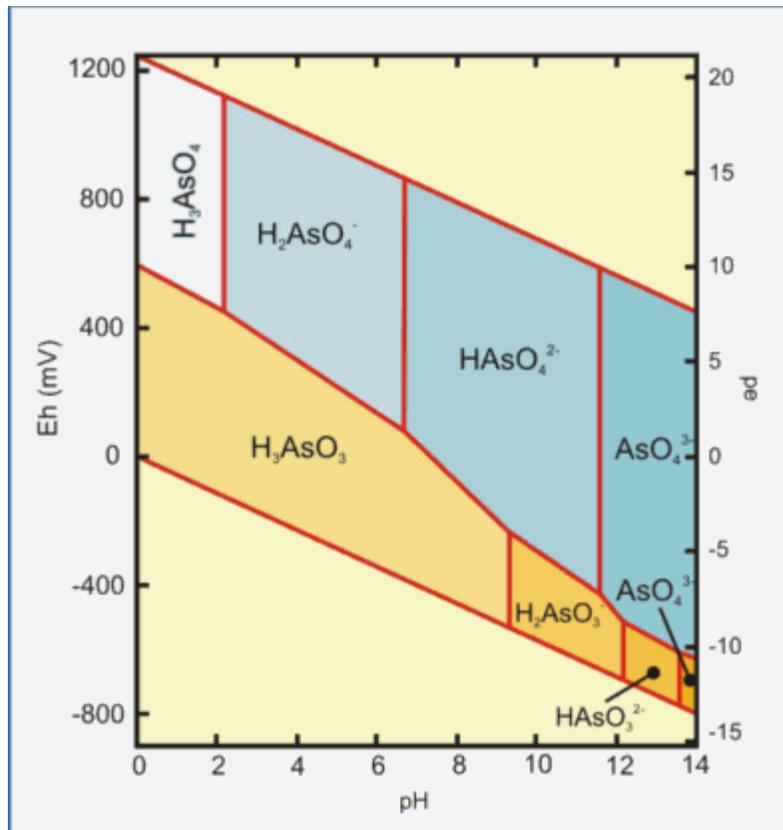


Figura 58. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As-O₂-H₂O (Smedley, 2002)

En el sitio Patio Victoria existen condiciones ácidas, lo que explica que el As esté principalmente adsorbido y no se encuentre presente en las primeras tres fracciones. Si las condiciones cambiaran a pH alcalino el As empezaría a desorberse y moverse.

El As también podría moverse en el caso de que los óxidos en donde se encuentra sufrieran una disolución reductiva.

8.1.2.3 Cd

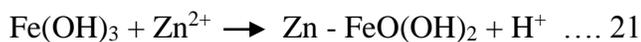
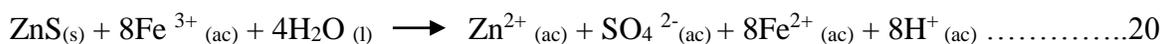
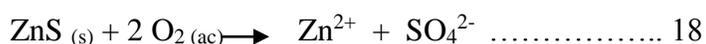
Si bien, el contenido de Cd en las diferentes fracciones no se detectó, del 40 al 10 % de éste fue encontrado en la fracción soluble en agua, lo que pudiera significar que el Cd se esté

movilizando fácilmente hacia el cauce del arroyo en épocas de lluvia, aunque cabe hacer notar que en general los contenidos de Cd se encuentran cerca de los límites de detección del método utilizado.

8.1.2.4 Zn

De acuerdo con la prueba de movilidad y a la primera fracción de ES para aniones, el Zn se encuentra en la fracción más móvil (soluble en agua), con un 50 % promedio en ambas pruebas. Según Fergusson, el Zn es considerado el metal pesado con mayor movilidad en el medio ambiente (Fergusson, 1990).

En los resultados del MEB podemos observar la presencia de esfalerita en los residuos investigados. El Zn móvil podría provenir de la descomposición de la esfalerita por medio de la oxidación (Ecuaciones 18, 19 y 20) lo que produce el ion Zn^{2+} y su posterior asociación mediante procesos como precipitación, adsorción y coprecipitación con fases del alta solubilidad como los sulfatos, explicando así que el Zn se asocie principalmente a la fracción soluble en agua. También puede adsorberse en otras fases como arcillas y óxidos de Fe (Ecuaciones 21 y 22), en Patio Victoria, el Zn se presenta en la fracción intercambiable de un 7 a un 4 % y en la fracción de óxidos de Fe de un 22 a un 10 %.

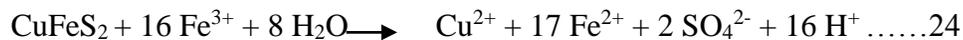
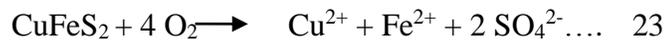




El Zn en estas condiciones puede mobilizarse fácilmente en las épocas de lluvia y llegar hacia el cauce del río San Pedro.

8.1.2.5 Cu

La proporción de Cu que se encontró en las muestras SP-01-M1, SP-01-M3, SP-02-M2 Y SP-02-M3, en la fracción soluble en agua fue de un 15 a un 35% así como en la prueba de movilidad con agua meteórica el Cu presenta movilidad de un 20 % en promedio. El Cu pudo haberse movilizado a partir de minerales como la Calcopirita presente en el sitio (oxidación de calcopirita, Ecuaciones 23 y 24) y convertirse en ion Cu^{2+} el cual puede precipitarse, adsorberse y coprecipitarse en otras fases solubles en agua (Ecuación 25), de ahí su presencia en esta primera fracción.



El Cu^{2+} también puede precipitarse o coprecipitarse en los óxidos de Fe y Mn, en el sitio de estudio se encontró que del 20 al 7 % el Cu se encuentra enlazado a estos óxidos, por lo que el Cu en este porcentaje podría mantenerse inmóvil según las condiciones actuales del depósito de residuos

La mayor parte del Cu se encontró en la fracción residual, aproximadamente en un 60 %, lo que puede significar que la mayor parte del Cu en el sitio no representa ningún peligro ambiental

inmediato para los recursos hídricos. En el futuro, si el material sigue en contacto con el O₂ y agua, el Cu podría movilizarse de la fracción residual y llegar a otras fases y/o a los recursos hídricos.

8.1.2.6 Fe

El Fe presente presenta disponibilidad para movilizarse al contacto con el agua meteórica de un 2 a un 3 %; dado que los contenidos totales de Fe oscilan entre 114163 y 122726 mg/kg, se asume que cantidades que oscilan entre 2637 y 3092 mg/kg estarían disponibles para ingresar el sistema hídrico. El pH en las muestras Patio Victoria oscila de 2 a 5, por lo que la especie de Fe que podría encontrarse, de acuerdo al diagrama de Pourbaix, en la solución es Fe²⁺, Fe³⁺, o como Fe₂O₃ dependiendo del Eh (potencial redox) (Figura 59).

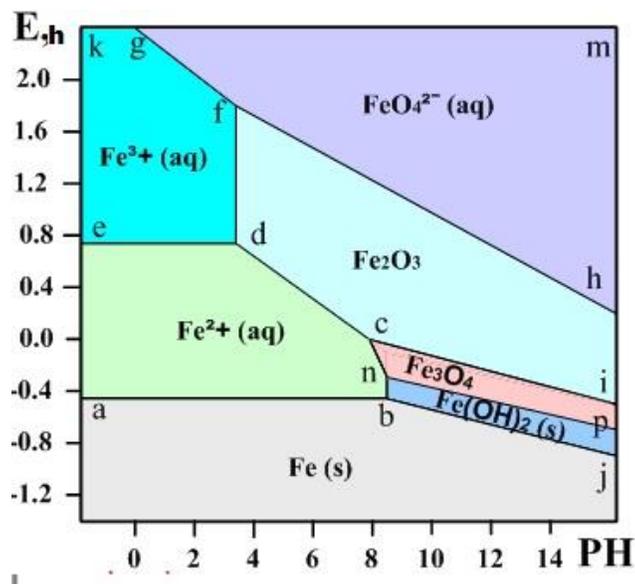


Figura 59. Diagrama simplificado de Pourbaix para el sistema Fe-H₂O a 25 °C (Substech, 2012)

Como se vio en la sección 2.4, el Fe contenido en la pirita se solubiliza en Fe²⁺ y puede quedar disuelto en solución, también pueden formarse compuestos solubles de Fe en la oxidación de minerales como la arsenopirita en donde se producen sulfatos de Fe (Ecuación 26). Esto se confirma con los resultados del MEB, en donde observamos la presencia de sulfatos de Fe.



El Fe²⁺ a su vez puede oxidarse a Fe³⁺ y si el pH aumenta a más de 3 este precipita en óxidos y oxihidróxidos (ecuaciones 27 y 28). Esto explica la formación de óxidos de Fe secundarios y el Fe enlazado a la fracción de óxidos de Fe en 30 % del Fe total.



Aproximadamente un 5 % de Fe está enlazado a la fracción de sulfuros, lo que señala hacia la presencia de pirita y otros sulfuros con contenido de Fe en el sitio.

La mayor parte del Fe esta enlazado a la fracción residual de un 50 a un 19 % del Fe total, esto podría significar que debido a que el contenido de Fe es muy alto, algunos minerales de Fe recalcitrantes no alcanzaron a disolverse en la fracción reductiva y de esta manera aparecen en la última fracción.

8.1.2.7 Ca

El Ca en Patio Victoria se encuentra soluble en agua en un 20 % en promedio lo que permite interpretar que el Ca está asociado a compuestos solubles tales como sulfatos de neoformación,

lo cual se puede confirmar a través de los resultados de la DRX en los que se observan presencia importante de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

La fracción a la que se asocia principalmente es a la intercambiable con un 50 % del Ca total, además, en la fracción asociada a carbonatos se observa que el Ca se enlaza de un 19 a un 4 %. Lo que significaría que aún hay material neutralizante en el sitio del tipo de la calcita (CaCO_3), pero en una menor proporción.

8.2 Residuos SP-07 y SP-10

Los residuos SP-07 y SP-10 presentan un pH en pasta de 8. En el residuo SP-07 vemos algunos productos secundarios de la generación de DAR como $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ por medio de DRX, esto podría significar que en el depósito pudiera generarse DAR pero el contenido de calcita, como se observa en DRX, aún es suficientemente alto para neutralizar los iones H^+ liberados y precipitar a los metales en otras fases como los óxidos de hierro y manganeso (Ecuación 29).



Sin embargo, no se detectó presencia de minerales sulfurosos mediante DRX o MEB, lo cual puede significar que como las muestras recolectadas fueron del tipo superficial, estos minerales pudieron haberse agotado y solo se observan los productos secundarios de la oxidación. En los resultados del MEB, se observan gran cantidad de metales asociados a óxidos de hierro, por lo que se puede suponer, que el depósito de minerales proviene de la zona rica en óxidos de hierro.

En el residuo SP-10 no se observa presencia de minerales como $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en DRX, ni presencia de sulfuros en el MEB, en cambio, se observan metales como el Pb o As asociados a óxidos de hierro y manganeso, por lo que puede suponerse, que el origen del residuo es de la

zona mineral rica en óxidos de hierro del yacimiento de Cerro de San Pedro y que probablemente fue procesado con el fin de obtener los elementos preciosos (Au, Ag) contenidos.

8.2.1 Concentración total de elementos

El alto contenido de metales, como el Pb, As, Zn, en los residuos 07 y 10, evidencia que estos provienen de zonas ricas en minerales y que se extrajeron para obtener algún beneficio económico.

8.2.2 Movilidad de metales y metaloides

8.2.2.1 Pb

De acuerdo a la prueba de movilidad en agua meteórica 0.15 % del Pb presente en la muestra SP-07 se moviliza. En la muestra SP-10, el Pb no fue detectable en el extracto de esta prueba.

En el residuo SP-07 se encontró que un 12% de Pb se encuentra asociado a los carbonatos. Esto se apoya con los resultados del MEB, en dónde se observa contenido de cerusita (Figura 24, sección 7.1.2.2). Es común que el Pb se asocie a aniones mayores presentes en ambientes naturales como el CO_3^{2-} en sitios contaminados por dicho metal (Bodek, 1988). La cerusita es estable en condiciones neutrales de pH y es muy poco soluble en agua, por lo que en las condiciones que se encuentra el residuo actualmente (pH=8) puede permanecer inmóvil si las condiciones no cambian en el futuro.

El 15 % del Pb total en dicha muestra se encuentra en los óxidos de Fe y Mn, en los resultados de MEB, se confirma la asociación del Pb a los óxidos (Figura 60). Es probable que en algún proceso de liberación del Pb^{2+} , este haya sido precipitado o adsorbido en dichos óxidos (ejemplo Ecuación 30).

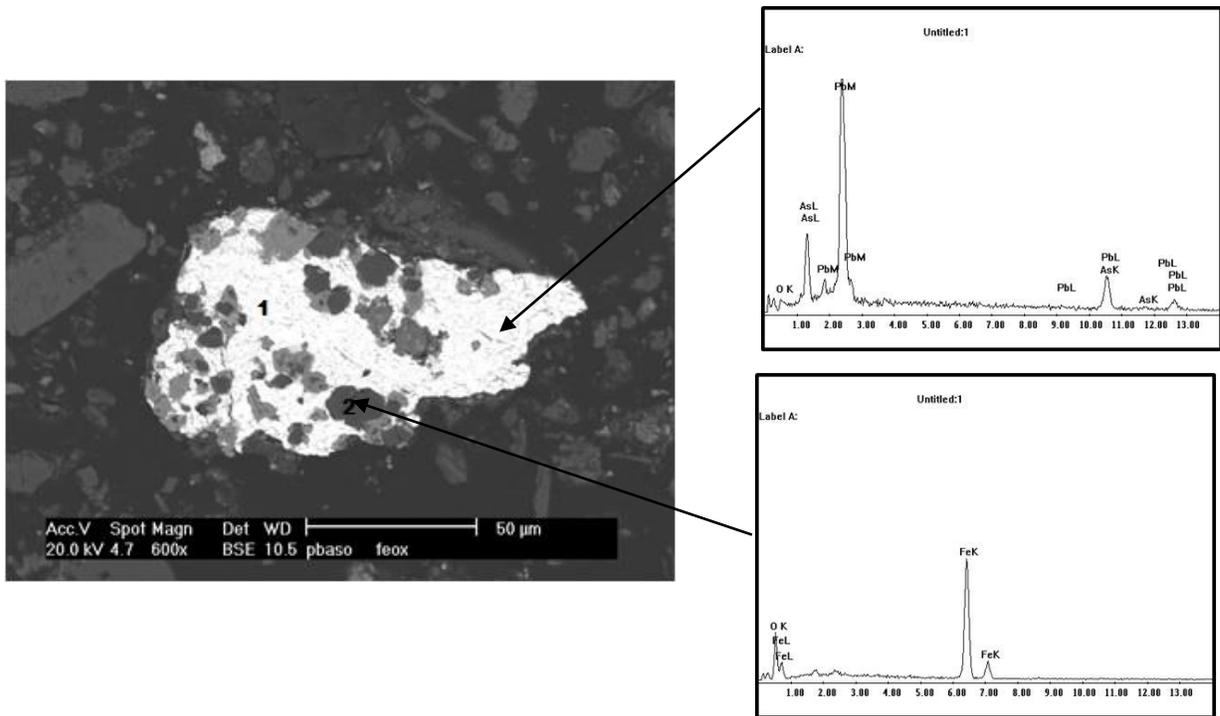


Figura 60. Partícula de arsénico y plomo asociados a óxidos de hierro con sus espectros de análisis

La mayor parte del Pb en SP-07 se encuentra en la fracción residual.

En SP-10 el Pb se encuentra en igual porcentaje en la fracción residual y en la fracción ligada a óxidos de Fe, aproximadamente en un 30 %. Esto se confirma con los resultados del MEB, pues se observa una gran asociación del Pb con óxidos de hierro. Por lo tanto, se concluye que en las condiciones actuales del residuo, el Pb no se movilizará.

8.2.2.2 As

En los residuos SP-07 y SP-10 el As no fue detectado en la prueba de movilidad en agua meteórica, ni en la primera fracción de ES para aniones.

El 50 % del As total se encontró en la fracción residual para las dos diferentes muestras analizadas, lo que se puede interpretar que este se encuentra asociado a silicatos o aluminosilicatos y que en condiciones naturales el As se encuentra de forma estable.

En SP-07 el 7 % del As, se encuentra en la fracción asociada a sulfuros, el 4 % se encuentra en la fracción intercambiable aniómicamente, por lo que este porcentaje de As es fácilmente móvil y puede llegar a los recursos hídricos, aunque también puede adsorberse en otras fases, tal como lo vemos en los resultados ya que el 2 % del As total se encuentra en la fracción de óxidos de Fe y esto puede confirmarse con los resultados del MEB (Figura 39 sección 7.1.2.2), en dónde se observa la asociación del As con los óxidos de hierro.

Para el residuo SP-10, el As no se presentó en la fracción de sulfuros lo que nos muestra que en este material no hay abundancia de minerales sulfurosos, por lo tanto el As se encuentra estable en las condiciones actuales del residuo.

8.2.2.3 Cd

De acuerdo a la prueba de movilidad, el Cd no es móvil en agua meteórica en los residuos SP-07 y SP-10. Por lo que el Cd presente en el sitio se encuentra de manera estable y no se estará movilizándose hacia los recursos hídricos.

En SP-07 el Cd no fue detectable en ninguna fracción y esto puede deberse a que los niveles de Cd en cada fracción se encuentran por debajo del límite de detección del equipo utilizado para medición.

En SP-10 el 67 % del Cd fue encontrado en la fracción asociada a óxidos de Fe, el Cd presente en el depósito pudo haberse solubilizado por procesos de intemperismo y adsorber en las superficies de los óxidos de Fe, debiendo aquí recordar que las concentraciones de Cd en las muestras van de 47 a 97 mg/kg.

8.2.2.4 Zn

En los residuos SP-07 y 10, el Zn fue encontrado principalmente, en la fracción ligada a óxidos de Fe; diversos autores han estudiado la fuerte asociación que tiene este metal con dichos óxidos (Kuo et al, 1983; Ramos et al, 1994; Lena and Gade, 1997; Anju *et. al* 2011). En los resultados del MEB, se puede observar la asociación del Zn, con los óxidos de Fe y Mn.

El 6.5 y 5 % del Zn en los residuos SP-07 y SP-10 se enlaza a la fracción de carbonatos. El carbonato de calcio puede actuar como un fuerte adsorbente para los metales pesados y podría formar complejos de sales dobles como $\text{CaCO}_3 \cdot \text{ZnCO}_3$ (Anju *et. al* 2011).

No se encontró presencia detectable de Zn en la primera fracción soluble en agua ni en la prueba de movilidad en agua meteórica, esto indica que el Zn se encuentra de manera estable bajo las condiciones actuales que se encuentran los dos residuos.

Si bien, es probable que en el residuo SP-07 han existido procesos de oxidación de sulfuros, el contenido suficiente de carbonatos en el sitio ha permitido que el pH se neutralice (Ecuación 31) y que los metales precipiten o se adsorban en óxidos de Fe o carbonatos (Figura 61).

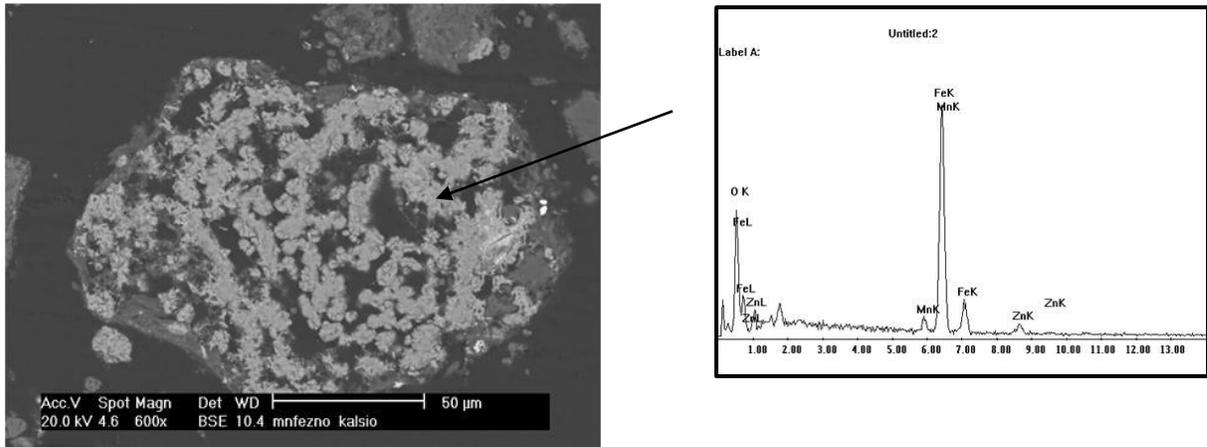
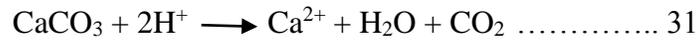


Figura 61. Asociación de Zn a óxidos de hierro y manganeso en SP-07 junto al espectro de microanálisis

8.2.2.5 Cu

No se encontró Cu en las primeras tres fracciones para los residuos SP-07 y SP-10, ni en la prueba de movilidad en agua meteórica, por lo que se concluye que en las condiciones actuales en las que se encuentra el residuo el Cu no estará llegando a los recursos hídricos.

El Cu se encontró principalmente en un 40 % en la fracción asociada a óxidos de Fe en los residuos SP-07 y 10. Con esto se puede concluir que la mayoría del Cu presente en dichos residuos se encuentra estable bajo condiciones aerobias oxidantes.

8.2.2.6 Fe

El Fe se encuentra principalmente en la fracción residual de los residuos SP-07 y SP-10. Como el contenido de Fe es muy alto, de 106004 a 74074 mg/kg, esto podría significar que el Fe que no se redujo en la fracción 4 del protocolo de ES para cationes, podría solubilizarse en la última fracción.

En las demás fracciones el porcentaje de Fe fue de 0.1 a 2 % y en las primeras dos fracciones no fue detectable. Por lo que suponemos que el Fe se encuentra de manera estable y no está formando compuestos con fases menos estables.

8.2.2.7 Ca

El contenido de Ca se enlaza principalmente en la fracción de carbonatos en las muestras de los residuos SP-07 SP-10, lo que nos confirma el alto contenido de calcita, que se observó en los resultados del DRX (Figura 21 y 22 sección 7.1.1)

8.3 Terreros

Los residuos denominados Terreros, presentan un pH en pasta de 8. El contenido de CaCO_3 es alto como se observa en los resultados de la difracción y eso explica el pH básico de los residuos.

8.3.1 Concentración total de elementos

Los terreros a diferencia de los residuos de Patio Victoria y los residuos SP-07 y 10, tienen bajo contenido de metales, con excepción del Ca. El mayor contenido de Ca puede deberse a que hay más contenido del CaCO_3 en los Terreros que en el resto de los residuos estudiados. En el Anexo 7, se encuentran las hojas de campo que describen macroscópicamente estos materiales.

El bajo contenido de metales y metaloides puede darnos una idea del origen de estos materiales, estos depósitos de residuos podrían ser excavaciones exploratorias no exitosas.

8.3.2 Movilidad de metales y metaloides

En la herramienta que se utilizó para el muestreo llamada “Inventario de Residuos Históricos” se determinó que este tipo de residuos eran de baja peligrosidad para el ambiente de acuerdo a sus características de campo.

Se decidió validar esta hipótesis, primeramente conociendo la concentración total de elementos y en segunda realizando la prueba de movilidad en agua meteórica en muestras provenientes de al menos dos diferentes terreros. Los resultados nos indicarían si continuar con la prueba de ES o confirmar la hipótesis de inocuidad planteada.

La movilidad de los metales y metaloides en este tipo de residuos según la prueba de movilidad en agua meteórica fue nula, es decir, ningún metal fue detectado dentro de los límites de detección del método utilizado para la medición. Esto quiere decir, que si bien en los terreros existe una concentración de metales y metaloides, estos no llegarán a los recursos hídricos cercanos si no hay un cambio importante en las características fisicoquímicas del material.

8.4 Inventario de Residuos Históricos

De acuerdo con los resultados descritos anteriormente, podemos concluir que el “Inventario de Residuos Históricos” permitió realizar aseveraciones de utilidad para optimizar el resto de la investigación.

Los residuos que de acuerdo a las características de campo, fueron los de más alta peligrosidad y resultaron en el color rojo (0.75-1) (Tabla 7), fueron los correspondientes al Patio Victoria. De acuerdo a los resultados, estos presentan un pH ácido, y los metales se encuentran en fases fácilmente móviles y tienen el potencial para llegar a los recursos hídricos.

En la segunda parte de esta calificación, se encontraron los residuos SP-07 y SP-10, estos residuos contienen minerales sulfurosos y una alta concentración de metales, pero el contenido de factores atenuantes como los carbonatos, mantienen a estos residuos a pH alcalinos, lo que resulta en la precipitación o adsorción de los metales en óxidos de Fe o carbonatos y estos son retenidos.

Para los residuos que de acuerdo a Índice de Selección Ambiental presentaban menos peligrosidad al ambiente, se identificaron concentraciones de metales y metaloides considerablemente inferiores al resto de los demás residuos estudiados, un pH ligeramente alcalino y una nula movilidad en agua meteórica, por lo que se confirma que los metales presentes, se encuentran en fases que los inmovilizan y no les permiten llegar a los recursos hídricos mientras no haya un cambio radical de condiciones a los que están expuestos.

CAPITULO 9. CONCLUSIONES

De acuerdo a la metodología aplicada en este trabajo se puede concluir que la movilidad de metales y metaloides depende de una serie de características y factores únicos para cada depósito de residuos en especial.

Para los residuos Patio Victoria, se concluye que han ocurrido una serie de procesos que han movilizadado a los metales y metaloides presentes en el sitio. La principal característica que los diferencia es la presencia de minerales sulfurosos los que al estar sometidos a proceso de oxidación han generado condiciones ácidas que han permitido que los metales se movilicen, sin embargo de acuerdo a la evidencia en los resultados, estos también se han adsorbido, coprecipitado o precipitado en otras fases más estables, inmovilizando parcialmente a los metales e impidiendo o retardando su tránsito hacia los recursos hídricos.

De acuerdo a la prueba de movilidad en agua meteórica y a los procedimientos de ES, el Zn resulto ser el metal más móvil en Patio Victoria, pues el 50 % del Zn, se encuentra en la fracción soluble en agua. El Pb resulto en un bajo porcentaje en las fracciones más móviles, pero debido a las altas concentraciones de Pb en el lugar, la cantidad de Pb que puede movilizarse a los recursos hídricos es muy significativa. El As se encontró en un importante porcentaje en la fracción intercambiable anionicamente, por lo que se encuentra débilmente adsorbido y cualquier cambio en las condiciones actuales puede movilizarlo. Por lo que se concluye que metales como Zn, Pb, Cd, Cu, As tienen potencial para ser movilizadados en concentraciones que pueden poner en riesgo la calidad de los recursos hídricos con los que entren en contacto.

El promedio de la concentración de la fracción movilizable del residuo y que en época de lluvia podría llegar a los cauces del río San Pedro o infiltrarse hacia el agua subterránea en Patío Victoria es la siguiente:

Para SP-01

Pb (33 mg/kg) + As (20 mg/kg) + Cd (17 mg/kg) + Cu (15 mg/kg) + Zn (1644 mg/kg) + Fe (3092 mg/kg)

Para SP-02

Pb (13 mg/kg) + As (3 mg/kg) + Cd (14 mg/kg) + Cu (22 mg/kg) + Zn (1659 mg/kg) + Fe (2637 mg/kg)

Es importante considerar que esta concentración de metales está sujeta a procesos de atenuación natural, es decir, no todo podría llegar a los recursos hídricos, pues una serie de procesos como la adsorción, coprecipitación o precipitación en otras fases como las arcillas, carbonatos o los óxidos de hierro y manganeso podrían ocurrir e inmovilizar a los metales y metaloides que se encuentran en esta fracción. Otro aspecto a considerar sería la relación entre la precipitación y la evaporación en el sitio de estudio, la precipitación total anual en Cerro de San Pedro en el 2008 era de 306.1 mm y la evaporación total anual era de 1817.9 mm (MSX, 2010), por lo que es posible inferir que existe una deficiencia de agua durante todo el año ya que la capacidad de evaporación supera a la precipitación, este hecho genera que los metales asociados a la fracción móvil en agua meteórica puedan permanecer precipitados en otras fases y no lleguen a los recursos hídricos.

Como se observó en los resultados del MEB, aún hay presencia de minerales sulfurados, como la pirita o la galena, por lo que se espera que los procesos de oxidación y movilización sigan ocurriendo, en especial en material del Patio Victoria.

Para los residuos SP-07 y SP-10, se concluye que aunque la concentración de metales y metaloides es muy alta, las condiciones en las que se encuentran éstos, adsorbidos en fases estables como óxidos de Fe y carbonatos, no permiten que se estén movilizando hacia los recursos hídricos. Si las condiciones de estos depósitos no cambian, los metales y metaloides permanecerán estables.

En el resto de los depósitos de Cerro de San Pedro, los residuos presentan una concentración más baja de metales y metaloides y de acuerdo a la metodología aplicada, estos permanecen estables y no tienen el potencial para moverse a los recursos hídricos.

Con los resultados obtenidos, puede concluirse también que lo planteado en el “Inventario de Residuos Históricos” puede considerarse que el planteamiento es válido para el sitio de estudio. En los residuos utilizados para validar la herramienta, se pudo comprobar, que estos no presentan ningún peligro ambiental, ya que tienen una concentración baja de metales y metaloides y estos no se movilizan fácilmente. Por lo que esta herramienta puede ser útil en sitios en donde hay una gran cantidad de depósitos de residuos.

Para entender de manera más completa el comportamiento de los metales y metaloides se recomienda realizar el muestreo de los depósitos de residuos a diferentes profundidades. Además se recomienda relacionar los resultados de las concentraciones móviles en agua con los pozos de monitoreo del sitio para buscar relacionar de manera más precisa la concentración de metales y metaloides que está llegando al agua subterránea por infiltración.

BIBLIOGRAFIA

Almaguer Rodríguez 2010. Estudio Geoquímico de dos elementos traza en unidades volcánicas del CVSLP: Método ICP-MS (Validación del Método). 2010. Universidad Autónoma San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería.

Alloway, B. J, 1995. The Mobilization of Trace Elements in Soils. Contaminated Soils. International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. INRA, París, 525 pp.

Anju M, D.K. Banerjee. 2001. Associations of cadmium, zinc, and lead in soils from a lead and zinc mining area as studied by single and sequential extractions. Environ Monit Assess (2011) 176:67–85.

Balbotin, M. B. 1972. Geología del distrito minero de Cerro de San Pedro, S. L. P. Trabajo recepcional. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 305 p.

BCR, European Community Bureau of Reference, 2004. E. Fernandez, R. Jimenez, A.M. Lallena, J. Aguilar. Evaluation of the BCR sequential extraction procedure applied for two unpolluted Spanish soils. ENVIRONMENTAL POLLUTION 131 (355-364) 2004.

Bodek, I., Lyman W.J., Reehl W.F., y Rosenblatt, D.H. 1998. Environmental Inorganic Chemistry Properties, Processes and Estimation Methods. SETAC. Special Publications Series, Pergamon Press.

Bourg, A.C.M. 1995. Speciation of heavy metals in soils and groundwater and implications for their natural and provoked mobility. In "Heavy Metals", W. Salomons, U. Förstner & P. Mader, eds. Springer-Verlag, Berlin, 19-31.

Carnet Hernández Gabriel, 2010. Caracterización de una Empresa Minera, en relación con Canaima Tours. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.

De La Rosa Jesús D, 2008. Contaminación Atmosférica de Material Particulado Provocada por la Extracción Minera. Universidad de Huelva. Campus Universitario del Carmen. Huelva, España.

Dold, B. 2002. Basic Concepts of Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste. XXIV Curso Latinoamericano de Metalogenia, Lima, Perú.

Dold Bernhard. 2003. Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste. Journal of Geochemical Exploration 80 (2003) 55–68. 2003

Dueñas Carmen Gloria. 2010. Generación de Drenaje Ácido. Programa de Medio Ambiente. Fundación Chile.

Drever, J. I. 1997. The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments. 3rd ed. Prentice Hall. New Jersey. pp. 87-105, 129-157, 175-196.

Emerson, D., 2000. Microbial oxidation of Fe(II). and Mn (II). At circumneutral pH. Lovley, D.R. Ed., Environmental Microbe–Metal Interactions. ASM Press, Washington, pp. 31–52.

Ferguson, J. E. 1990. The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects. Pergamon Press, England.

Galán Huertos Emilio, Romero Baena Antonio. 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. Revista de la sociedad española de mineralogía. Macla no.10, 2008, pp 48-60.

García Cortes Ángel, 2008. Minería y Desarrollo Sostenible. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España.

Geotimes, En Klein, Cornelius y Hurbolt, Cornelius. 1989. “Manual de Mineralogía”. Vol 34, pag 19. Cuarta Edición. Edit Reverte, S.A. España.

González Chávez., J. Pérez-Moreno y R. Carrillo-González. 2005. El sistema planta microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Colegio de Postgraduados de Texcoco, México, 161 p.

Han, F.X. 2007. Biogeochemistry of Trace Elements in Arid Environments. En B.J. Alloway y J.T. Trevors (Edits.), Environmental pollution (Vol. 13). Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Hlavay József, Prohaska Thomas, Weisz Márta, Wenzel Walter W. Y Stingeder Gerhard J. 2004. Determination Of Trace Elements Bound To Soils And Sediment Fractions. IUPAC, *Pure Appl. Chem.*, Vol. 76, No. 2, pp. 415–442.

INEGI, 2010. Censo de Población y Vivienda 2010.

Jiménez Carolina, Huante Pilar, Rincón Emmanuel, 2006. Restauración de Minas Superficiales en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Jones, B. T. 2000. Inductively Coupled Plasma/Optical Emission Spectrometry. En Encyclopedia of Analytical Chemistry. R. A. Meyers (Ed.). John Wiley and Sons. Chichester, Eng. pp. 9468-9485.

Keon, N. E. 2001. Validation of an arsenic sequential extraction method for evaluating mobility in sediments. *Environmental Science and Technology*. 35:2778-2784.

Kuo, S., P.E. Heilman, and A.S. Baker. 1983. Distribution and forms of copper, zinc, cadmium, iron, & manganese in soils near a copper smelter. *Soil Sci.* 135:101-109.

Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M. y Aranda-Gómez, J.J., 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico no. 85, 208 pp.

Lottermoser, B.G. 2007. *Mine Wastes: Characterization, Treatment, Environmental Impacts*, 2 ed., Springer.

Loredo Osti Catarina, Beltrán López Sergio, Moreno Sánchez Francisco, Casiano Domínguez Marcos, 2007. Riesgo a la Erosión Hídrica y Proyección de Acciones de Manejo y Conservación de Suelo en 32 Microcuencas de San Luis Potosí. SAGARPA. Libro técnico No. 3, pp. 33-35.

Lena K. Ma, Gade N. Rao. 1997. Chemical Fractionation of Cadmium, Copper, Nickel, and Zinc in Contaminated Soils. *Journal Environmental Quality* Volume 26, no. 1, January-February 1997.

Manning, B.A., Goldberg, S. 1996. Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 121-131.

Martínez Chaves Paula Andrea, Betancourt Mendieta Alexander, Caretta Miguel Nicolás, Aguilar Robledo Miguel. 2010. Procesos históricos y ambientales en Cerro de San Pedro, San Luis Potosí, México, 1948-1997. *Región y sociedad* / vol. xxii / no. 48. 2010.

McLaren,* R. Naidu, J. Smith, and K. G. 1998. Tiller. Fractionation and Distribution of Arsenic in Soils Contaminated by Cattle Dip. *J. Environ. Qual.* 27:348-354 (1998).

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPUT). 1991. Guía para la elaboración de estudios del medio físico: Contenido y metodología. Tercera Edición. Madrid, España.

MMSD, 2002. Mining for the Future. Appendix A. Large Volume Waste. No.31.

MMSD1, 2002. Mining for the Future. Appendix D. Workshop summary and recommendations. No.208a.

MSX (Minera San Xavier). 2010. Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Regional. Abril 2010.

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

NORMA Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. SEMARNAT. México.

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.

NORMA Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007. Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.

NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.

NORMA Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011, Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.

Ortega Morales Natalia Belén. 2012. Asociación entre la fracción bioaccesible y la bioacumulación en algunas especies vegetales que crecen en el cauce del arroyo de San Pedro. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Pacheco Tovar Jorge A, 2005. El Agua Subterránea en el Medio Ambiente Minero y su Importancia en los Planes de Cierre. Estudios de Plan de Cierre de la Unidad Minera Graciela de Perubar SA. Lima, Perú.

Parviainen Annika, 2009. Tailings Mineralogy and Geochemistry at the Abandoned Haveri Au-Cu Mine, SW Finland. *Mine Water Environ* (2009) 28:291–304. 2009

Pauwels Helene, Pettenati Marie, Greffie Caterine, 2010. The combined effect of abandoned mines and agriculture on groundwater chemistry. *Journal of Contaminant Hydrology*. Volumen 115, 64-78.

Plumlee, G. S. The environmental geology of mineral deposits. En Plumlee, G. S. y Logsdon, M.J. [Editors], 1999. *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Part A: Processes, Techniques and Health Issues. Reviews in Economic Geology Volume 6A*. Society of Economic Geology, Inc. (Littleton, Col., USA): 71-116.

Ramos, L., L.M. Hernandez, and M.J. Gonzalez. 1994. Sequential fractionation of copper, lead, cadmium and zinc in soils from or near Donana National Park. *J. Environ. Quai*. 2350-57.

Razo I., R., Muñoz C., Cepeda M., Monroy. 2007. Caracterización ambiental de residuos mineros históricos del Distrito Minero Cerro de San Pedro, (San Luis Potosí, México). J. C. Salinas Prieto (Ed.). Memoria de la XXVII Convención Internacional de Minería de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México. Veracruz, Ver (México).

Salazar González Guadalupe. 2000. Las haciendas en el siglo xvii en la región minera de San Luis Potosí. Su espacio, forma, función, material, significado y la estructuración regional San Luis Potosí. México. UASLP.

Secretaría de Economía, 2014. <http://www.economia.gob.mx/comunidad-negocios/mineria>
Consultado el 26 de junio de 2014.

SEMIP (Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal). 1992. Monografía Geológico-Minera, Caracterización Ambiental de Residuos Mineros Históricos del Distrito Minero de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí, México, p 205-210.

Smedley P.L., Kinniburgh D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517-568.

Smith, K. .S. and Huyck, H. L. O. 1999. An overview of the abundance, relative mobility, bioavailability, and human toxicity of metals; in Plumlee, G.S., and Logsdon, M.J. (eds.), *The*

Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, v. 6A, pp. 29-70.

SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2007. Documento consultado en: (<http://smn.cna.gob.mx>), el día 12 noviembre 2013.

Tessier A., Campbell P.G., Benson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of trace metals. Anal. Chem. 51:844-851.

Tristán-González, M., Torres-Hernández, J.R y Labarthe-Hernández, G. 2002. Carta Geológica Minera y Geoquímica, Carta San Luis Potosí. Esc 1:50,000. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, Consejo de Recursos Minerales e Instituto de geología de la UASLP.

Vázquez Guadalupe, 2007. Movilización de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la rizosfera de *Viguiera dentata*, una especie vegetal tolerante, de suelos de Villa de la Paz, Matehuala, S.L.P, México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Vázquez Santa Elena, 2012. Caracterización de un depósito no controlado de residuos mineros y evaluación de impacto en el suelo superficial. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería

Warren Lesley A, Haack Elizabeth. 2000. Biogeochemical controls on metal behaviour in freshwater environments. *Earth-Science Reviews* 54 (2001). pp 261–320.

Wenzel, W. W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E., & Adriano, D. C. 2001. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Analytica Chimica Acta*, 436, 309–323.

Xiangdong, L., I., Thornton. 2001. Chemical Partition of trace and major elements in soils contaminated by mining and smelting activities. *Applied Geochemistry* 16: 1693-1706.

Zimmerman Jo Amanda y Weindorf David C. 2010. Heavy Metal and Trace Metal Analysis in Soil by Sequential Extraction: A Review of Procedures. *International Journal of Analytical Chemistry*. Volume 2010.

Páginas web consultadas:

ARM, 2004. Alaskans for Responsible Mining. December, 2004. Environmental Impacts Fact Sheet. (http://www.miningwatch.ca/updir/ARM_Envnt_Impacts_Fact_Sheet.pdf)

Consultado el 13 de mayo del 2014.

INE 2010. (<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/459/cap3.html>). Consultado el 25 de febrero del 2014.

INE, 2014 (http://www2.inecc.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/35/los_residuos.html).

Consultado el 25 de febrero del 2014.

New Gold, 2012. <http://www.newgold.com/properties/operations/cerro-san-pedro/geology-and-mineralization/default.aspx>. Consultado el 14 de enero del 2015.

UPV (Universidad Politécnica de Valencia), 2009. <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13683/Sulfuros%20revisado%20definitivo.pdf?sequence=3>. Consultado el 13 de mayo de 2014

Substech, 2012 (http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=pourbaix_diagrams).

Consultado el 8 de junio de 2015.

ANEXOS

ANEXO 1 Procedimiento para el cálculo de ISA de los depósitos de residuos

SP-01/INV

Características adversas: 101

Características atenuantes: 0

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) * 101] - [(22/131) * 0] = 0.84$$

SP-02/INV

Características adversas: 101

Características atenuantes: 0

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) * 101] - [(22/131) * 0] = 0.84$$

SP-03/INV

Características adversas: 43

Características atenuantes: 22

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) * 43] - [(22/131) * 22] = 0.32$$

SP-04/INV

Características adversas: 38

Características atenuantes: 15

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) * 38] - [(22/131) * 15] = 0.29$$

SP-05/INV

Características adversas: 34

Características atenuantes: 15

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *34] - [(22/131) *15] = 0.26$$

SP-06/INV

Características adversas: 30

Características atenuantes: 22

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *30] - [(22/131) *22] = 0.21$$

SP-07/INV

Características adversas: 68

Características atenuantes: 17

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *68] - [(22/131) *17] = 0.54$$

SP-08/INV

Características adversas: 46

Características atenuantes: 22

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *46] - [(22/131) *22] = 0.32$$

SP-09/INV

Características adversas: 17

Características atenuantes: 3

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *17] - [(22/131) *3] = 0.14$$

SP-10/INV

Características adversas: 66

Características atenuantes: 22

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *66] - [(22/131) *22] = 0.51$$

SP-11/INV

Características adversas: 21

Características atenuantes: 3

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *21] - [(22/131) *3] = 0.17$$

SP-12/INV

Características adversas: 36

Características atenuantes: 15

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *36] - [(22/131) *15] = 0.27$$

SP-13/INV

Características adversas: 59

Características atenuantes: 15

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *59] - [(22/131) *15] = 0.47$$

SP-14/INV

Características adversas: 30

Características atenuantes: 10

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *30] - [(22/131) *10] = 0.23$$

SP-15/INV

Características adversas: 30

Características atenuantes: 10

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *43] - [(22/131) *22] = 0.23$$

SP-16/INV

Características adversas: 28

Características atenuantes: 10

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *43] - [(22/131) *22] = 0.22$$

SP-17/INV

Características adversas: 28

Características atenuantes: 10

$$\mathbf{ISA} = [(109/131) *43] - [(22/131) *22] = 0.22$$

ANEXO 2 Límite de detección y cuantificación

El Límite de detección (LD) y cuantificación (LC) en este trabajo se calculó con el estándar más bajo medido para cada elemento.

LD = Estándar más bajo / 3

LC = Estándar más bajo

Cu	LD	LC
0.1063306	0.03544353	0.1063306
Ca		
0.1112127	0.03707091	0.1112127
Zn		
0.094734	0.03157801	0.094734
Cd		
0.1052425	0.03508084	0.1052425
Pb		
0.109032	0.036344	0.109032
As		
0.1082549	0.03608497	0.1082549
Fe		
0.106647	0.035549	0.106647

ANEXO 3 Exactitud

Los valores certificados del MRC Montana Soil 210^a se encuentran en la siguiente tabla, además se encuentra el valor medido de la muestra del MRC.

Tabla 20. Valores certificados del MRC Montana Soil 210^a (mg/kg)

Elemento	Valor certificado	Valor medido
Pb	5800	5648.915404
As	1600	1536.440023
Cd	12.3	11.68554324
Zn	4180	3986.234333
Cu	3500	3079.352369
Fe	30000	28008.96586
Ca	2000	1829.815479

El porcentaje de recuperación se calculó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Recuperación} = \text{Valor medido} * 100 / \text{Valor certificado}$$

ANEXO 4: Concentración total de elementos para cada una de las muestras

Tabla 21. Concentración total de Pb, As, Cd y Zn para cada una de las muestras

ID Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/L)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Pb		As		Cd		Zn	
SP-01-M1	32.5316019	15595.20702	3.88069638	1860.35301	0.07984183	38.27508811	4.657898	2232.932886
SP-01-M2	41.3211044	20598.75596	1.54709837	771.23548	0.05919052	29.50674125	4.657896	2321.982054
SP-01-M3	22.3665408	10910.50772	3.46322552	1689.3783	0.17541993	85.57069827	9.425885184	4597.992773
SP-02-M1	19.9090797	9895.168859	2.76711925	1375.30778	0.0861056	42.79602514	8.783662212	4365.637282
SP-02-M2	34.3268694	17657.85464	3.37688326	1737.07987	0.08424024	43.33345531	5.320040656	2736.646428
SP-02-M2-D	35.120225	17918.48212	3.39470853	1731.99415	0.08547249	43.60841218	5.429046608	2769.921739
SP-02-M3	23.4500662	10968.22556	3.2649835	1527.12044	0.10084951	47.17002231	4.924019938	2303.096323
SP-03-M1	0	0	0.16109095	76.7523919	0	0	0.732012979	348.7703401
SP-04-M1	0	0	0	0	0	0	0.29754078	137.0134195
SP-05-M1	0	0	0.32761067	164.647807	0	0	0.334807439	168.2647006
SP-06-M1	0.09111996	45.92473415	0.44924586	226.421263	0	0	2.62640822	1323.71763
SP-07-M1	20.5033864	9933.811251	3.73148182	1807.88848	0.19134027	92.70361816	19.59801451	9495.162071
SP-08-M1	0.16001825	77.65184143	0.44160476	214.296953	0	0	0.21576486	104.7039271
SP-08-M1-D	0.21785132	107.7630681	0.38261506	189.265656	0	0	0.194808317	96.36453958
SP-10-M1	20.5946096	10369.89406	4.48004457	2255.81297	0.0931371	46.89682737	7.181692754	3616.159494
SP-13-M1	5.44249333	2757.088819	1.12070776	567.734425	0.11397099	57.73606281	16.25810224	8236.120688

Tabla 22. Concentración total de Cu, Fe y Ca para cada una de las muestras

ID Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Cu		Fe		Ca	
SP-01-M1	0.21681503	103.9381741	270.162016	129511.992	147.806332	70856.34341
SP-01-M2	0.18927966	94.3567618	154.042267	76790.7614	104.749231	52217.96156
SP-01-M3	0.16477395	80.37753649	279.183881	136187.259	133.193345	64972.36363
SP-02-M1	0.26641888	132.4149498	192.022134	95438.4361	114.789934	57052.65114
SP-02-M2	0.21389797	110.0298214	234.230722	120489.055	128.025476	65856.7264
SP-02-M2-D	0.22080722	112.6567451	218.389999	111423.469	132.226438	67462.46834
SP-02-M3	0.20209001	94.5229221	325.509193	152249.389	155.307831	72641.64223
SP-03-M1	0	0	32.036861	15264.0831	411.917547	196259.6664
SP-04-M1	0	0	64.1134446	29523.3557	112.885224	51982.08663
SP-05-M1	0	0	39.8065852	20005.6581	471.667076	237046.4635
SP-06-M1	0.09111996	45.92473415	93.503754	47126.1728	471.641762	237708.8643
SP-07-M1	0.42802315	207.3755591	152.889521	74074.3803	255.492438	123785.0957
SP-08-M1	0	0	26.329563	12776.912	635.708489	308489.4137
SP-08-M1-D	0	0	24.1698114	11955.9205	610.894509	302187.1403
SP-10-M1	0.36460225	183.5862269	210.524078	106004.068	289.407729	145723.932
SP-13-M1	0.27345631	138.5290329	94.8270566	48038.0226	57.7616934	29261.24284

ANEXO 5. Concentración total de elementos en la prueba de movilidad con agua meteórica

Tabla 23. Concentración total de elementos de las muestras sometidas a la prueba de movilidad con agua meteórica

ID Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)						
	Cu		Fe		Ca		S	
SP01-RS-M1	0.557062867	11.08950631	44.35305788	882.940767	388.462678	7733.165454	6.931805343	137.9921435
SP01-RS-M2	0	0	4.347545086	86.9566988	437.036307	8741.308895	0	0
SP01-RS-M2-D	0	0	6.009955227	120.399771	458.0230154	9175.753231	0	0
SP01-RS-M3	1.478807711	29.56629878	415.5004149	8307.23922	377.6782404	7551.047792	0	0
SP02-RS-M1	0	0	4.853980029	97.131404	447.4537641	8953.850669	0	0
SP02-RS-M1-D	0	0	3.088458428	61.543509	415.375546	8277.161328	0	0
SP02-RS-M2	1.049544674	21.00489674	186.2424473	3727.33383	429.3640562	8593.009798	0	0
SP02-RS-M3	0.804299731	16.0699247	204.4836261	4085.58693	415.2464403	8296.632175	0	0
SP03-RS-M1	0	0	0.454049207	9.11135532	32.57192441	653.6172122	0	0
SP10-RS-M1	0	0	0	0	33.28433471	664.8888276	0	0
SP10-RS-M1-D	0	0	0	0	35.21138363	703.5710063	0	0
SP07-RS-M1	0	0	0.647382128	12.9089158	349.1375909	6961.86622	0	0

ID Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)						
	Pb		As		Cd		Zn	
SP01-RS-M1	2.841991878	56.57581708	0.154424637	3.07414672	0.639855913	12.73767577	74.02892575	1473.701243
SP01-RS-M2	1.631345597	32.62908722	0	0	0.131376064	2.627696467	15.56708408	311.3624392
SP01-RS-M2-D	5.24806785	105.1365846	0	0	0.134767326	2.699846268	15.72211951	314.9673357
SP01-RS-M3	0.458505689	9.167058087	2.793312379	55.8476317	1.735224825	34.69293219	0	0
SP02-RS-M1	0.850118965	17.01145207	0	0	0.546587102	10.93757541	0	0
SP02-RS-M1-D	0.686786253	13.68554473	0	0	0.531045904	10.58211699	0	0
SP02-RS-M2	0.582792576	11.66362727	1.176864828	23.5529986	0.680397826	13.61703454	0	0
SP02-RS-M3	0.533652944	10.66239649	0.24098035	4.81479222	0.928322041	18.54789293	0	0
SP03-RS-M1	0.03885508	0.779700593	0.011983526	0.2404721	0	0	0	0
SP10-RS-M1	0	0	0	0	0	0	0	0
SP10-RS-M1-D	0	0	0	0	0	0	0	0
SP07-RS-M1	0.737561429	14.70710725	0.095441171	1.90311408	0	0	0.874969684	17.44705252

ANEXO 6. Concentración total de elementos para cada una de las fracciones en la extracción secuencial

EXTRACCION SECUENCIAL PARA CATIONES

FRACCIÓN 1

Tabla 24. Concentración total de elementos para la fracción 1 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Pb		Cd		Zn	
SP-01-M1	0.481817005	48.55068568	0.147619827	14.875033	16.37741526	1650.283682
SP-01-M1-D	0.478286117	47.21481902	0.145893034	14.4020764	16.4904615	1627.883663
SP-01-M2	0	0	0.023906375	2.38920403	2.51410888	251.2601319
SP-01-M2-D	0	0	0.044745839	4.52801447	4.543800613	459.8057694
SP-01-M3	0.098545734	9.938053041	0.348598604	35.1551638	34.2921285	3458.262253
SP-01-M3-D	0.086313569	8.741499794	0.388080288	39.3032497	38.06751907	3855.329053
SP-02-M1	0.10654678	10.5470976	0.071628365	7.09051327	11.85086582	1173.12075
SP-02-M1-D	0.104560336	10.15740586	0.127901156	12.4248257	19.70497852	1914.219791
SP-02-M2	0.376147667	37.92575788	0.138241893	13.9384848	21.29426446	2147.03211
SP-02-M2-D	0.370213774	36.08321385	0.144851604	14.1180901	22.64674973	2207.285548
SP-02-M3	0	0	0.17405621	18.0856411	18.43597569	1915.625072
SP-02-M3-D	0	0	0.181383231	18.0552689	18.26919737	1818.554387
SP-07-M1	0	0	0	0	0	0
SP-07-M1-D	0	0	0	0	0	0
SP10-M1	0	0	0	0	0	0
SP-10-M1-D	0	0	0	0	0	0
MCR-020614	0	0	0	0	0	0
BLANCO	-0.00631447		-0.000998278		0.035328431	

Tabla 25. Concentración total de elementos para la fracción 1 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Cu		Fe		Ca	
SP-01-M1	0.154563167	15.57468426	20.82575728	2098.52451	93.46682264	9418.261048
SP-01-M1-D	0.151928323	14.99786016	20.25925551	1999.92651	92.63237733	9144.361039
SP-01-M2	0	0	0	0	54.02876314	5399.636532
SP-01-M2-D	0	0	0	0	104.1790595	10542.30515
SP-01-M3	0.278571635	28.09314593	118.1794322	11918.0549	80.63658346	8131.966868
SP-01-M3-D	0.322936494	32.70574171	129.4225239	13107.4057	101.5921458	10288.85414
SP-02-M1	0	0	0	0	54.93079414	5437.615734
SP-02-M1-D	0	0	0	0	94.95865778	9224.660752
SP-02-M2	0.212411558	21.41677339	56.48197347	5694.89549	95.95873563	9675.210287
SP-02-M2-D	0.230428738	22.45894132	59.95575625	5843.64096	93.63873779	9126.58263
SP-02-M3	0.150922853	15.68192575	56.46460367	5867.06189	99.34049516	10322.16284
SP-02-M3-D	0.156869877	15.615158	59.94279223	5966.8318	97.33329532	9688.761231
SP-07-M1	0	0	0	0	84.61252593	8626.888859
SP-07-M1-D	0	0	0	0	90.28401253	8928.403138
SP10-M1	0	0	0	0	3.519596267	361.2806679
SP-10-M1-D	0	0	0	0	1.820815638	178.581369
MCR-020614	0	0	0	0	0.736969608	71.13606258
BLANCO	-0.00073604		-0.018728266		0.057876198	

FRACCIÓN 2

Tabla 26. Concentración total de elementos para la fracción 2 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Pb		Cd		Zn	
SP-01-M1	16.18819047	1631.21629	0	0	1.297744291	130.768268
SP-01-M1-D	15.94717388	1574.25211	0	0	0.964446575	95.20696695
SP-01-M2	0.735357045	73.4916095	0	0	0.709513622	70.90881695
SP-01-M2-D	0.993924265	100.5792618	0	0	0.815199428	82.4933645
SP-01-M3	1.260734227	127.1414105	0.139989343	14.1061409	1.711259214	172.5755561
SP-01-M3-D	1.192476567	120.7693505	0.145398862	14.3532934	1.891590759	191.5728943
SP-02-M1	2.927465255	289.7906608	0	0	3.255517278	322.2646286
SP-02-M1-D	3.098179032	300.9694027	0	0	3.56458882	346.2783
SP-02-M2	5.205853174	524.8894106	0	0	1.302945782	131.3718272
SP-02-M2-D	4.682046221	456.3397876	0	0	1.080196298	105.2822902
SP-02-M3	2.218037158	230.4693638	0	0	0.874964269	90.91482427
SP-02-M3-D	2.308845259	229.8273202	0	0	0.682752205	67.96259261
SP-07-M1	0	0	0	0	0	0
SP-07-M1-D	0	0	0	0	0	0
SP10-M1	0	0	0	0	0	0
SP-10-M1-D	0	0	0	0	0	0
MCR-020614	0	0	0	0	0	0
BLANCO	-0.007253027		-0.00070165		-0.003295689	

Tabla 27. Concentración total de elementos para la fracción 2 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/L)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Cu		Fe		Ca	
SP-01-M1	0	0	0.95312721	96.0426455	314.836234	31724.73139
SP-01-M1-D	0	0	0.6401365	63.1921524	308.774845	30481.22852
SP-01-M2	0	0	0.10235215	10.229078	287.900005	28772.73682
SP-01-M2-D	0	0	0.26295793	26.6097883	340.840733	34491.06794
SP-01-M3	0	0	4.05864401	409.302542	348.362735	35131.37709
SP-01-M3-D	0	0	5.24897778	531.595887	349.568236	35402.90009
SP-02-M1	0	0	0	0	351.836259	34828.37646
SP-02-M1-D	0	0	0	0	364.005491	35360.93754
SP-02-M2	0	0	2.2147264	223.30373	350.008018	35290.18133
SP-02-M2-D	0	0	1.6544028	161.247836	354.206708	34523.07097
SP-02-M3	0	0	2.58406524	268.502206	349.942908	36361.48252
SP-02-M3-D	0	0	2.44169774	243.051736	353.170077	35155.29334
SP-07-M1	0	0	0	0	27.8430202	2838.807119
SP-07-M1-D	0	0	0	0	32.1033937	3174.781818
SP10-M1	0	0	0	0	21.2879697	2185.174471
SP-10-M1-D	0	0	0	0	22.559723	2212.605236
MCR-020614	0	0	0	0	3.84267491	370.9145665
BLANCO	-0.00384889		-0.02237713		0.674905	

FRACCIÓN 3

Tabla 28. Concentración total de elementos para la fracción 3 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Pb		Cd		Zn	
SP-01-M1	11.86419019	1195.504856	0	0	0.161485317	16.27220039
SP-01-M1-D	11.27449352	1112.980605	0	0	0.127381349	12.57466427
SP-01-M2	2.593720612	259.2165313	0	0	0.514877241	51.45684995
SP-01-M2-D	4.119599459	416.8791195	0	0	0.820642405	83.04416157
SP-01-M3	0.936727596	94.46627635	0	0	0.289422642	29.18743872
SP-01-M3-D	0.841036345	85.17686294	0	0	0.169114391	17.12724236
SP-02-M1	7.173124744	710.0697629	0	0	2.470780294	244.58328
SP-02-M1-D	6.881525424	668.4986812	0	0	2.759666563	268.0849585
SP-02-M2	5.601653837	564.7967167	0	0	0.222283879	22.41216766
SP-02-M2-D	3.01312499	293.6768996	0	0	0.178813414	17.42820798
SP-02-M3	7.468413891	776.019731	0	0	0.126753097	13.17052128
SP-02-M3-D	7.315419221	728.1922378	0	0	0.10251994	10.2050508
SP-07-M1	12.01999575	1225.529746	0	0	6.110643967	623.0265056
SP-07-M1-D	13.98662678	1383.171161	0	0	8.10199494	801.2257654
SP10-M1	1.944494913	199.5991493	0	0	1.783392327	183.0622384
SP-10-M1-D	2.323191001	227.8531779	0	0	1.30328239	127.82291
MCR-020614	0	0	0	0	0.227823962	21.99072988
BLANCO	-0.004930395		-0.001142804		0.017309188	

Tabla 29. Concentración total de elementos para la fracción 3 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)		ppm (mg/kg)		ppm (mg/L)		ppm (mg/kg)	
	Cu		Fe		Ca			
SP-01-M1	0	0	2.57698769	259.672279	30.6073702	3084.176762		
SP-01-M1-D	0	0	2.61036103	257.686182	19.7342603	1948.100723		
SP-01-M2	0	0	0.72604698	72.5611616	100.723622	10066.32241		
SP-01-M2-D	0	0	0.86242578	87.2723926	170.120991	17215.23888		
SP-01-M3	0	0	7.70967601	777.498589	97.5950709	9842.181413		
SP-01-M3-D	0	0	9.05767565	917.325871	77.2137014	7819.900888		
SP-02-M1	0	0	1.50049347	148.534297	37.0042131	3663.058115		
SP-02-M1-D	0	0	1.6292503	158.271838	45.2730844	4398.007036		
SP-02-M2	0	0	4.7332427	477.237619	98.4312296	9924.503896		
SP-02-M2-D	0	0	5.19159525	506.003435	120.164503	11711.9399		
SP-02-M3	0	0	8.56235656	889.687922	107.200235	11138.84405		
SP-02-M3-D	0	0	9.75078484	970.613661	146.983648	14631.06191		
SP-07-M1	0	0	0	0	642.218375	65479.03498		
SP-07-M1-D	0	0	0	0	678.742803	67122.50823		
SP10-M1	0	0	0	0	665.567546	68319.39501		
SP-10-M1-D	0	0	0	0	783.813037	76874.56228		
MCR-020614	0	0	8.49397661	819.881912	2.34988785	226.8231518		
BLANCO	-0.00088204		0.04197527		0.53802018			

FRACCIÓN 4

Tabla 30. Concentración total de elementos para la fracción 4 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Pb		Cd		Zn	
SP-01-M1	8.419120086	848.3595411	0	0	1.497980487	150.9452325
SP-01-M1-D	7.373296478	727.8673719	0	0	1.582149175	156.1845188
SP-01-M2	9.794532866	978.865967	0	0	2.398165342	239.6727305
SP-01-M2-D	8.935922802	904.2625786	0	0	2.669411701	270.1286886
SP-01-M3	6.270348685	632.3465798	0	0	1.614145095	162.7818772
SP-01-M3-D	6.219377635	629.8741782	0	0	1.703969098	172.5713083
SP-02-M1	10.03729947	993.5952755	0	0	9.59667935	949.9781578
SP-02-M1-D	7.197299891	699.1742657	0	0	8.286409493	804.9746934
SP-02-M2	6.870475232	692.7278919	0	0	1.903687351	191.942665
SP-02-M2-D	6.280238949	612.1090593	0	0	1.638353451	159.6835723
SP-02-M3	5.725097852	594.8771667	0	0	1.030975955	107.1255149
SP-02-M3-D	5.92030982	589.3201095	0	0	1.047391396	104.2595457
SP-07-M1	14.64416097	1493.083297	0	0	44.64404595	4551.799138
SP-07-M1-D	14.76665629	1460.310155	0	0	46.31274152	4579.978394
SP10-M1	31.51667702	3235.134163	0	0	10.84537536	1113.259635
SP-10-M1-D	33.92468206	3327.254027	0	0	10.99578124	1078.440686
MCR-020614	0	0	0	0	0.153986621	14.86357343
BLANCO	-0.000807872		-0.001142221		0.011245832	

Tabla 31. Concentración total de elementos para la fracción 4 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Cu		Fe		Ca	
SP-01-M1	0.13225844	13.32713021	194.672006	19616.2844	7.20634813	726.1535803
SP-01-M1-D	0.14046476	13.86621532	192.355117	18988.6591	6.57542142	649.1037931
SP-01-M2	0.17136716	17.12644006	268.138372	26797.7586	12.0677583	1206.052203
SP-01-M2-D	0.15898543	16.08838578	275.406152	27869.475	12.5332429	1268.290113
SP-01-M3	0.05910297	5.960364224	265.515036	26776.4256	6.93790919	699.6681311
SP-01-M3-D	0.06542027	6.625508754	270.787641	27424.3104	6.63291686	671.7558089
SP-02-M1	0.26917847	26.64605703	186.081094	18420.2231	6.02159952	596.0799366
SP-02-M1-D	0.22562265	21.9178795	150.590212	14628.9306	6.96342041	676.4542847
SP-02-M2	0.14741876	14.86375885	217.075327	21887.0061	9.61506409	969.4559479
SP-02-M2-D	0.12497706	12.18100012	210.785221	20544.3685	12.0816563	1177.549342
SP-02-M3	0.08892163	9.239570814	232.592845	24168.0014	13.6304157	1416.294231
SP-02-M3-D	0.08064155	8.027230136	248.950473	24781.0544	8.00309776	796.6452079
SP-07-M1	0.76822693	78.32656319	12.5203772	1276.54743	113.869896	11609.89965
SP-07-M1-D	0.75878204	75.03778097	12.9256898	1278.25255	118.646205	11733.20857
SP10-M1	0.71622406	73.51920099	7.99756034	820.936188	156.304	16044.34411
SP-10-M1-D	0.75869946	74.41148105	7.86388407	771.271486	198.533444	19471.69911
MCR-020614	0	0	70.8484394	6838.65245	10.7390808	1036.590808
BLANCO	-0.0023895		0.00784395		3.74005889	

FRACCIÓN 5

Tabla 32. Concentración total de elementos para la fracción 5 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Pb		Cd		Zn	
SP-01-M1	11.9798644	1207.160863	0	0	0	0
SP-01-M1-D	9.540457388	941.8023088	0	0	0	0
SP-01-M2	7.842393781	783.7691166	0	0	0	0
SP-01-M2-D	7.060609455	714.4919505	0	0	0	0
SP-01-M3	0.184232083	18.57927421	0	0	0	0
SP-01-M3-D	0.139693043	14.1475636	0	0	0	0
SP-02-M1	0.233131961	23.07780247	0	0	0	0
SP-02-M1-D	0.154164907	14.97619072	0	0	0	0
SP-02-M2	2.96574167	299.0261816	0	0	0	0
SP-02-M2-D	5.555779917	541.4990172	0	0	0	0
SP-02-M3	0.612651115	63.65867782	0	0	0	0
SP-02-M3-D	0.483939937	48.17240067	0	0	0	0
SP-07-M1	3.837337446	391.2456613	0	0	9.111506943	928.9872495
SP-07-M1-D	4.244105186	419.7097692	0	0	14.3133042	1415.477077
SP10-M1	6.828703553	700.9549942	0	0	0	0
SP-10-M1-D	7.612233808	746.5902127	0	0	0	0
MCR-020614	0	0	0	0	0	0
BLANCO	0.00449379		-0.000276667		-9.594662375	

Tabla 33. Concentración total de elementos para la fracción 5 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Cu		Fe		Ca	
SP-01-M1	0	0	43.7447665	4407.97727	3.35896563	338.4689266
SP-01-M1-D	0	0	25.3610304	2503.5568	6.75407308	666.739692
SP-01-M2	0.10310912	10.30472961	25.4421171	2542.6861	5.56584107	556.2503572
SP-01-M2-D	0.13542195	13.70390133	42.9500371	4346.28993	4.58500754	463.9756671
SP-01-M3	0	0	61.0641453	6158.14293	5.16355476	520.7296045
SP-01-M3-D	0	0	70.6744159	7157.6277	5.25613343	532.3205827
SP-02-M1	0.24640213	24.39142048	30.2879508	2998.21331	6.17663792	611.4272341
SP-02-M1-D	0.25235607	24.51486944	28.8220922	2799.89238	5.603929	544.3878956
SP-02-M2	0.08641967	8.71341709	29.421773	2966.50263	5.38457592	542.9094495
SP-02-M2-D	0.09321219	9.085008729	49.8855486	4862.13924	5.46214184	532.3724988
SP-02-M3	0	0	111.950693	11632.4494	4.33284881	450.2128853
SP-02-M3-D	0	0	89.9835372	8957.15082	4.49409695	447.3518765
SP-07-M1	0.29658341	30.23892835	4.2696611	435.324337	13.3760895	1363.79379
SP-07-M1-D	0.33838551	33.46375645	3.48687812	344.825764	15.9877534	1581.067383
SP10-M1	0.18475054	18.96433331	0.717189	73.6182512	24.7618765	2541.765189
SP-10-M1-D	0.17171506	16.84141408	1.14052164	111.859713	25.3081741	2482.166934
MCR-020614	0	0	17.3275632	1672.54471	12.4828304	1204.906407
BLANCO	0.00139155		-0.00027694		1.6753126	

FRACCIÓN 6

Tabla 34. Concentración total de elementos para la fracción 6 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Pb		Cd		Zn	
SP-01-M1	78.89232396	7949.649734	0	0	3.312518899	333.7886839
SP-01-M2	71.35901246	7131.622272	0	0	4.333535423	433.0936861
SP-01-M3	68.30707347	6888.571346	0	0	4.12639029	416.1345593
SP-02-M1	43.32624793	4288.878235	0	0	5.799383891	574.0827451
SP-02-M2	114.0954536	11503.87715	0	0	4.058409894	409.1963999
SP-02-M3	63.51284305	6599.422595	0	0	3.437346855	357.1640539
SP-07-M1	32.81965546	3346.212832	0	0	9.590521999	977.8264681
SP10-M1	34.74242184	3566.251472	0	0	12.53565084	1286.763584
BLANCO 6	0.00177613		-0.000127043		-0.001940263	

Tabla 35. Concentración total de elementos para la fracción 6 de la extracción secuencial para cationes

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	Cu		Fe		Ca	
SP-01-M1	0.63546123	64.03277245	241.964002	24381.70116	0.56200834	56.63123135
SP-01-M2	0.42012679	41.98748647	379.380652	37915.31601	1.7322879	173.1249152
SP-01-M3	0.567687	57.24959661	374.619312	37779.27717	2.07212018	208.9673437
SP-02-M1	0.57563987	56.98276264	371.47993	36772.90929	0.78018637	77.23088243
SP-02-M2	0.49536919	49.9464797	381.097565	38424.84021	1.37455969	138.5924272
SP-02-M3	0.3209891	33.35298184	428.285735	44501.84278	2.22861437	231.5684094
SP-07-M1	0.49641968	50.61375207	281.56502	28707.68962	4.47284009	456.0399763
SP10-M1	0.50014089	51.33862525	446.9944	45883.22723	3.45677013	354.8316702
BLANCO 6	-0.00061251		0.01524394		-0.00285573	

EXTRACCIÓN SECUENCIAL PARA ANIONES

FRACCIÓN 1

Tabla 36. Concentración total de elementos para la fracción 1 de la extracción secuencial para aniones

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	As	
SP-01-M1	-0.175326335	-10.18155258
SP-01-M1-D	-0.024479243	-1.385094876
SP-01-M2	-0.354359389	-20.88562216
SP-01-M2-D	-0.34287622	-21.12173838
SP-01-M3	2.524342768	157.4434159
SP-01-M3-D	2.386182943	138.5972668
SP-02-M1	-0.346257395	-20.20171499
SP-02-M1-D	-0.386771792	-22.95835728
SP-02-M2	1.564127597	90.23813062
SP-02-M2-D	1.677965732	97.51834938
SP-02-M3	0.153357827	9.152048566
SP-02-M3-D	0.158957035	9.712242479
SP-07-M1	-0.371062181	-23.08557745
SP-07-M1-D	-0.332436975	-19.49014899
SP10-M1	-0.37993554	-22.61072445
SP-10-M1-D	-0.35905705	-21.22504727
BLANCO	-0.373150031	

FRACCIÓN 2

Tabla 37. Concentración total de elementos para la fracción 2 de la extracción secuencial para aniones

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/L)
	As	
SP-01-M1	-0.383067313	-22.24548858
SP-01-M1-D	-0.376228596	-21.28792509
SP-01-M2	-0.324406401	-19.12022012
SP-01-M2-D	-0.348716928	-21.48153558
SP-01-M3	-0.41046697	-25.60085053
SP-01-M3-D	-0.384513282	-22.33378208
SP-02-M1	-0.365993774	-21.35319568
SP-02-M1-D	-0.340045201	-20.18471711
SP-02-M2	-0.387249708	-22.34132933
SP-02-M2-D	-0.317712782	-18.46451658
SP-02-M3	-0.370409327	-22.10519159
SP-02-M3-D	-0.397558314	-24.29073199
SP-07-M1	-0.355925276	-22.14383717
SP-07-M1-D	-0.291201956	-17.07261811
SP10-M1	-0.312602409	-18.60359505
SP-10-M1-D	-0.394028521	-23.29232635
BLANCO	0	

FRACCIÓN 3

Tabla 38. Concentración total de elementos para la fracción 3 de la extracción secuencial para aniones

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	As	
SP-01-M1	0.07521555	0
SP-01-M1-D	0.05277117	0
SP-01-M2	-0.35957901	-21.193262
SP-01-M2-D	-0.33713463	-20.7680473
SP-01-M3	-0.29955335	-18.6831613
SP-01-M3-D	-0.24370339	-14.1550856
SP-02-M1	-0.30842671	-17.9945572
SP-02-M1-D	-0.26040618	-15.4574307
SP-02-M2	-0.20090249	-11.590528
SP-02-M2-D	-0.24318143	-14.1329773
SP-02-M3	-0.31364633	-18.7177044
SP-02-M3-D	-0.35070565	-21.428044
SP-07-M1	0.00274708	0.170908964
SP-07-M1-D	-0.06313937	-3.70174165
SP10-M1	-0.19052426	-11.3384802
SP-10-M1-D	-0.20539373	-12.1415011
BLANCO	-0.37471592	

FRACCIÓN 4

Tabla 39. Concentración total de elementos para la fracción 4 de la extracción secuencial para aniones

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	As	
SP-01-M1	0.28632756	27.71269465
SP-01-M1-D	0.27614408	26.04150175
SP-01-M2	0.41490568	40.75694267
SP-01-M2-D	0.38885544	39.92355603
SP-01-M3	0.54969209	57.14054952
SP-01-M3-D	0.52746846	51.06180648
SP-02-M1	0.49347332	47.98457023
SP-02-M1-D	0.34746385	34.37513311
SP-02-M2	0.61543081	59.17603932
SP-02-M2-D	0.39298018	38.06472094
SP-02-M3	0.42027436	41.801707
SP-02-M3-D	0.33858737	34.47936576
SP-07-M1	0.17942735	18.6050754
SP-07-M1-D	0.15190297	14.84297137
SP10-M1	0.21403503	21.22942152
SP-10-M1-D	0.21610657	21.29128759
BLANCO	-0.37471592	

FRACCIÓN 4 (REPETICIÓN)

Tabla 40. Concentración total de elementos para la fracción 4 de la extracción secuencial para aniones

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	As	
SP-01-M1	2.12467489	123.38414
SP-01-M1-D	2.26589862	128.210031
SP-01-M2	2.30574847	135.898731
SP-01-M2-D	2.23245914	137.52315
SP-01-M3	4.47621547	279.181838
SP-01-M3-D	4.33262086	251.652712
SP-02-M1	3.29218226	192.075978
SP-02-M1-D	3.67396963	218.082883
SP-02-M2	5.2206841	301.193314
SP-02-M2-D	5.24409455	304.77109
SP-02-M3	2.37371061	141.657685
SP-02-M3-D	2.38904991	145.970463
SP-07-M1	0.88792909	55.242374
SP-07-M1-D	0.90944148	53.3188279
SP10-M1	0.86002609	51.1818739
SP-10-M1-D	0.84286063	49.8242738
BLANCO	0.0969	

FRACCIÓN 5

Tabla 41. Concentración total de elementos para la fracción 5 de la extracción secuencial para aniones

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	As	
SP-01-M1	0.5800	56.13527675
SP-01-M1-D	0.9931	93.6494765
SP-01-M2	2.0267	199.0831207
SP-01-M2-D	2.2765	233.7267384
SP-01-M3	1.7268	179.4968427
SP-01-M3-D	2.0469	198.1479342
SP-02-M1	1.5801	153.6426063
SP-02-M1-D	2.7587	272.92579
SP-02-M2	2.2988	221.0338339
SP-02-M2-D	2.6454	256.2379062
SP-02-M3	1.0399	103.4289245
SP-02-M3-D	1.1509	117.1982679
SP-07-M1	0.3702	38.38974833
SP-07-M1-D	0.3222	31.48527976
SP10-M1	0.5984	59.35354076
SP-10-M1-D	0.4709	46.39316374
BLANCO	0.0478	

FRACCIÓN 6

Tabla 42. Concentración total de elementos para la fracción 6 de la extracción secuencial para aniones

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	As	
SP-01-M1	0.004228681	0.245567981
SP-01-M1-D	-0.059972677	-3.393399294
SP-01-M2	0.047029586	2.771881275
SP-01-M2-D	0.168646791	10.38891938
SP-01-M3	-0.067280148	-4.196267055
SP-01-M3-D	-0.039616149	-2.301034785
SP-02-M1	0.346113958	20.19334646
SP-02-M1-D	0.376387769	22.34197285
SP-02-M2	0.088264604	5.092188685
SP-02-M2-D	-0.063626413	-3.697776791
SP-02-M3	0.693740821	41.40088448
SP-02-M3-D	0.344548072	21.051817
SP-07-M1	1.955845556	121.6826352
SP-07-M1-D	2.140098233	125.4698983
SP10-M1	0.156641659	9.322058684
SP-10-M1-D	-0.020825508	-1.231064492
BLANCO	-0.360622936	

FRACCIÓN 7

Tabla 43. Concentración total de elementos para la fracción 7 de la extracción secuencial para aniones

Id Muestra	ppm (mg/L)	ppm (mg/kg)
	As	
SP-01-M1	2.42665551	234.8679356
SP-01-M2	11.0849654	1088.896406
SP-01-M3	6.65768156	692.0666901
SP-02-M1	4.46022046	433.7048289
SP-02-M2	6.91448699	664.8545182
SP-02-M3	6.20148655	616.8178384
SP-07-M1	9.2915031	963.4490982
SP10-M1	11.809449	1171.339915
BLANCO	0	

ANEXO 7. FICHAS DE CAMPO

DATOS GENERALES			
1. Fecha	<u>07/10/2013</u>	2. Hora	<u>08:35</u>
4. No. Inventario	<u>SP-01</u>		3. Fotografías (No de Id) al
6. Tipo de material	<input checked="" type="checkbox"/> Rs	<input type="checkbox"/> Es	<input type="checkbox"/> Te
	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Otro	5. Municipio
			<u>Cerro de San Pedro</u>
			7. Localidad
	<input checked="" type="checkbox"/> SP	<input type="checkbox"/> CC	<input type="checkbox"/> Sa
			Otro
8. Coordenadas			
8.1 UTM	X	<u>0.0313675</u>	Y <u>2457538</u>
8.2 Geográficas	N	<u>22°12.793'</u>	W <u>100° 48.456'</u>
8.3 Altitud (msnm) cima	<u>2000</u>		

DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
9.- Tenencia de la tierra	<input type="checkbox"/> Priv. <input type="checkbox"/> Eji <input checked="" type="checkbox"/> Gob
Otra o especifique: _____	
10. Tipo de Vegetación	<u>Nopal, mezquite, pirul</u>
11. Relieve	<input type="checkbox"/> Mo <input type="checkbox"/> Sie <input type="checkbox"/> Ce
	<input type="checkbox"/> Dep <input type="checkbox"/> Va <input checked="" type="checkbox"/> Cañ
especifique: _____	
12. Aprovechamientos hidricos	<input type="checkbox"/> Rio <input type="checkbox"/> Bordo <input type="checkbox"/> Manantial
	<input checked="" type="checkbox"/> Arroyo <input type="checkbox"/> Presa <input type="checkbox"/> Pozo
13. Uso de suelo	<input type="checkbox"/> Agricola <input type="checkbox"/> Residencial <input checked="" type="checkbox"/> Industrial
14. Elementos de erosión	<input checked="" type="checkbox"/> Carcavas <input type="checkbox"/> Hudimientos <input type="checkbox"/> Agrietamiento <input type="checkbox"/> Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	
15. Tipo de alteración	<input checked="" type="checkbox"/> Ox <input type="checkbox"/> Clo <input type="checkbox"/> Arg <input type="checkbox"/> Ser <input type="checkbox"/> Hem
Otra: _____	
16. Color (depósito)	<u>Grísaceo, amarillo, rojizo</u>
	<input checked="" type="checkbox"/> Primarios
17. Reacción al contacto con:	HCl (al 10%) <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6
	H2O2 (al 5%) <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6
18. Principales minerales presentes	<input checked="" type="checkbox"/> Secundarios <u>Predominante</u>
19. Presencia de mat. parental	<input type="checkbox"/> Sedimentaria <input type="checkbox"/> Ignea <input type="checkbox"/> Metamórfica
	Especifique <u>Contacto con calizas en la parte trasera</u>
20. Humedad	<input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No
21. Dimensiones (m):	<u>500</u> Largo <u>21</u> Ancho <u>15</u> Altura <u>157,500</u> Volumen
22. Estructura	Forma <input type="checkbox"/> Laminar <input type="checkbox"/> Cúbica <input type="checkbox"/> Prismática <input type="checkbox"/> Columnar <input checked="" type="checkbox"/> Bloq. Angulares <input checked="" type="checkbox"/> Bloq. Subangulares <input type="checkbox"/> Granular <input type="checkbox"/> Migajosa <input type="checkbox"/> Masiva
	Tamaño <input type="checkbox"/> Bloques (2048 a 256) <input type="checkbox"/> Cantos (255 a 64) <input type="checkbox"/> Gravias (63.9 a 2) <input type="checkbox"/> Arenas (1.9 a 0.062) <input type="checkbox"/> Limos (0.061 a 0.004) <input type="checkbox"/> Arcillas (0.003 a 0.0024)
23. Observaciones:	<u>Material heterogeneo, con tonalidades variables, que va de oscuro, amarillo y rojizo. Hay formación de DAR . El ancho de el monton de residuos es variable Residuos del Patio Victoria expuestos.</u>

DATOS GENERALES										
1. Fecha	<u>07/10/2013</u>	2. Hora	<u>09:40</u>	3. Fotografías (No de Id)	al					
4. No. Inventario	<u>SP-02</u>	5. Municipio	<u>Cerro de San Pedro</u>							
6. Tipo de material	<input checked="" type="checkbox"/> Rs	<input type="checkbox"/> Es	<input type="checkbox"/> Te	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Otro					
			7. Localidad	<input checked="" type="checkbox"/> SP	<input type="checkbox"/> CC <input type="checkbox"/> Sa <input type="checkbox"/> Otro					
8. Coordenadas										
8.1 UTM	X	<u>313949</u>	Y	<u>2457568</u>						
8.2 Geográficas	N	<u>22°12.811'</u>	W	<u>100° 48.298'</u>						
8.3 Altitud (msnm) cima	<u>2004</u>									
DESCRIPCIÓN DEL SITIO										
9.- Tenencia de la tierra	<input type="checkbox"/> Priv.	<input type="checkbox"/> Eji	<input checked="" type="checkbox"/> Gob	Otra o especifique: _____						
10. Tipo de Vegetación	<u>Nopal, mezquite, pirul</u>			11. Relieve	<input type="checkbox"/> Mo <input type="checkbox"/> Sie <input type="checkbox"/> Ce especifique: _____					
12. Aprovechamientos hidricos	<input type="checkbox"/> Rio	<input type="checkbox"/> Bordo	<input type="checkbox"/> Manantial	<input type="checkbox"/> Dep	<input type="checkbox"/> Va <input checked="" type="checkbox"/> Can					
	<input checked="" type="checkbox"/> Arroyo	<input type="checkbox"/> Presa	<input type="checkbox"/> Pozo	13. Uso de suelo	<input type="checkbox"/> Agricola <input type="checkbox"/> Residencial <input checked="" type="checkbox"/> Industrial					
14. Elementos de erosión	<input checked="" type="checkbox"/> Carcavas	<input type="checkbox"/> Hudimientos	<input type="checkbox"/> Agrietamiento	<input type="checkbox"/> Drenaje ácido de roca						
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL										
15. Tipo de alteración	<input checked="" type="checkbox"/> Ox	<input type="checkbox"/> Clo	<input type="checkbox"/> Arg	<input type="checkbox"/> Ser	<input type="checkbox"/> Hem Otra: _____					
16. Color (depósito)	<u>amarillo, rojizo</u>									
18. Principales minerales presentes	<input checked="" type="checkbox"/> Primarios	_____								
	<input checked="" type="checkbox"/> Secundarios	<u>Predominante</u>								
20. Humedad	<input checked="" type="checkbox"/> Si	<input type="checkbox"/> No								
17. Reacción al contacto con :	HCl (al 10%)	<input checked="" type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6					
	H2O2 (al 5%)	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6					
19. Presencia de mat. parental	<input checked="" type="checkbox"/> Sedimentaria	<input type="checkbox"/> Ignea	<input type="checkbox"/> Metamórfica	Especifique <u>Calizas</u>						
21. Dimensiones (m):	450 Largo	10 Ancho	10 Altura	45000 Volumen						
22. Estructura	Forma	<input type="checkbox"/> Laminar	<input type="checkbox"/> Cúbica	<input type="checkbox"/> Prismatica	<input type="checkbox"/> Columnar	<input checked="" type="checkbox"/> Bloq. Angulares	<input checked="" type="checkbox"/> Bloq. Subangulares	<input type="checkbox"/> Granular	<input type="checkbox"/> Migajosa	<input type="checkbox"/> Masiva
	Tamaño	<input type="checkbox"/> Bloques (2048 a 256)	<input type="checkbox"/> Cantos (255 a 64)	<input type="checkbox"/> Gravias (63.9 a 2)	<input checked="" type="checkbox"/> Arenas (1.9 a 0.062)	<input type="checkbox"/> Limos (0.061 a 0.004)	<input type="checkbox"/> Arcillas (0.003 a 0.0024)			
23. Observaciones:	<u>Estos residuos estan semiconfinados con una capa de caliza.</u>									
	<u>Se encuentran cerca de viviendas.</u>									

DATOS GENERALES

1. Fecha 07/10/2013 2. Hora 10:30 3. Fotografías (No de Id) | 5908 al 5817 |

4. No. Inventario SP-03 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro

7. Localidad SP CC Sa Otro

8. Coordenadas

8.1 UTM X 313726 Y 2456889

8.2 Geográficas N 22°12.442' W 100° 48.421'

8.3 Altitud (msnm) cima 2004

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: _____

10. Tipo de Vegetación Nopal, yuca, matorral

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: Sobre pendiente abrupta

12. Aprovechamientos Rio Bordo Manantial

13. Uso de suelo Dep Va Caf Agrícola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

hidricos Arroyo Presa Pozo

Margen izq. Aguas abajo _____

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa ninguna alteración.

16. Color (depósito) café

17. Reacción al HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios Secundarios

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 600 Largo 30 Ancho 5 Altura 90,000 Volumen

22. Estructura { Forma → Laminar Cúbica Prismática Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño → Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: Es un material arcilloso, con tamaño de partículas finas pero tambien hay gravillas.

DATOS GENERALES

1. Fecha 07/10/2013 2. Hora 11:30 3. Fotografías (No de Id) | 5908 al 5817 |

4. No. Inventario SP-04 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 313907 Y 2456812

8.2 Geográficas N 22°12.442' W 100° 48.421'

8.3 Altitud (msnm) cima 2070

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: _____

10. Tipo de Vegetación Nopal, yuca, matorral

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: Sobre pendiente abrupta

12. Aprovechamientos hidricos Rio Bordo Manantial Arroyo Presa Pozo Margen izq. Aguas abajo

13. Uso de suelo Agrícola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox. Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa ninguna alteración.

16. Color (depósito) café

17. Reacción al contacto con : HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6
H2O2 (al 5%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios Calcita Secundarios _____

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica
Especifique calizas

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 70 Largo 12 Ancho 4 Altura Volumen

22. Estructura { Forma → Laminar Cúbica Prismática Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva
Tamaño → Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: Esta cubierto por calizas y en la parte de abajo tiene un material muy fino color café. Se tomo muestra.
El tamaño de la partículas se pueden considerar muy finas

DATOS GENERALES

1. Fecha 07/10/2013 2. Hora 00:45 3. Fotografías (No de Id) _____ al _____

4. No. Inventario SP-05 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 313917 Y 2456568

8.2 Geográficas N 22° 12.274' W 100° 48.309'

8.3 Altitud (msnm) cima 2130

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: _____

10. Tipo de Vegetación Lechuguilla, nopal Mo Sie Ce especifique: _____

11. Relieve Dep Va Cañ Sobre pendiente abrupta

12. Aprovechamientos hidricos Rio Bordo Manantial Arroyo Presa Pozo

13. Uso de suelo Agricola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa ninguna alteración.

16. Color (depósito) café

17. Reacción al contacto con : HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6
H2O2 (al 5%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios Calcita Secundarios _____

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica
Especifique calizas

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 41 Largo 22 Ancho 9 Altura Volumen

22. Estructura { Forma → Laminar Cúbica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva
Tamaño → Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: Se encuentran varios montones d terreros con material grueso en la superficie y material muy fino de color café en la parte de abajo
Hacia el sur hay cartas mineras conformadas por terreros. Se nombraron al grupo de terreros como A, B y C. Las medidas de largo, ancho y alto son las siguientes.
A: 15m, 7m, 3m. B: 22, 10, 4. C: 4,5,2.

DATOS GENERALES

1. Fecha 07/10/2013 2. Hora 01:00 3. Fotografías (No de Id) | | al | |

4. No. Inventario SP-06 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 313781 Y 2456590

8.2 Geográficas N 22° 12.279' W 100° 48.389'

8.3 Altitud (msnm) cima 2070

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: _____

10. Tipo de Vegetación Lechuguilla, nopal

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: sobre permanente abrupta

Dep Va Cañ _____

12. Aprovechamientos Rio Bordo Mananial

13. Uso de suelo Agrícola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

hidricos Arroyo Presa Pozo

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa ninguna alteración.

16. Color (depósito) café

17. Reacción al HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6

contacto con : H.O. (al 5%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios Calcita, arcilla, silice

Secundarios _____

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica

Especifique calizas, reolita

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 35 Largo 9 Ancho 2 Altura Volumen

22. Estructura { Forma Laminar Cúbica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: Se posiciona en el parteaguas.

DATOS GENERALES											
1. Fecha	<u>07/10/2013</u>	2. Hora	<u>01:00</u>	3. Fotografías (No de Id)		al					
4. No. Inventario	<u>SP-07</u>	5. Municipio	<u>Cerro de San Pedro</u>								
6. Tipo de material	<input checked="" type="checkbox"/> Rs	<input type="checkbox"/> Es	<input type="checkbox"/> Te	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Otro	7. Localidad	<input checked="" type="checkbox"/> SP	<input type="checkbox"/> CC	<input type="checkbox"/> Sa	<input type="checkbox"/> Otro	
8. Coordenadas											
8.1 UTM	X				Y	<u>2457568</u>					
8.2 Geográficas	N				W	<u>100° 48.298'</u>					
8.3 Altitud (msnm) cima											
DESCRIPCIÓN DEL SITIO											
9.- Tenencia de la tierra	<input checked="" type="checkbox"/> Priv.	<input type="checkbox"/> Eji	<input type="checkbox"/> Gob	Otra o especifique:	<u>Propiedad de Minera San Xavier</u>						
10. Tipo de Vegetación	<u>Lechuguilla, nopal, pirul, mezquite</u>			11. Relieve	<input type="checkbox"/> Mo	<input type="checkbox"/> Sie	<input type="checkbox"/> Ce	especifique:			
12. Aprovechamientos hidricos	<input type="checkbox"/> Rio	<input type="checkbox"/> Bordo	<input type="checkbox"/> Manantial	<input checked="" type="checkbox"/> Arroyo	<input type="checkbox"/> Presa	<input type="checkbox"/> Pozo	<input type="checkbox"/> Dep	<input type="checkbox"/> Va	<input checked="" type="checkbox"/> Can		
13. Uso de suelo	<input type="checkbox"/> Agricola	<input type="checkbox"/> Residencial	<input checked="" type="checkbox"/> Industrial								
14. Elementos de erosión	<input type="checkbox"/> Carcavas	<input type="checkbox"/> Hudimientos	<input checked="" type="checkbox"/> Arrastre fluvial	<input type="checkbox"/> Drenaje ácido de roca							
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL											
15. Tipo de alteración	<input type="checkbox"/> Ox	<input type="checkbox"/> Clo	<input type="checkbox"/> Arg	<input type="checkbox"/> Ser	<input type="checkbox"/> Hem	Otra:	<u>No se observa ninguna alteración.</u>				
16. Color (depósito)	<u>café</u>										
17. Reacción al contacto con :	HCl (al 10%)	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input checked="" type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6				
	H2O2 (al 5%)	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6				
18. Principales minerales presentes	<input type="checkbox"/> Primarios	<u>Carbonatos</u>									
	<input type="checkbox"/> Secundarios										
19. Presencia de mat. parental	<input type="checkbox"/> Sedimentaria	<input type="checkbox"/> Ignea	<input type="checkbox"/> Metamórfica	Especifique calizas							
20. Humedad	<input type="checkbox"/> Si	<input checked="" type="checkbox"/> No									
21. Dimensiones (m):	<input type="checkbox"/> 6	Largo	<input type="checkbox"/> 60	Ancho	<input type="checkbox"/> 4	Altura	<input type="checkbox"/>	Volumen			
22. Estructura	Forma	<input checked="" type="checkbox"/>	Laminar	<input type="checkbox"/> Cubica	<input type="checkbox"/> Prismatica	<input type="checkbox"/> Columnar	<input checked="" type="checkbox"/> Bloq. Angulares	<input checked="" type="checkbox"/> Bloq. Subangulares	<input type="checkbox"/> Granular	<input type="checkbox"/> Migajosa	<input type="checkbox"/> Masiva
	Tamaño	<input type="checkbox"/> Bloques (2048 a 256)	<input type="checkbox"/> Cantos (255 a 64)	<input checked="" type="checkbox"/> Gravas (63,9 a 2)	<input checked="" type="checkbox"/> Arenas (1,9 a 0,062)	<input type="checkbox"/> Líamos (0,061 a 0,004)	<input type="checkbox"/> Arcillas (0,003 a 0,0024)				
23. Observaciones:	<u>Se encuentra cercado. Residuos frente al hospital. Colinda con viviendas.</u>										

DATOS GENERALES

1. Fecha 07/10/2013 2. Hora 03:30 3. Fotografías (No de Id) _____ al _____

4. No. Inventario SP-08 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro _____

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 315878 Y 2457204

8.2 Geográficas N 22°12.626' W 100° 47.1741'

8.3 Altitud (msnm) cima 2182

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: _____

10. Tipo de Vegetación Lechuguilla, nopal, pirul, mezquite

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: Sobre pendiente abrupta

12. Aprovechamientos hidricos Rio Bordo Mananial Arroyo Presa Pozo

13. Uso de suelo Agricola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Arrastre fluvial Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa ninguna alteración.

16. Color (depósito) _____

17. Reacción al HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios Secundarios

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 600 Largo 30 Ancho 5 Altura 90,000 Volumen

22. Estructura { Forma → Laminar Cubica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño → Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63,9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: _____

DATOS GENERALES

1. Fecha 09/10/2013 2. Hora 11:48 3. Fotografías (No de Id) _____ al _____

4. No. Inventario SP-09 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 314561 Y 2457834

8.2 Geográficas N 22°12.959' W 100°47.943'

8.3 Altitud (msnm) cima 2025

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: Pueblo de San Pedro

10. Tipo de Vegetación Mezquite, palma, sabila. Mo Sie Ce especifique: _____

11. Relieve Dep Va Cañ _____

12. Aprovechamientos hidricos Rio Bordo Manantial Arroyo Presa Pozo

13. Uso de suelo Agricola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Arrastre fluvial Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa ninguna alteración.

16. Color (depósito) Tonos oscuros Primarios NA Secundarios NA

17. Reacción al contacto con: HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6
H2O2 (al 5%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Sedimentaria Ignea Metamórfica

19. Presencia de mat. parental Especifique _____

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 12 Largo 23 Ancho 2 Altura Volumen

22. Estructura { Forma → Laminar Cubica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva
Tamaño → Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63,9 a 2) Arenas (1,9 a 0,062) Limos (0,061 a 0,004) Arcillas (0,003 a 0,0024)

23. Observaciones: En tamaño y forma, encontramos fragmentos irregulares, de tamaño de grava a granzon.
Se observan metales en las superficie de las escorias.

DATOS GENERALES

1. Fecha 30/10/2013 2. Hora 10:29 3. Fotografías (No de Id) | | al | |

4. No. Inventario SP-10 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 313370 Y 2457207

8.2 Geográficas N 22°12.611' W 100° 48.631'

8.3 Altitud (msnm) cima 2049

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: Sitio localizado a un costi

10. Tipo de Vegetación Huizache, garambullo, lechuguilla, nopal

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: Cima del cerro pequeño

12. Aprovechamientos Rio Bordo Manantial
hidricos Arroyo Presa Pozo

13. Uso de suelo Agricola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: iserva oxidacion en pigmentos de materia exp

16. Color (depósito) Rojizo con manchones grisaceos

17. Reacción al HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6
contacto con : H2O2 (al 5%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios Sulfuros, oxidos
 Secundarios _____

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica
Especifique calizas de la form. Cuesta del cura

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 60 Largo 45 Ancho 5 Altura 13,500 Volumen

Forma Laminar Cubica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63,9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: Mojonera indica que es "Porvenir III" Se observa estabilidad en el proceso de generación de DAR.
Se observa actividad de operación selectiva en la extracción del material. Se encuentra a 35 m aprox. Del contacto con las rocas igneas.

DATOS GENERALES

1. Fecha 30/10/2013 2. Hora 10:59 3. Fotografías (No de Id) | | al | |

4. No. Inventario SP-11 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro

7. Localidad SP CC Sa Otro

8. Coordenadas

8.1 UTM X 313150 Y 2457246

8.2 Geográficas N 22°12.631' W 100° 48.760'

8.3 Altitud (msnm) cima 2076

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: Se localiza al costado "E" del polígono de

10. Tipo de Vegetación Huizache, garrambullo, lechuguilla, nopal, pirul, palma

11. Relieve Mo Sie Ce Dep Va Cañ especifique: Cima del Cerro pequeño

12. Aprovechamientos hidricos Rio Bordo Manantial

Arroyo Presa Pozo Flanqueado por 2 afluentes de arroyo San Pedro

13. Uso de suelo Agrícola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa

16. Color (depósito) Negro/oscuro

Primarios

17. Reacción al HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6

contacto con : H2O2 (al 5%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Secundarios

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica

Especifique Esta sobre rocas igneas

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 95 Largo 32 Ancho 6 Altura 18,240 Volumen

22. Estructura { Forma Laminar Cúbica Prismática Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: Actualmente agostadero Se observaron dispersión de escorias a unos 30 m a partir del deposito por procesos fluviales

Hay construcciones alrededor del deposito abandonadas

DATOS GENERALES

1. Fecha 30/10/2013 2. Hora 11:23 3. Fotografías (No de Id) _____ al _____

4. No. Inventario SP-12 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro _____

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 313096 Y 2456961

8.2 Geográficas N 22°12.476' W 100° 48.790'

8.3 Altitud (msnm) cima 2049

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: Agostadero a un costado

10. Tipo de Vegetación Huizache, garrambullo, lechuguilla, nopal

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: Cima del cerro parteaguas

12. Aprovechamientos Rio Bordo Manantial

13. Uso de suelo Dep Va Cañ _____

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

15. Hidricos Arroyo Presa Pozo

16. Margenes de arroyo _____

17. Uso de suelo Agrícola Residencial Industrial

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: Se observan arcillas

16. Color (depósito) grisáceo, color crema

17. Reacción al contacto con : HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6

H2O2 (al 5%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios calcita

19. Presencia de mat. parental Secundarios _____

20. Humedad Si No

21. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica

22. Estructura { Forma Laminar Cúbica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Dimensiones (m): 13 Largo 10 Ancho 2 Altura 260 Volumen

23. Observaciones: No se observa efecto erosivo, ni alteraciones

Puede ser susceptible a dispersión fluvial

DATOS GENERALES

1. Fecha 30/10/2013 2. Hora 10:45 3. Fotografías (No de Id) _____ al _____

4. No. Inventario SP-13 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro _____

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 313135 Y 2457341

8.2 Geográficas N 22°12.683 W 100° 48.758'

8.3 Altitud (msnm) cima 2002

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: Sitio localizado a un costi

10. Tipo de Vegetación Pirul

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: Pendiente abrupta

12. Aprovechamientos hidricos Rio Bordo Manantial Arroyo Presa Pozo

13. Uso de suelo Agrícola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa

16. Color (depósito) Café

17. Reacción al HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios Secundarios

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 70 Largo 5 Ancho 6 Altura 2,100 Volumen

22. Forma Laminar Cúbica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63,9 a 2) Arenas (1,9 a 0,062) Limos (0,061 a 0,004) Arcillas (0,003 a 0,0024)

23. Observaciones: Material muu molido parece mat de lixiviación a un costado de piletas
Se encuentra sobre inicio de afluente en la parte más alta

DATOS GENERALES

1. Fecha 30/10/2013 2. Hora 13:30:00 a.m. 3. Fotografías (No de Id) _____ al _____

4. No. Inventario SP-14 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro _____

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 314016 Y 2457861

8.2 Geográficas N 22°12.969 W 100° 48.256'

8.3 Altitud (msnm) cima 2030

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: interior del poligono MSX

10. Tipo de Vegetación Pirul, nopal, garambullo, palma, lechuguilla

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: Pendiente abrupta

12. Aprovechamientos Rio Bordo Manantial

13. Uso de suelo Dep Va Cañ _____

13. Uso de suelo Agricola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

Ganaderia

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: Vo se observa, fragmetos triturados de calizas

16. Color (depósito) Café

17. Reacción al HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios Calcita

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 70 Largo 8 Ancho 3 Altura 1.680 Volumen

Forma Laminar Cúbica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: Fragmentos de roca caliza. El deposito se encuentra de lado oeste al taller y al lado norte limita con el tejo, al lado sur arroyo San Pedro.

DATOS GENERALES

1. Fecha 30/10/2013 2. Hora 10:45 3. Fotografías (No de Id) _____ al _____
 4. No. Inventario SP-15 5. Municipio Cerro de San Pedro
 6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro _____ 7. Localidad SP CC Sa Otro _____
 8. Coordenadas
 8.1 UTM X 314006 Y 2457791
 8.2 Geográficas N 22°12.931 W 100° 48.266
 8.3 Altitud (msnm) cima 2101

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: Dentro de MSX
 10. Tipo de Vegetación Lechuguilla, viznaga 11. Relieve Mo Sie Ce especifique: Pendiente abrupta
 12. Aprovechamientos Rio Bordo Manantial Dep Va Cañ _____
 hidricos Arroyo Presa Pozo 13. Uso de suelo Agricola Residencial Industrial
 14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa
 16. Color (depósito) Gris 17. Reacción al HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6
 contacto con : H2O2 (al 5%) 1 2 3 4 5 6
 18. Principales minerales presentes Primarios Calcita 19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica
 Especifique _____
 20. Humedad Si No 21. Dimensiones (m): 32 Largo 3 Ancho 1 Altura 96 Volumen
 Forma Laminar Cúbica Prismática Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva
 Tamaño Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)
 23. Observaciones: Deposito similar al SP014 a diferencia que es parte de una desviación del agua superficial. Esta formado por fragmentos de calizas

DATOS GENERALES

1. Fecha 30/10/2013 2. Hora 10:45 3. Fotografías (No de Id) | | al | |

4. No. Inventario SP-16 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro

7. Localidad SP CC Sa Otro

8. Coordenadas

8.1 UTM X 314308 Y 2457631

8.2 Geográficas N _____ W _____

8.3 Altitud (msnm) cima _____

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: Dentro de MSX

10. Tipo de Vegetación Palma, garambullo, huizache

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: pendiente abrupta
 Dep Va Cañ

12. Aprovechamientos hidricos Rio Bordo Manantial

Arroyo Presa Pozo

13. Uso de suelo Agricola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa

16. Color (depósito) Gris

Primarios Calcita

17. Reacción al HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6

contacto con : H2O2 (al 5%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Secundarios _____

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica

Especifique _____

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 25 Largo 14 Ancho 1.5 Altura 525 Volumen

22. Estructura { Forma Laminar Cúbica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: Se encuentra sobre una pendiente muy abrupta. Frente a banda de contención MSX

DATOS GENERALES

1. Fecha 30/10/2013 2. Hora 16:25:00 a.m. 3. Fotografías (No de Id) _____ al _____

4. No. Inventario SP-17 5. Municipio Cerro de San Pedro

6. Tipo de material Rs Es Te Ja Otro _____

7. Localidad SP CC Sa Otro _____

8. Coordenadas

8.1 UTM X 314153 Y 2457948

8.2 Geográficas N _____ W _____

8.3 Altitud (msnm) cima 2071

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

9.- Tenencia de la tierra Priv. Eji Gob Otra o especifique: Dentro de MSX

10. Tipo de Vegetación Palma, garambullo, huizache

11. Relieve Mo Sie Ce especifique: Pendiente abrupta

12. Aprovechamientos Rio Bordo Manantial

13. Uso de suelo Dep Va Cañ _____

hidricos Arroyo Presa Pozo Agricola Residencial Industrial

14. Elementos de erosión Carcavas Hudimientos Agrietamiento Drenaje ácido de roca

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

15. Tipo de alteración Ox Clo Arg Ser Hem Otra: No se observa

16. Color (depósito) Café oscuro

17. Reacción al contacto con : HCl (al 10%) 1 2 3 4 5 6

H2O2 (al 5%) 1 2 3 4 5 6

18. Principales minerales presentes Primarios Calcita

Secundarios _____

19. Presencia de mat. parental Sedimentaria Ignea Metamórfica

Especifique _____

20. Humedad Si No

21. Dimensiones (m): 16 Largo 12 Ancho 3 Altura 576 Volumen

22. Estructura { Forma Laminar Cúbica Prismatica Columnar Bloq. Angulares Bloq. Subangulares Granular Migajosa Masiva

Tamaño Bloques (2048 a 256) Cantos (255 a 64) Gravas (63.9 a 2) Arenas (1.9 a 0.062) Limos (0.061 a 0.004) Arcillas (0.003 a 0.0024)

23. Observaciones: _____
