



*Universidad Nacional Autónoma de
México*

Facultad de Ingeniería

“Afectación de suelos y sedimentos por la
dispersión de los residuos mineros históricos
del distrito minero San Antonio – El Triunfo,
B.C.S.”

T e s i s

que para obtener el título de:

Ingeniera Geóloga

Presenta:

Violeta Espino Ortega

Director de tesis

Dr. Francisco Martín Romero



México, D. F., marzo 2014

A veces sentimos que lo que hacemos es tan solo una gota en el mar, pero el mar sería menos si le faltara una gota.

Madre Teresa de Calcuta.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente a la Facultad de Ingeniería por la excelente oportunidad que me brindo para lograr mi formación como Ingeniera.

Especialmente a mi director de tesis, Dr. Francisco Martín Romero, por compartir sus conocimientos conmigo, por su paciencia y por el tiempo dedicado para la realización de este trabajo.

A mis sinodales, Dra. Laura Mori, Dra. Olivia Zamora, M. I. José Santos, Mtro. Ernesto Hernández, por sus consejos y por el tiempo dedicado.

A la compañía Minera Pitalla, S. A. de C.V., en especial al Ing. Jorge Alberto Díaz Ávalos, Gerente General, por el apoyo financiero y logístico para la elaboración del proyecto del cual forma parte este trabajo de tesis; y que fue realizado bajo convenio específico con la Facultad de Química e Instituto de Geología de la UNAM.

A los integrantes del Laboratorio de Geoquímica Ambiental, Inés, Faby, Dany y José Manuel, por su amistad y por el gran apoyo que me brindaron.

A los integrantes del Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (LAFQA).

A todos mis profesores, especialmente al Ing. Antonio Chagoya que me mostró lo bello de la ingeniería y me inspiró en la elección de mi carrera.

DEDICATORIA

A Dios, porque sé que sin él no soy nada. Por la fortaleza y las respuestas que sólo he logrado encontrar en él y por permitir que mi mamá pudiera seguir a mi lado.

A mi mamá, Máxima Ortega, porque siempre ha tenido fe en mí, aun cuando yo misma no la tenía. Porque siempre tiene las palabras correctas en el momento preciso. Por ser mi inspiración demostrándome que es posible superar cualquier dificultad por más grande que parezca. Y sobre todo porque gracias a ella he logrado llegar tan lejos.

A mi papá, José Espino, porque gracias a él aprendí lo que es la responsabilidad, la honestidad y la perseverancia y por el amor y paciencia que siempre me ha mostrado.

A mis hermanos, Ale, Gaby, Vero y Lupis, porque siempre han estado a mi lado y han sido mi ejemplo a seguir. Porque sus logros han sido una gran inspiración para mí.

A mis cuñados Zaira, Luis y, especialmente, Ray por su cariño, por el apoyo que me han brindado y por sus consejos.

A mis sobrinas Dana y Sharon porque son una de las mayores felicidades de mi vida. Porque me han recordado lo que es vivir la vida sin preocupaciones y porque a su lado puedo llegar hasta donde su imaginación nos lleve.

A mis tíos y primos por los buenos ratos que hemos pasado juntos y ser mi ejemplo de fortaleza y superación.

A Carlos porque me ha hecho ver la vida de una forma diferente y porque ha logrado que surgieran en mí cualidades que pensé que no existían. Porque su esfuerzo y su dedicación fueron una gran motivación para mí. Por su compañía y el apoyo que me ha brindado, especialmente durante la elaboración de esta tesis.

A mi jefe, Act. Alan Elizondo, porque para mí ha sido un modelo a seguir tanto en el aspecto laboral como en el humano. Por la paciencia y el apoyo durante mis años de estudio. Sé que sin su apoyo este sueño no se hubiera realizado.

A Irais por ser mi gran amiga, confidente, y un gran ser humano. Porque ha estado conmigo en las buenas y en las malas. Por todos los consejos y regaños que han sido de gran ayuda. Porque me brindó todo su apoyo sin esperar nada a cambio, pero especialmente, por todas las veces que tuvo que trabajar horas extra para que yo pudiera asistir a mis clases.

A Claudia porque sus consejos y sus regaños me han ayudado para seguir creciendo como persona y porque siempre me ha motivado para seguir adelante, especialmente en los momentos más difíciles.

A Daniel porque fue mi mayor apoyo durante todos los años de estudio y nunca permitió que me diera por vencida. Por todo el tiempo que estuvo a mi lado, especialmente en uno de los momentos más difíciles de mi vida.

Al Sr. José Villanueva por su sincera amistad, por su cariño incondicional y por la fe que tuvo en mí. Siempre permanecerá en mi corazón. †

A mis amigos Miguel, Omar, César, Chío, Francisco, Vale, Alma, Lupita, Ray, Rosy, Toño F., Marta, Toño R. y todos aquellos que han sido parte de mi vida por su amistad y porque me han motivado a seguir adelante.

A todos aquellos que contribuyeron de alguna forma en el cumplimiento de este gran sueño.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS..... | IV |
| DEDICATORIA | V |
| RESUMEN | 10 |
| ABSTRACT | 11 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 12 |
| 1.1 HIPÓTESIS..... | 16 |
| 1.2 OBJETIVOS | 16 |
| 1.2.1 Objetivo General | 16 |
| 1.2.2 Objetivos Particulares | 16 |
| 2. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO | 17 |
| 2.1 Localización | 17 |
| 2.2 Clima..... | 18 |
| 2.3 Vegetación..... | 18 |
| 2.4 Tipos de suelo..... | 19 |
| 2.5 Fisiografía | 20 |
| 2.6 Hidrografía..... | 22 |
| 2.7 Aspectos Geológico – Mineros..... | 24 |
| 2.7.1 Geología Local | 24 |
| 2.7.2 Geología Estructural..... | 25 |
| 2.7.3 Depósitos minerales..... | 26 |
| 2.8 Historia de la Minería en la Región | 27 |
| 2.9 Estudios Ambientales en la Región | 28 |
| 3. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE CONTAMINACIÓN EN ZONAS MINERAS | 35 |
| 3.1 Zonas mineras en México..... | 35 |
| 3.2 Residuos mineros: fuente de contaminación en zonas mineras..... | 36 |
| 3.2.1 Problemática ambiental asociada a los residuos mineros | 39 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.2 Afectación de suelos y sedimentos debido a la dispersión de los residuos mineros..... | 42 |
| 4. METODOLOGÍA..... | 48 |
| 4.1 MUESTREO | 48 |
| 4.1.1 Muestreo de fondo | 48 |
| 4.1.2 Muestreo superficial | 50 |
| 4.1.3 Muestreo subsuperficial..... | 57 |
| 4.2 PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LABORATORIO | 60 |
| 4.2.1 Preparación General de las Muestras | 61 |
| 4.2.2 Conductividad Eléctrica y pH..... | 61 |
| 4.2.3 Evaluación del riesgo ambiental y a la salud humana..... | 61 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 73 |
| 5.1 VALORES NATURALES DE FONDO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS | 73 |
| 5.1.1 Geodisponibilidad. | 74 |
| 5.2 DETERMINACIÓN DEL RIESGO AL AMBIENTE..... | 75 |
| 5.2.1 Muestras Superficiales | 75 |
| 5.2.2 Muestras Subsuperficiales | 89 |
| 5.3 DETERMINACIÓN DEL RIESGO A LA SALUD | 102 |
| 6. CONCLUSIONES | 107 |
| 7. RECOMENDACIONES | 108 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 109 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 4. 1. Relación de muestras de fondo. | 49 |
| Tabla 4. 2. Relación de muestras superficiales. | 51 |
| Tabla 4. 3. Relación de muestras subsuperficiales..... | 57 |
| Tabla 4. 4. Límites de detección del equipo de FRX..... | 62 |
| Tabla 4. 5. Cálculo de exactitud en los análisis de Pb, Se, As, Hg, Zn y Cu..... | 63 |
| Tabla 4. 6. Cálculo de exactitud en los análisis de Fe, Mn, Cr, V, Cd y Ag..... | 64 |
| Tabla 4. 7. Cálculo de precisión en los análisis de Pb, Se, As, Hg, Zn y Cu. | 65 |
| Tabla 4. 8. Cálculo de precisión en los análisis de Fe, Mn, Cr, V, Cd y Ag. | 67 |
| Tabla 5. 1. Valores Naturales de Fondo (VNF) de EPT (pH, CE y concentraciones totales). | 73 |
| Tabla 5. 2. Valores de fondo nacionales de elementos potencialmente tóxicos y elementos mayores. (Fuente: Gutiérrez et al., 2009) | 74 |
| Tabla 5. 3. Concentraciones geodisponibles, en mg·L-1, de las muestras de fondo. | 74 |
| Tabla 5. 4. Valores de CE, pH y concentraciones totales de las muestras de superficiales. | 75 |
| Tabla 5. 5. Concentraciones Específicas, en mg·L-1, con base en la fracción soluble calculada de acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004..... | 86 |
| Tabla 5. 6. Concentraciones geodisponibles de los contaminantes prioritarios, en mg·L-1, en los suelos superficiales. Los valores que superan las CEs se marcan en negritas. | 86 |
| Tabla 5. 7. Concentraciones totales, concentraciones geodisponibles y porcentaje geodisponible de los contaminantes prioritarios en los suelos superficiales. | 88 |
| Tabla 5. 8. Concentraciones geodisponibles de los iones mayores, en mg·L-1, en los suelos superficiales..... | 89 |
| Tabla 5. 9. CE, pH y concentraciones totales de las muestras de subsuperficiales. | 91 |
| Tabla 5. 10. Concentraciones elementales de las muestras de roca analizadas mediante MEB-EDS. | 96 |
| Tabla 5. 11. Concentraciones geodisponibles de los contaminantes prioritarios en los suelos subsuperficiales..... | 99 |
| Tabla 5. 12. Concentraciones de los iones mayores en los extractos de los suelos subsuperficiales. | 100 |
| Tabla 5. 13. Concentraciones totales y geodisponibles, en mg·kg-1 y porcentaje, de los contaminantes prioritarios en los suelos subsuperficiales. | 101 |
| Tabla 5. 14. Valores de bioaccesibilidad de los contaminantes prioritarios en los suelos de uso residencial calculados con base en la NOM-147..... | 103 |
| Tabla 5. 15. Concentraciones Específicas Totales (CET), en mg·kg-1, de los contaminantes prioritarios en los suelos de uso residencial con base en la NOM-147. | 104 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2. 1. Mapa de localización de la zona de estudio. Modificado de INEGI, 2000. | 17 |
| Figura 2. 2. Mapa de la distribución de los diferentes tipos de suelos presentes en la zona de estudio..... | 20 |
| Figura 2. 3. Principales rasgos fisiográficos en la zona de estudio..... | 21 |
| Figura 2. 4. Mapa hidrológico de la zona de estudio. | 22 |
| Figura 2. 5. Mapa geológico generalizado de la zona de estudio. | 26 |
| Figura 2. 6. Mapa de muestreo. Tomado de Posada-Ayala (2011)..... | 31 |
| Figura 2. 7. Distribución y clasificación de los residuos con base en los valores de pH y tipo de residuo (terreros – cuadros, cenizas – rombos y jales – círculo). Tomado de Magdaleno - Rico (2014). | 33 |
| Figura 4. 1. Imágenes fotográficas de la zona de muestreo de fondo..... | 50 |
| Figura 4. 2. Imágenes fotográficas de la zona de muestreo superficial. Se presentan las zonas de uso indefinido (a, b, c y d) y las zonas de uso residencial (e, f, g y h). | 54 |
| Figura 4. 3. Distribución de las muestras de fondo y muestras superficiales de la unidad minera San Antonio – El Triunfo. | 55 |
| Figura 4. 4. Visión detallada de la distribución de las muestras superficiales en el poblado San Antonio..... | 56 |
| Figura 4. 5. Visión detallada de la distribución de las muestras superficiales en el poblado El Triunfo..... | 56 |
| Figura 4. 6. Distribución de las zanjas en las que se tomaron las muestras sub-superficiales de la unidad minera San Antonio – El Triunfo. | 59 |
| Figura 4. 7. Imágenes fotográficas de la zona de muestreo para las muestras sub-superficiales.... | 60 |
| Figura 4. 8. Imagen fotográfica del dispositivo utilizado para la determinación de la concentración geodisponible de acuerdo al Apéndice Normativo “B” de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004..... | 70 |
| Figura 4. 9. Imagen fotográfica del dispositivo utilizado para la determinación de la bioaccesibilidad de As y Pb de acuerdo al Apéndice Normativo “C” de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 | 72 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5. 1. Porcentaje de muestras superficiales contaminadas por EPT con base en los valores de la NOM-147 (a) y con base en los valores naturales de fondo (VNF) (b). | 78 |
| Figura 5. 2. Comparativo de muestras superficiales contaminadas por As, Pb, V y Zn según los valores naturales de fondo (VNF) y los niveles de referencia de la NOM-147 (NOM). | 79 |
| Figura 5. 3. Distribución y grado de contaminación por As en los suelos superficiales..... | 81 |
| Figura 5. 4. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por As en el poblado San Antonio..... | 81 |
| Figura 5. 5. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por As en el poblado El Triunfo..... | 82 |
| Figura 5. 6. Distribución y grado de contaminación por Pb en los suelos superficiales. | 82 |
| Figura 5. 7. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por Pb en el poblado San Antonio..... | 83 |
| Figura 5. 8. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por Pb en el poblado El Triunfo..... | 83 |
| Figura 5. 9. Distribución y grado de contaminación por Zn en los suelos superficiales. | 84 |
| Figura 5. 10. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por Zn en el poblado San Antonio..... | 84 |
| Figura 5. 11. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por Zn en el poblado El Triunfo..... | 85 |
| Figura 5. 12. Comportamiento del As (azul) y Pb (verde) en las muestras subsuperficiales. | 93 |
| Figura 5. 13. Comportamiento del As y Pb en el conjunto de muestras subsuperficiales ZSAT – 05. | 95 |
| Figura 5. 14. Imagen fotográfica de la zanja ZSAT – 05..... | 95 |
| Figura 5. 15. Microfotografías obtenidas mediante MEB - EDS de la muestras del fondo de la zanja ZSAT – 05. Las partículas 1, 4 y 5 corresponden a Fe-As-S y las partículas 2 y 3, a Pb-S. | 97 |
| Figura 5. 16. Espectros obtenidos mediante MEB – EDS de la muestra del fondo de la zanja ZSAT – 05. Los espectros 1, 4 y 5 corresponden a partículas de Fe-As-S y los espectros 2 y 3 corresponden a partículas de Pb-S..... | 98 |
| Figura 5. 17. Mapa de niveles de riesgo a la salud con base en la concentración de As en los suelos del poblado San Antonio..... | 105 |
| Figura 5. 18. Mapa de niveles de riesgo a la salud con base en la concentración de As en los suelos del poblado El Triunfo. | 105 |

Figura 5. 19. Mapa de niveles de riesgo a la salud con base en la concentración de Pb en los suelos del poblado San Antonio. 106

Figura 5. 20. Mapa de niveles de riesgo a la salud con base en la concentración de Pb en los suelos del poblado El Triunfo. 106

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | | |
|---|--------------------|----|
| $\text{FeS}_2 (\text{s}) + 7/2 \text{O}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$ | ECUACIÓN 3. 1..... | 41 |
| $\text{Fe}^{2+} + 1/4 \text{O}_2 (\text{aq}) + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1/2 \text{H}_2\text{O}$ | ECUACIÓN 3. 2..... | 41 |
| $\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe} (\text{OH})_3 (\text{sólido}) + 3\text{H}^+$ | ECUACIÓN 3. 3..... | 41 |
| $\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$ | ECUACIÓN 3. 4..... | 42 |
| | | |
| $\% \text{Error} = \text{Valor certificado} - \text{Valor determinado} / \text{Valor Certificado} \times 100$ | ECUACIÓN 4. 1..... | 63 |
| $\% \text{Exactitud} = 100 - \% \text{Error}$ | ECUACIÓN 4. 2..... | 63 |
| $\% \text{CV} = \text{Desviación estándar} / \text{Media} \times 100$ | ECUACIÓN 4. 3..... | 64 |
| $\text{CB} = \text{Concentración del extracto in vitro} \text{ mg L}^{-1} \times 0.1 \text{ L} / \text{Concentración en sólido, mg kg}^{-1} \times 0.001$ | ECUACIÓN 4. 4..... | 71 |

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------------|--|
| % Bio | porcentaje bioaccesible |
| BA | factor de bioaccesibilidad |
| BCS | Baja California Sur |
| CB | concentración bioaccesible |
| CE | conductividad eléctrica |
| CENICA | Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental |
| CE_s | concentración específica con base en la fracción soluble |
| CE_T | concentración específica con base en riesgo a la salud |
| CF_s | concentración soluble en las muestras de fondo |
| CR_s | concentración de referencia soluble |
| CR_T | concentración de referencia total |
| CT | concentración total |
| CV | coeficiente de variación |
| EPT | elementos potencialmente tóxicos |
| EX | exactitud |
| FRX | Fluorescencia de Rayos X |
| ICP-AES | Espectrometría de Emisión Atómica Inductivamente Acoplado a Plasma |
| LAFQA | Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente |
| LD | límite de detección |
| LUP | Laboratorio Universitario de Petrología |
| M | meda de la concentración total |
| MEB-EDS | Microscopía Electrónica de Barrido Acoplada con Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa |
| N/a | no analizado |
| N/A | no aplica |
| N/D | no disponible |
| N/S | no soluble |
| NMX-132 | Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 |
| NOM-147 | Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 |

| | |
|---------------|--|
| pH | potencial hidrógeno |
| SA-ET | San Antonio – El Triunfo |
| SD | desviación estándar |
| US EPA | Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés) |
| VC | valor certificado |
| VD | valor determinado |
| VNF | valor natural de fondo |

RESUMEN

Se realizó un estudio geoquímico detallado en el Distrito Minero San Antonio – El Triunfo (SA-ET) en Baja California Sur, México con el fin de valorar la contaminación de suelos y sedimentos debido a la dispersión de residuos mineros.

Se analizó un total de 12 muestras de fondo con el fin de determinar la concentración total natural de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como arsénico, plomo y cadmio en el área de estudio. Así mismo, se determinó la concentración total de EPT de 116 muestras de suelos y sedimentos superficiales y subsuperficiales para evaluar la extensión de la contaminación en el sitio de estudio debido a la dispersión de los residuos mineros históricos.

En los sitios contaminados donde fueron identificados asentamientos humanos, se realizó una evaluación del riesgo a la salud humana (RSH), mientras en los otros sitios contaminados se evaluó el riesgo ambiental (RA). El RSH y RA se evaluaron a través de la bioaccesibilidad y geodisponibilidad de EPT, respectivamente; de acuerdo a las metodologías descritas en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (NOM-147).

Los resultados de este estudio muestran que la contaminación de suelos y sedimentos alcanza aproximadamente 12 km hacia la Bahía La Ventana y que los principales contaminantes que causan afectación son el arsénico (As) y el plomo (Pb). En gran parte del sitio de estudio, se presume que la contaminación es principalmente superficial debido a que no existe migración vertical.

Sin embargo, los resultados sugieren que en los poblados de San Antonio y El Triunfo existe riesgo a la salud humana debido a las altas concentraciones bioaccesibles de arsénico y plomo. En estas mismas zonas, se cree que existe un riesgo ambiental debido a las relativamente altas concentraciones geodisponibles de esto EPT, los cuales podrían migrar y contaminar las aguas subterráneas, donde el nivel de profundidad es de aproximadamente 5 a 10 m.

ABSTRACT

A detailed geochemical study was conducted in the “San Antonio – El Triunfo” mining district in Baja California Sur, México in order to assess the soil and sediment pollution due to the dispersion of mine wastes. For this study a total of 128 samples were collected.

A total of 12 background samples were analyzed in order to determine the natural total concentrations of potentially toxic elements (PTE) as arsenic, lead and cadmium in the study area. Furthermore, were determined the total concentrations of PTE of 116 samples of superficial and sub-superficial soil and sediment to evaluate the extent of the contamination in the study site due to the dispersion of the historical mining waste.

In the contaminated sites where were identified human settlements, was realized a human health risk (HHR) assessment, while in the other contaminated sites environmental risk (ER) was assessed. The HHR and ER were evaluated through the bioavailability and geoavailability of PTE, respectively; according to the methodologies described in the Official Mexican Standard NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (NOM-147).

The results of this study show that the pollution of soil and sediment reaches approximately 12 km towards to Bahía La Ventana and that the main pollutants causing affectation are arsenic (As) and lead (Pb). In most of the study site, it is presumed that the pollution is primarily superficial since no vertical migration.

However, our results suggest that in the villages of San Antonio and El Triunfo there is a risk to human health due to high bioaccessible concentrations of arsenic and lead. In these same areas we believe there is an environmental risk due to the relatively high geoavailable concentrations of these EPT, which could migrate and contaminate the shallow groundwater, where the level is about 5 to 10 m depth.

1. INTRODUCCIÓN

La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 señala que el desarrollo de actividades económicas de manera no sustentable ha contribuido a la emisión de compuestos potencialmente tóxicos que, bajo ciertas condiciones y concentraciones, pueden tener efectos nocivos para la salud de la población. Así mismo, indica que la escasez de especificaciones ambientales en materia de suelos, así como las formas de producción utilizadas en el pasado, han generado la aparición de sitios contaminados.

Una de las industrias con gran impacto tanto económico como ambiental es la minería. La obtención de metales como hierro (Fe), cobre (Cu), cadmio (Cd), oro (Au), plomo (Pb) y plata (Ag) mediante la actividad minero-metalúrgica requiere de la excavación de minas, la remoción de minerales y procesos de extracción de metales que pueden causar daños ambientales (Volke – Sepúlveda *et al.*, 2005).

La afectación que puede producir la industria minera abarca desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos, sedimentos y cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneas, y es causada principalmente por la dispersión de los residuos mineros hacia su entorno (Romero *et al.*, 2008).

La contaminación por residuos mineros es un problema que se presenta a nivel mundial. Se han realizado diversos estudios a escala global relacionados a la afectación que pueden causar los residuos mineros al ambiente. Un ejemplo de esto es el estudio realizado por Kwang – Koo *et al.*, (2001) que reportan la presencia de cerca de 1,500 minas metálicas inactivas en Corea del Sur, en las cuales, los residuos fueron abandonados sin algún manejo. Esto los ha convertido en la principal fuente de contaminación de suelos de cultivo en las áreas mineras, debido a que presentan altas concentraciones de cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn) que exceden los niveles permisibles.

Por otra parte, Romero – Díaz y García – Fernández (2007) evaluaron la contaminación por erosión eólica e hídrica de los desechos mineros de la antigua zona minera de la Unión, en Cartagena, España. En esta zona, se realizó una intensa explotación por más de 2,500 años, pero en los últimos años, se realizó un importante movimiento de tierras, más de 360 millones de toneladas, de las cuales 315 corresponden a residuos que son fácilmente movilizables tanto por la acción del viento como por las aguas de escorrentías debido a sus características inestables y tamaño de partículas.

Así mismo, Belmonte – Serrato *et al.*, (2010) reportan afectación de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras en el sureste de España. Detectaron concentraciones importantes de 11 metales pesados, entre los que destacan el Pb y Zn, superando los niveles máximos permitidos por las normas internacionales.

En México, los problemas ambientales debido a la industria minera se presentan en la mayor parte del país y han sido estudiados por varios autores entre los que se pueden mencionar a Monroy *et al.*, (2002) que reportan contaminación por arsénico (As) y metales pesados en Villa de la Paz y Matehuala, San Luis Potosí, donde se ubica un gran volumen de residuos mineros. Detectaron concentraciones de As de entre 19 y 17,384 mg·kg⁻¹, Cu de entre 15 y 7,200 mg·kg⁻¹, Pb de entre 31 y 3,450 mg·kg⁻¹ y Zn de entre 26 y 6,270 mg·kg⁻¹.

Así mismo, Puga *et al.*, (2006) reportan contaminación de suelos por metales pesados debido a la extracción minera en San Francisco el Oro, Chihuahua. Los principales contaminantes detectados fueron As, Pb, Zn y Cd y determinaron que sus concentraciones en los suelos disminuyen conforme aumenta la distancia de la fuente de contaminación, presa de jales.

Por otra parte, Mendoza – Amézquita *et al.*, (2006) analizaron los residuos mineros de dos minas ubicadas en el Distrito Minero de Guanajuato con el fin de evaluar la movilidad de elementos traza como Zn, Cu, Pb, Cd, Se y As. Reportan concentraciones máximas, en mg·kg⁻¹, de 330 para el Zn, 69 para el Pb, 3.5 para el Cd, 18 para el Cr y 36 para el As.

También Gutiérrez - Ruíz *et al.*, (2007) reportan suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua. Determinaron que los jales

presentan altas concentraciones de Zn (hasta 21,059 mg·kg⁻¹), Pb (hasta 16,881 mg·kg⁻¹), As (hasta 3,281 mg·kg⁻¹) y Cu (hasta 2,415 mg·kg⁻¹). Para los suelos y sedimentos superficiales, ubicados en los alrededores de las presas de jales, determinaron concentraciones totales de Zn, Pb, Cu, As y Cd mayores a la mediana de los valores de naturales de fondo determinados en este estudio (974 mg·kg⁻¹ de Zn, 947 mg·kg⁻¹ de Pb, 190 mg·kg⁻¹ de Cu, 342 mg·kg⁻¹ de As y 28 mg·kg⁻¹ de Cd). Deducen que los suelos y sedimentos de la zona están contaminados debido a la dispersión de los jales, sin embargo, las concentraciones de los EPT solubles en agua fueron bajas. Por lo que concluyen que no representan un riesgo ambiental de consideración.

Finalmente, Romero *et al.*, (2008) estudiaron residuos mineros en las regiones mineras de Nacozari, Sonora; Santa Bárbara, Chihuahua; Zimapán, Hidalgo y Taxco, Guerrero con el fin de valorar su capacidad de generación de drenaje ácido, así como la peligrosidad e impacto para el ambiente. Detectaron concentraciones variables de EPT como As, Pb, Zn, Cu y Fe, así como lixiviados ácidos con contenido de As y Pb en las minas de Nacozari, Zimapán y Taxco.

En México, la contaminación de suelos por actividades mineras se genera con mayor frecuencia durante el proceso de beneficio (Volke – Sepúlveda *et al.*, 2005). En particular, durante el beneficio de Au y Ag existe el riesgo de contaminación con elementos como As, Hg, Pb y Zn que se encuentran asociados a los yacimientos de Au y Ag y pueden ser liberados al ambiente durante las actividades mineras (Romero – Guadarrama, 2011).

El As y Pb son dos de los contaminantes más frecuentes en las zonas mineras de México, además del Cd en algunas de ellas (Volke – Sepúlveda *et al.*, 2005). De acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, para el año 2000 se tenían identificados 61 sitios contaminados por los elementos regulados en dicha norma, entre los cuales se encuentran el As y Pb.

Particularmente, Baja California Sur es uno de los estados de la República Mexicana en el que se han explotado yacimientos de Au y Ag. El desarrollo de la industria minera en este estado comenzó en los años 1700 con la explotación de lo que ahora se conoce como el Distrito Minero San Antonio – El Triunfo (SA-ET) de donde se obtuvieron cantidades importantes de Au y Ag (Gálvez, 1922).

Estudios realizados por diferentes autores, entre los que se encuentran Carrillo – Drever (1998) y Posadas – Ayala (2011), indican la presencia de contaminantes, principalmente As, en suelos, sedimentos, aguas superficiales y aguas subterráneas de la región. Ambos autores indican como fuente de los contaminantes las grandes cantidades de residuos mineros localizados en la zona del Distrito Minero SA-ET y sus alrededores y sugieren que la contaminación relacionada con los residuos mineros se debe principalmente a la erosión y transporte de los mismos mediante agua y aire.

Específicamente, en la Sierra de Los Chiles se ubica una zona de residuos mineros que han sido estudiados por Magdaleno – Rico (2014) quién reporta altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) entre los que destacan As y Pb.

De acuerdo al tipo de drenaje hídrico que presenta, se considera que la sierra de Los Chiles y sus alrededores están siendo afectados por el paso de las escorrentías, que posteriormente son vertidas al arroyo San Antonio. El arroyo San Antonio es uno de los arroyos principales que recorren la Cuenca de San Juan de los Planes, nace en la Sierra de los Chiles y descarga en el Golfo de California.

Considerando lo anterior, para el presente estudio se seleccionó la zona de residuos de la Sierra de Los Chiles y la Cuenca de San Juan de los Planes como la zona de estudio, debido a que el paso de las escorrentías por la zona de residuos podría estar transportando EPT hacia la Cuenca de San Juan de Los Planes, provocando la afectación de los suelos, sedimentos, aguas superficiales y aguas subterráneas.

La importancia de este estudio radica principalmente en el hecho de que dentro de esta zona existen suelos de uso residencial que podrían verse afectados por la dispersión de los residuos mineros y, a su vez, afectar la salud de la población mediante el contacto directo. Otra razón destacable es que la agricultura, realizada en las partes topográficamente bajas, y el desarrollo pecuario son las principales actividades económicas que realizan los habitantes de las comunidades ubicadas dentro de la zona de estudio (CONAGUA, 2003). Estas actividades se podrían ver afectadas por la presencia de EPT en los suelos y sedimentos. Así mismo, es

importante conocer la movilidad de los contaminantes a través de los suelos y sedimentos con el fin de determinar si podrían llegar a causar afectación al acuífero de la zona.

1.1 HIPÓTESIS

Los residuos mineros históricos, producto de la extracción de Au y Ag en el Distrito Minero SA-ET, han causado enriquecimiento de As y otros EPT en los suelos y sedimentos de la zona de residuos y sus alrededores como consecuencia de su dispersión.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la afectación de suelos y sedimentos debido a la dispersión de los residuos mineros históricos del Distrito Minero SA-ET, desde la Sierra de Los Chiles hasta la Cuenca de San Juan de Los Planes, abarcando una distancia lineal aproximada de 30 km.

1.2.2 Objetivos Particulares

1. Zonificar suelos y sedimentos del Distrito Minero SA-ET con diferente grado de afectación por la presencia de elementos potencialmente tóxicos (EPT).
2. Valorar la geodisponibilidad y bioaccesibilidad de EPT en las zonas contaminadas según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.
3. Valorar la migración vertical de los EPT en las zonas contaminadas.

2. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

2.1 Localización

La zona de estudio comprende la zona de residuos ubicada en la Sierra de los Chiles, que forma parte del Distrito Minero SA-ET, y la Cuenca de San Juan de Los Planes. Se ubica en la porción centro – sur del estado de Baja California Sur, dentro del municipio de la Paz (Figura 2.1), entre las coordenadas 109°40' a 110°20' de longitud Oeste y 23°45' a 24°00' de latitud Norte. Su altitud varía de 40 a 400 msnm (SMN, 2012).

Se localiza en las cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) escala 1:50,000, denominadas F12 – B13 “San Antonio” y F13 – B14 “San Juan de Los Planes”.

Se encuentra aproximadamente a 40 Km en línea recta al SE de la ciudad de La Paz. Se llega a la zona por la Carretera Federal Número 1 que va de La Paz hacia Cabo San Lucas.

Dentro de la zona de estudio se ubican los poblados de El Triunfo, San Antonio, San Juan de Los Planes y algunas comunidades pequeñas como Texcalama, Ejido Juan de Domínguez Cota, Agua Amarga y San Pedro México.



Figura 2. 1. Mapa de localización de la zona de estudio. Modificado de INEGI, 2000.

2.2 Clima

Los climas predominantes en el estado son muy seco semicálido (BWh) y muy seco muy cálido y cálido (BWh'). Particularmente la zona de estudio presenta climas seco semicálido (BSh) y seco muy cálido y cálido (BSh'). La temperatura promedio en el municipio de La Paz (de 1984 a 2010) osciló entre los 22 y 26 °C. Comúnmente, la temperatura mínima se presenta en el mes de enero, oscilando entre los 16.7 y 18.2 °C, observándose un aumento paulatino hasta alcanzar su punto máximo en los meses de junio a septiembre (oscilando entre los 27.3 y 29.8°C; CONAGUA, 2009) para descender nuevamente durante los meses restantes (INEGI, 2011).

La temporada de lluvias corresponde al verano. Los meses de mayor precipitación son de julio a octubre, así como noviembre y diciembre a consecuencia de los ciclones que se presentan en esa época. La precipitación media anual en la zona de estudio es de 281 mm/año. Varía de 175 mm/año, en la planicie costera, a 450 mm/año, en las zonas altas. La evaporación potencial es poco mayor a los 2000 mm/año (CONAGUA, 2009).

En la zona de estudio, el sistema de vientos dominante durante los meses cálidos tiene una dirección SSE con velocidades que fluctúan desde 0 hasta 10.3 m/s con un promedio anual de 2.4 m/s. Durante los meses fríos, los vientos provienen del NNW (Compañía Minera Pitalla, 2012).

2.3 Vegetación

En general, el estado presenta un desarrollo de matorrales xerófilos, como sarcocaulé (con mayor abundancia y representado por especies como el copal, hierba del burro, palo verde, ocotillo y otras), crasicaulé, sarcocrasicaulé de neblina (como el cardón, pitahaya agria, pitahaya dulce, etc.), desértico micrófilo y mezquital, constituidos por una gran diversidad de formas vegetales adaptadas a la aridez, desde arbustos de tallos carnosos, gruesos, en ocasiones retorcidos, hasta pequeñas plantas efímeras estacionales (Romero – Guadarrama, 2011).

La vegetación de la zona consta principalmente de especies raras y estrictamente endémicas. De acuerdo a la disminución del gradiente altitudinal, se localizan las siguientes comunidades

vegetales: bosque de pino – encino, bosque de encino, selva baja caducifolia, matorral sarcocaule, y agrupaciones costeras (Compañía Minera Pitalla, 2012).

2.4 Tipos de suelo

Los suelos predominantes de la zona de estudio son:

- **Regosoles.**- (del griego *reghos*, manto) son suelos muy jóvenes, en general resultado del depósito reciente de roca y arena transportadas hídricamente. Se encuentran sobre todo al pie de las sierras donde son acumulados por los ríos que descienden de éstas cargados de sedimentos. Se dividen en éutricos y calcáricos, que se caracterizan por estar recubiertos por una capa conocida como ócrica que puede volverse dura y costrosa impidiendo la penetración de agua hacia el subsuelo (Flores – Martínez *et al.*, 2002). En la zona de estudio, están presentes en las zonas bajas, especialmente en la cuenca de San Juan de los Planes
- **Leptosoles.**- (del griego *leptos*, delgado) se caracterizan por su escasa profundidad (menor a 25 cm). Se clasifican como líticos, con profundidades menores a 10 cm, y rendizicos, se desarrollan en rocas calizas y son ricos en materia orgánica. En ocasiones, su escasa profundidad los vuelve muy áridos y el calcio que contienen puede llegar a inmovilizar los nutrientes minerales. Es posible encontrarlos en los principales sistemas montañosos debido a que las pendientes y la consecuente erosión imponen restricciones a la formación de suelo (Flores – Martínez *et al.*, 2002). En la zona de estudio, se presentan en las sierras que enmarcan la Cuenca de San Juan de Los Planes y en sus laderas.
- **Fluvisoles.**- son suelos depositados por el agua. Se presentan generalmente en las márgenes de las corrientes, de las cuales reciben aportes de materiales recientes de manera regular (SEMARNAT, 2000). En la zona de estudio, se presentan en las zonas bajas, principalmente cercanas a las sierras, y ocupan el tercer lugar de abundancia.
- **Solonchaks.**- son suelos que se caracterizan por su alto contenido de sales solubles en alguna parte o en todo el perfil. Su abundancia es común en las regiones áridas y

semiáridas (SEMARNAT, 2000). En la zona de estudio, son pocos los suelos de este tipo, se presentan en una pequeña franja al noreste.

- **Calcisoles.**- (del latín *calx*, *cal*) se distinguen por presentar una capa dura de caliche a menos de un metro de profundidad, una gran cantidad de calcio y, en ocasiones, una capa ócrica, lo que los convierte en suelos secos e infértiles. Se desarrollan bajo climas áridos (Flores – Martínez *et al.*, 2002). En la zona de estudio se presentan en una pequeña porción al oeste.

La distribución de los tipos de suelo presentes en la zona de estudio se muestra en la Figura 2.2.

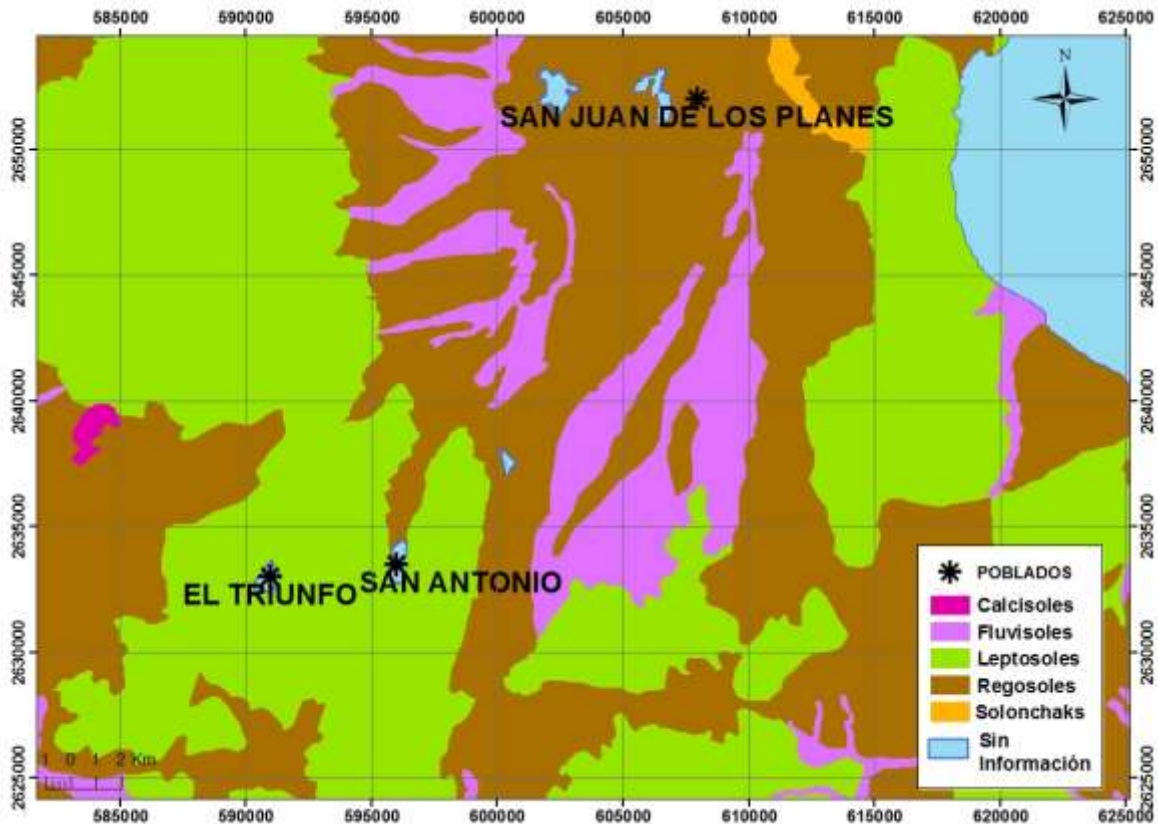


Figura 2. 2. Mapa de la distribución de los diferentes tipos de suelos presentes en la zona de estudio.

2.5 Fisiografía

La zona de estudio pertenece a la Provincia Fisiográfica de Baja California, subprovincia Discontinuidad del Cabo (SGM, 1996, 2000). Las geformas observadas en la región son el

resultado de dos tipos de rasgos, uno de madurez que se manifiesta en afloramientos de unidades de rocas intensamente erosionadas de donde se derivan los sedimentos que dan forma a lomeríos, terrazas y planicies aluviales y otro en el que aparecen rocas de origen tanto ígneo como metamórfico dando origen a un perfil de formas abruptas características de sierras complejas (SGM, 1996). Las geformas sobresalientes en la zona de estudio son las serranías circundantes que incluyen las sierras de Los Chiles, Las Calabazas (también conocida como El Novillo), Del Perico y el Carrizalito (también conocida como La Gata) (Figura 2.3).

La forma de la cuenca de San Juan de Los Planes es alargada (aproximadamente 55 km de largo por 24 km de ancho promedio) de orientación N-S controlada estructuralmente por las diversas fallas que la delimitan lateralmente. Su parte norte limita con el Golfo de California en la Bahía de La Ventana que marca el fin de la cuenca (CONAGUA, 2003).

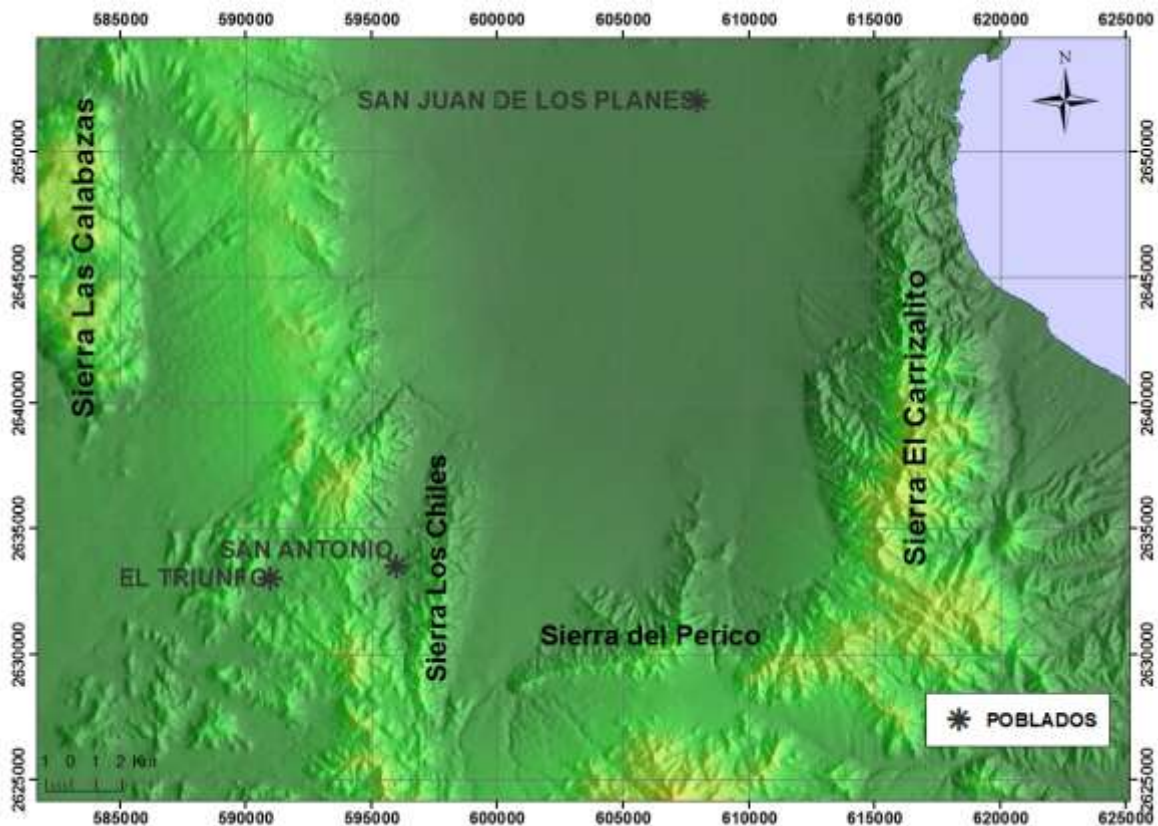


Figura 2. 3. Principales rasgos fisiográficos en la zona de estudio.

2.6 Hidrografía

La zona de estudio se localiza dentro del Acuífero Los Planes que está comprendido en la Región Administrativa I, Península Baja California. Perteneció a la Región Hidrológica No. 6, Baja California Sureste.

El drenaje en la zona es abundante y presenta una disposición dendrítica en las partes altas que cambia a paralelo al descender hacia la planicie (Figura 2.4). Se propone una clasificación principal de tres zonas: la zona de sierras constituida por suelos poco profundos, pendientes mayores a 6.7% y drenaje dendrítico; la zona de pendiente constituida por suelos más profundos, pendientes del orden de 6.7% y drenaje paralelo; y la zona de planicie constituida por suelos bien desarrollados, pendientes menores a 3.3 % y drenaje paralelo a subparalelo (CONAGUA, 2003).

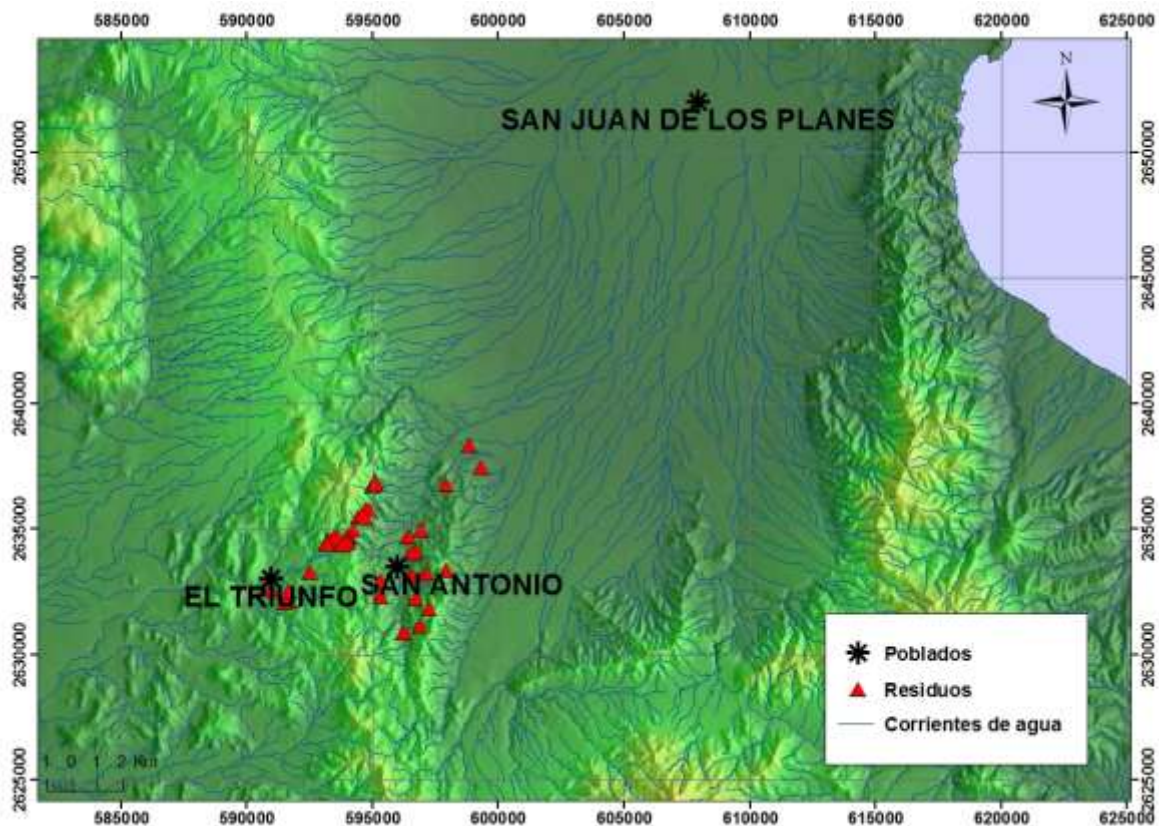


Figura 2. 4. Mapa hidrológico de la zona de estudio.

El colector principal es el arroyo Los Planes (también conocido como San Antonio) que presenta un volumen de escurrimiento del orden de 2 millones $\text{m}^3/\text{año}$. Recibe aportación de algunos afluentes, lo que lleva a la formación de cauces entrelazados en las partes bajas. Las corrientes son de régimen intermitente y en general se infiltran al alcanzar la planicie aluvial. Cuando el régimen de lluvias es mayor, los escurrimientos más importantes llegan a descargar a la Bahía La Ventana en el Golfo de California (CONAGUA, 2009).

El acuífero en explotación, acuífero de Los Planes, consiste de materiales sedimentarios de origen marino como arenas y arcillas que constituyen el cuerpo principal del acuífero y materiales de pie de monte de origen aluvial (arena gruesa) localizados en la periferia del valle y funcionan como zonas de infiltración, mientras que los primeros constituyen el cuerpo principal del acuífero. Presenta regular a baja permeabilidad con transmisividades que varían entre 0.2×10^{-3} y $10 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, predominando $1-4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (CONAGUA, 2003). La profundidad del nivel estático del acuífero (para 1996) oscilaba entre 20 y 130 m, presentando los valores mínimos en la planicie costera y los máximos hacia la serranía (CONAGUA, 2009).

Basados en información geológica y geofísica, CONAGUA (2003) establece tres unidades hidrogeológicas que controlan el movimiento del agua subterránea:

- a) Medio poroso: constituido por materiales geológicos conformados por sedimentos no consolidados del Terciario y Cuaternario como depósitos fluviales, aluviales, de pie de monte y de dunas, presenta espesores que varían entre 30 m en la porción central a 250 m en zonas adyacentes a las principales fallas y a la costa. Esta unidad presenta conductividades hidráulicas de entre 5 a 70 m/día.
- b) Medio fracturado: en la región topográficamente alta donde afloran las rocas intrusivas y metamórficas es posible identificar la presencia de fracturamiento que permite establecer una cierta permeabilidad secundaria. Si bien el fracturamiento superficial está presente en la mayoría de las rocas aflorantes, que constituyen el medio fracturado, es de suponer que muchas de ellas se cierran o presentan cementante a profundidad. CONAGUA (2003) estima 30 m como profundidad máxima del fracturamiento, lo cual permite el movimiento efectivo del flujo de agua subterránea.

- c) Basamento hidrogeológico: está representado por la zona donde las rocas cristalinas presentan una conductividad hidráulica muy baja, la ubicación de esta superficie es difícil de definir con precisión ya que la información disponible no permite establecerla en forma detallada.

2.7 Aspectos Geológico - Mineros

2.7.1 Geología Local

Estratigráficamente, en la región afloran rocas metamórficas del Jurásico, intrusivos del Cretácico Superior, intrusivos hipabisales y stocks cuyo rango de edad se considera del Neógeno, escasos afloramientos de areniscas cuarzosas del Plioceno y una serie de sedimentos recientes entre los que se encuentran areniscas, limos y una serie de depósitos coluviales no consolidados (SGM, 1996).

En la zona de estudio, las rocas más antiguas que afloran corresponden a un complejo de rocas metamórficas representadas por esquistos y gneises. Estas unidades presentan deformación por metamorfismo regional y una afectación local por intrusivos que dan origen a rocas de metamorfismo de contacto como hornfels y skarns de epidota. Los esquistos afloran en una franja NE-SW desde el oriente del poblado El Triunfo hasta el norte de San Antonio. Las metacalizas afloran en una franja N-S al norte en el contacto con los intrusivos del Cretácico Superior. Los gneises afloran en el extremo norte y en el sureste (SGM, 1996).

Se observan también cuerpos granodioríticos aflorando al NE de la zona de estudio y graníticos con tonalitas aflorando en la porción SE, ambos correlacionables con el Batolito de Los Cabos (Cretácico Tardío 74 – 77 ma.) (SGM, 1996). Estas rocas son afectadas por un granito que, petrográficamente, consiste en un metagranito de biotita. Esta unidad se presenta en forma de franja irregular en la porción NE de la Sierra El Carrizalito (SGM, 2000).

En la porción NW se encuentra la sierra Las Calabazas, constituida por un cuerpo gabrónico en forma de lacolito representando el último evento magmático del Cretácico. En la Zona de El

Triunfo – San Antonio, afloran diques de composición similar. Al este de La Sierra de Las Calabazas aflora un cuerpo granítico de edad Cretácico Superior que presenta una deformación dúctil con apariencia de esquistos y gneis (SGM, 1996).

La Cuenca de San Juan de Los Planes está compuesta por depósitos sedimentarios correspondientes al Holoceno y constituidos por conglomerados polimícticos mal clasificados en una matriz areno – arcillosa, limos, arenas y cantos rodados, así como depósitos aluviales, eólicos y litorales (SGM, 2000).

2.7.2 Geología Estructural

Existen dos eventos tectónicos regionales importantes expuestos en la zona de estudio. El primero es el choque entre la Placa Farallón y la Placa de Norteamérica, Orogenia Laramide, que provoca el movimiento compresivo y da origen a la intrusión de grandes masas ígneas, así como a procesos de mineralización presentes en la zona. El segundo, desarrollado del Mioceno medio al Plioceno temprano, es el cambio en la configuración del límite entre las placas Pacífico y Norteamericana, dando inicio a la formación de la cuenca del Golfo de California mediante movimientos oblicuos extensionales con orientación NW-SE originando un relieve peninsular gobernado por bloques escalonados y fallas laterales dextrales. A este evento se le asocia la intrusión de estructuras tabulares de diferente composición (SGM, 2000).

La zona está controlada por cinco direcciones de estructuras principales correspondientes a fallamientos normales y laterales. La primera corresponde a la falla normal El Carrizal que presenta un rumbo N 10°-42° W con buzamiento tanto al NE como al SW y longitudes que varían de 400 m a 35 km. La segunda corresponde a la falla normal de La Paz con dirección norte sur franco a N 05°E con buzamiento tanto al oriente como al poniente y longitudes que alcanzan hasta 40 km, así como una gran cantidad de fallas menores. La tercera corresponde a fallas normales con dirección N 24° a 39° E y magnitudes de hasta los 25 km. El cuarto arreglo presenta rumbo N 45° a 65° E con longitudes de hasta 40 km. El quinto sistema tiene dirección N 65°-80° W a E-W franco. Los dos últimos arreglos corresponden a fallamientos laterales, posiblemente conjugados, desplazados por fallas normales (SGM, 1996).

La zona de Los Planes se comporta como un pilar tectónico originado por sistemas de falla orientados N-S. Las fallas regionales principales, enmascaradas por abanicos aluviales de reciente depósito, corresponden a la fosa tectónica de San Juan de los Planes y el pilar tectónico Sierra El Carrizalito. A su vez, este fallamiento es desplazado por un sistema de fallas normales con rumbo NW-SE con inclinaciones al NE y SW y por otro sistema menos frecuente de rumbo NW y E-W con inclinaciones al SE (SGM, 2000).

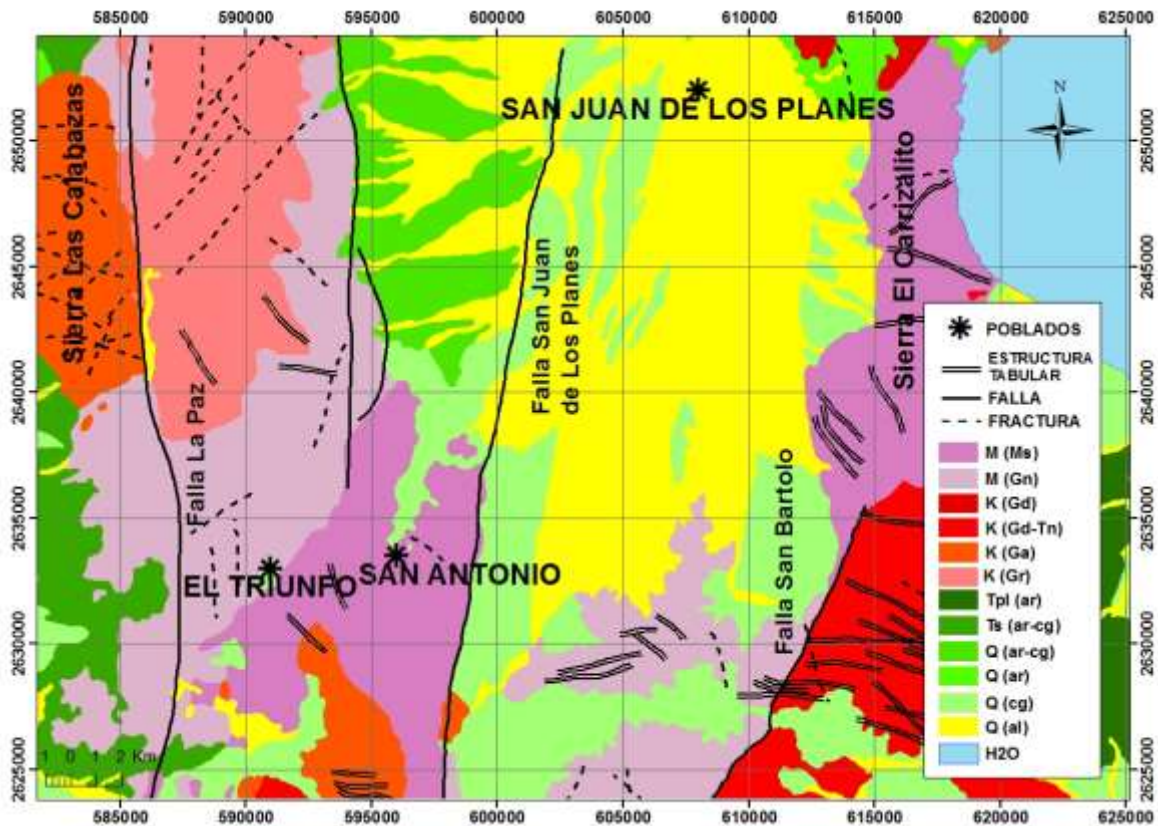


Figura 2. 5. Mapa geológico generalizado de la zona de estudio.

2.7.3 Depósitos minerales

En el Distrito Minero SA-ET, se presentan dos principales sistemas de mineralización en diques y veta-fallas con valores de Au, Ag, Pb y Zn asociados a óxidos y sulfuros. El primero correspondiente a El Triunfo, con rumbo general NE 24° a 39° SW e inclinaciones de 38° a 72° al SE. El segundo correspondiente a San Antonio, con rumbo franco N-S e inclinaciones de 40° a 75° al poniente o noreste. Ambos sistemas constituyen un graben mineralizado. La roca encajonante corresponde a

un granito de biotita y en otros casos granodiorita y granito. La distribución mineralógica predominante es en forma diseminada con presencia de sulfuros como argentita (Ag_2S), galena (PbS), pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS) y arsenopirita (FeAsS) (SGM, 2000).

Los pórfidos auríferos presentan una distribución restringida con dimensiones de hasta 8,000 m de longitud y 200 m de ancho. Contienen depósitos en stockwork y diseminados y sus mineralización principal es Au libre, asociado a pirita y arsenopirita. Se alojan comúnmente en rocas intrusivas cuarzodioríticas – tonalíticas. Son afectados principalmente por alteraciones como oxidación, silicificación y cloritización (SGM, 1996).

2.8 Historia de la Minería en la Región

Se presume que los primeros trabajos de minería en la región datan del año 1700. Iniciaron con el establecimiento del centro de explotación llamado Real de San Antonio. Se comenzó la explotación en las minas de San Nicolás y San Pedro en el Distrito de El Triunfo; La Gobernadora y La Mina Rica, en el de Santa Ana; y San José y otras, en el de San Antonio y se establecieron haciendas de beneficio en Santa Ana y San Antonio. Las minas fueron explotadas hasta el año 1776, obteniendo cantidades notables de plata en el Real de San Antonio y oro en diversos placeres de los alrededores (Gálvez, 1922).

Los trabajos de minería se paralizaron por cerca de cien años hasta el descubrimiento de las minas de California, formándose varias compañías franco-americanas, americanas y mexicanas que emprendieron los trabajos de exploración y explotación (Gálvez, 1922).

La compañía La Hormiguera Mining Co. se fundó por el año de 1871 y explotó las minas Mendozeña, Hormiguera, María, Elena, Triunfante y Frawell, los metales se beneficiaban por el sistema de lixiviación y se calcula que la extracción no debe haber sido menor de 150 toneladas diarias. Por el año de 1878, esta compañía pasó sus derechos a Progreso Mining Co., misma que obtuvo concesión para explorar una zona en los Minerales de El Triunfo y San Antonio. Los trabajos desarrollados por esta compañía llegaron a profundidades de 450 m (Gálvez, 1922).

Posteriormente se organizó la Compañía de Minas de El Triunfo, S. A. para arrendar, durante un periodo de 25 años, las minas y haciendas de beneficio de la Compañía Metalúrgica de Baja California (Gálvez, 1922).

Las minas de más activa explotación fueron: Humbolt, Fortuna, San Pedro, San Nicolás, Soledad, Marroneña, Mendozeña, Hormiguera, María, Elena, Triunfante, Farwell y Gobernadora (Gálvez, 1922).

En los años transcurridos de 1879 a 1912, los trabajos de minería reportan producciones de oro de cerca de 8,000 onzas al año. Los trabajos realizados durante este periodo dieron origen a la mayor parte de los terreros que se ubican actualmente en la región (Minera Pitalla, 2011).

Para 1913, la Compañía de Minas del Triunfo, S. A. tenía en explotación las minas: Marroneña, con un socavón labrado sobre la veta de El Triunfo con 250 metros de desarrollo; Nacimiento, sobre la veta El Triunfo, con dos socavones sobre veta; Buena Suerte, sobre la misma veta; Ocote, Guasabe, Valenciana y Dolores en la zona de Columbinas.

Sobre la veta occidental de San Antonio, San José, se laboraron las minas: Las Ánimas, El Capricho, La Reforma y Santa Cruz. En la zona oriental de San Antonio, están laboradas las minas: Cerro Colorado, Las Guijas, Los Gavilanes, San Jacinto, Soledad, El Franco, La Recompensa y Las Barrancas.

Todas estas minas se explotaron en muy pequeña escala, siendo su extracción total de 50 a 60 toneladas diarias de mineral sometido directamente al sistema de cianuración para los metales oxidados y al sistema de lixiviación y cianuración combinados para los metales sulfurados (Gálvez, 1922).

2.9 Estudios Ambientales en la Región

Carrillo y Drever (1998) realizaron una valoración ambiental del potencial de lixiviación del arsénico proveniente de los residuos mineros hacia las aguas subterráneas. En dicho estudio,

destacan que existen más de 800,000 toneladas de residuos mineros dispersos en los 400 km² del área de San Antonio - El Triunfo, con un contenido promedio de 4% de As. Los residuos mineros fueron clasificados como: a) jales oxidados, b) mineral de baja ley, c) terreros gastados de la pila de lixiviación y d) productos derivados de las antiguas plantas de procesamiento, principalmente trióxido de arsénico (arsenolita, As₂O₃).

Reportan que existen cerca de 600 toneladas de arsenolita en las ruinas de por lo menos tres antiguas plantas de procesamiento cuyas cámaras están parcialmente llenas. El material de las plantas de procesamiento contiene, además de As, Fe, Zn, Cu, Pb y S en pequeñas cantidades. El resto de las muestras de los diferentes jales que contienen As presentan una mineralogía compleja dominada por cuarzo, feldespato, calcita, clorita, illita y óxidos de hierro. Todas las muestras presentaron una cantidad significativa de As.

Los análisis químicos y mineralógicos realizados en el estudio en cuestión indican que existe un potencial de liberación de As y Zn al ambiente en su mayoría proveniente del transporte de los jales que representan el principal material de residuos mineros en el área. Se considera que el As liberado a las aguas subterráneas podría estar en un intervalo de entre 0.5 y 2.1 mg·L⁻¹.

En dicho estudio, el análisis realizado a las aguas subterráneas de la zona indica valores de As en un intervalo de entre 0.4 y 1.5 mg·L⁻¹ y un contenido de Zn de 0.20 mg·L⁻¹, por lo que se considera que existe una marcada relación entre el As detectado en el agua subterránea y los lixiviados de los residuos mineros.

Carrillo *et al.*, (2000) realizaron un estudio del contenido de As y geoquímica del agua subterránea de los acuíferos San Antonio – El Triunfo, Carrizal y Los Planes concluyendo que las concentraciones de As en el agua subterránea varían de 0.01 a 0.41 ppm, que las concentraciones más elevadas se ubicaron en el área de San Antonio y las más bajas en La Paz, Los Planes y Salto, que la tendencia general del agua subterránea es un decremento en las concentraciones de As conforme aumenta la distancia del área mineralizada y que los análisis y modelación de la evolución geoquímica del agua subterránea indica que, a lo largo del camino de la zona mineralizada hacia los acuíferos Carrizal y Los Planes, los procesos más probables son dilución del

agua subterránea, adsorción de As en las superficies de hidróxido de hierro y precipitación de calcita.

Naranjo – Pulido *et al.*, (2002) realizaron un estudio de contaminación de suelos por As en el Distrito Minero SA-ET en el cual se reporta que los suelos estudiados presentaron valores de pH de prácticamente neutros a ligeramente básicos (6.9 – 7.9) y que las mayores concentraciones de As ($20.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) se encontraron a una profundidad de 15 a 30 cm en un perfil ubicado en San Antonio. Señalan que San Antonio tiene los mayores porcentajes en concentraciones de As debido a la presencia de la mina San Juanes, la cual es más reciente que otras minas de El Triunfo.

Consideran que existen varios factores o patrones que podrían determinar la distribución del As en el suelo como la edad de los residuos, la precipitación pluvial y el viento.

Volke – Sepúlveda *et al.*, (2003) realizaron la caracterización de residuos provenientes de actividades mineras de los distritos SA-ET y Santa Rosalía. En la región de El Triunfo, confirmaron la presencia de altas concentraciones de As (hasta $34,456 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en las muestras de jales y cenizas, Cd (hasta $313 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en cenizas, Zn y Sb en cantidades importantes en las muestras de colas de cianuración, cenizas y jales, así mismo, en todas las muestras provenientes de los residuos del proceso de extracción de Ag, se detectaron concentraciones de Pb que exceden hasta en 400 veces los límites máximos permisibles para uso de suelo residencial. Determinaron que en algunas muestras de colas de cianuración y de cenizas el contenido de Pb y Cd en lixiviados es elevado (hasta 15.21 y $1.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ respectivamente).

En cuanto a los análisis a los suelos, mencionan que no se observó ninguna evidencia de deposición de material contaminado sobre ellos, sin embargo, la concentración de la mayoría de los metales analizados es similar, y en ocasiones mayor, que las encontradas en muestras de jales y cenizas, lo cual puede deberse a la mineralogía propia de la zona o a un arrastre de contaminantes por factores como el viento.

Posada – Ayala (2011) realizó un estudio con el fin de identificar el impacto antropogénico en la cuenca hidrológica de San Juan de Los Planes y la plataforma de Bahía La Ventana.

Mediante cuatro campañas de muestreo, durante los meses de mayo y noviembre de 2009, colectó muestras de sedimento fluvial de hasta 10 cm de profundidad para análisis granulométrico y muestras de trincheras perpendiculares a los sistemas de flujo con 1 cm de profundidad para análisis químicos. Para la Cuenca de San Juan de Los Planes obtuvo muestras de sedimento superficial del lecho de algunos arroyos para análisis químicos, así mismo, obtuvo muestras de desechos de minería y fundición de la región de San Antonio, específicamente residuos de las paredes internas de cámaras de sublimación, depósitos de jales y terreros con escorias del minado, para el mismo fin.

Llevó a cabo un muestreo de sedimentos a lo largo del lecho del arroyo San Antonio a cada kilómetro desde su nacimiento hasta su desembocadura, donde también tomó muestras de playa y duna. Finalmente, en la parte marina, colectó 31 muestras de sedimento superficial de la plataforma. En la Figura 2.6 se muestra la ubicación de las muestras colectadas en este estudio.



Figura 2. 6. Mapa de muestreo. Tomado de Posada-Ayala (2011).

Se concluye que las concentraciones de As en los desechos de minería y fundición cercanos al poblado de San Antonio, están muy por arriba de las concentraciones de la corteza continental

superior ($2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Las concentraciones altas de As observadas en el arroyo San Antonio evidencian que en los primeros 7 km la planta de fundición está abasteciendo de este elemento a los sedimentos del arroyo con valores de 476 a $10,754 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, así mismo, en la época de huracanes y tormentas tropicales los sedimentos con altas concentraciones de arsénico viajan a lo largo del arroyo, por aproximadamente 17 km río abajo, y se depositan en la planicie de inundación que abarcan los últimos 6.5 km del arroyo (parte más baja), donde las concentraciones fluctúan entre 7.5 y $318 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, hasta llegar a la plataforma continental de Bahía La Ventana.

Con respecto al Pb, los desechos de minería y fundición tienen valores mayores a los de la corteza continental superior ($17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), tales valores fluctúan entre 6 y $12,100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con un promedio de $2653 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. El arroyo San Antonio tiene concentraciones con intervalos de 4.5 y $938 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, donde para la mayoría de las estaciones de muestreo se sobrepasa el valor de la corteza continental superior. Los contenidos más altos se observan en las muestras cercanas al área de fundición.

Por otro lado, Magdaleno – Rico (2014) realizó un estudio de la peligrosidad de los residuos históricos del Distrito Minero SA-ET así como una evaluación de drenaje ácido por pruebas estáticas.

Su muestreo consistió en un total de 46 muestras, de las cuales 40 corresponden a terreros, 5 a cenizas de las chimeneas Los San Juanes y La Ramona y un jal.

En los análisis que realizó a dichas muestras se observa que los terreros presentan valores de pH que varían entre 3.3 y 8.73; las cenizas, entre 3.09 y 5.68 y la muestra de jal presenta un pH de 6.36. Los valores de pH fueron analizados con el fin de identificar el potencial de generación de drenaje ácido. Se determinó que aquellos residuos que se presentan valores de pH por debajo de 4 actualmente tienen un potencial de generación de drenaje ácido. Para aquellos que presentaron valores de pH mayores a 4, se realizó una prueba de Balance Ácido – Base en la que determinó que la única muestra que tiene potencial de generación de drenaje ácido es la muestra de jal.

En la Figura 2.7, se presenta la distribución de los residuos muestreados y su clasificación de acuerdo al tipo de residuo y a los valores de pH.

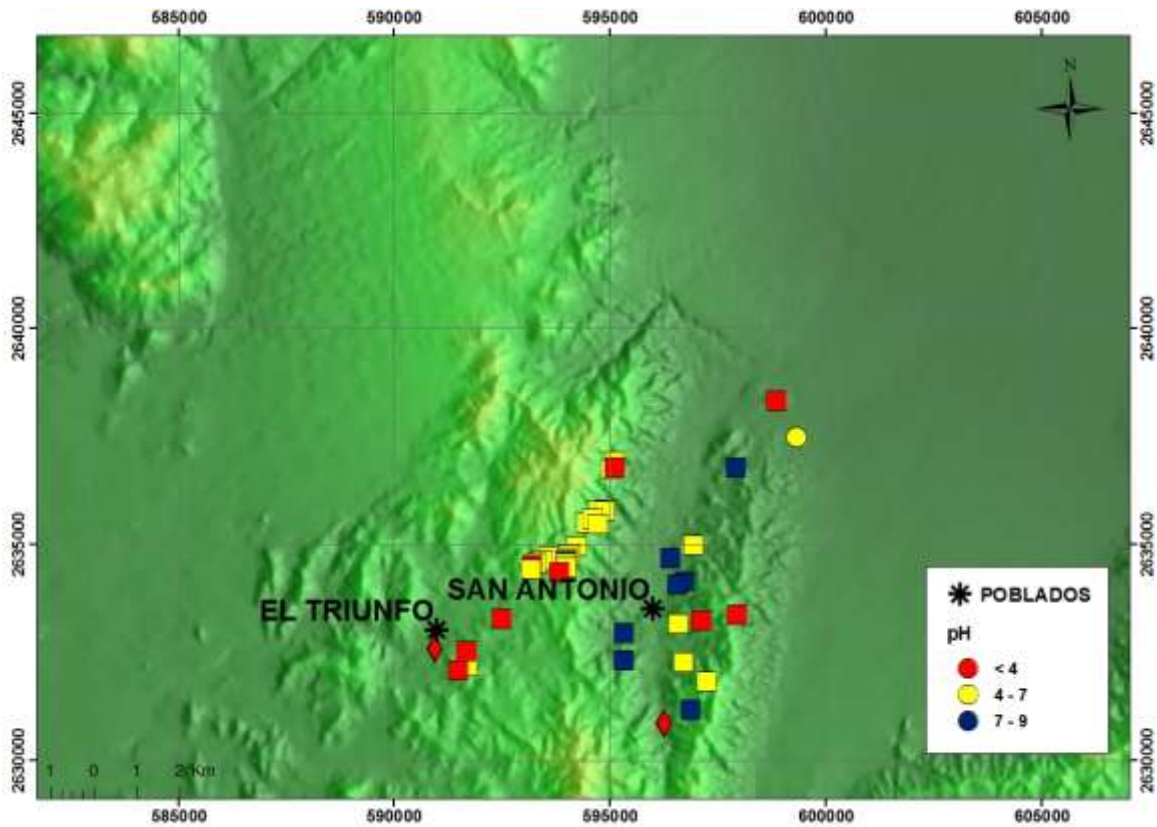


Figura 2. 7. Distribución y clasificación de los residuos con base en los valores de pH y tipo de residuo (terreros – cuadros, cenizas – rombos y jales – círculo). Tomado de Magdaleno - Rico (2014).

Así mismo, analizó la concentración total de EPT normados y no normados por medio de concentraciones totales. Los elementos analizados fueron: Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Zn, Va, y Cu. Determinó que las concentraciones de As, Sb, Cd, Pb y Cr superan el límite máximo permisible establecido en la NOM-157-SEMERNAT-2009, mientras que las del Hg y Se están por debajo de dicho límite. De igual manera, determinó altas concentraciones de Zn, Va y Cu lo que le permite considerar a estos residuos como un material peligroso.

Se reportó que la mayor concentración de As se presenta en las cenizas en concentraciones que varían entre 415,130 y 480,093 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que para los terreros y jal varían entre 4,527 y 96,829 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Respecto a la geodisponibilidad de los EPT, realizó estudios en muestras seleccionadas para los EPT regulados en la NOM-157-SEMARNAT-2009 y algunos no regulados. Los resultados obtenidos

mostraron que sólo las cenizas presentan valores por arriba de los límites máximos permisibles establecidos en dicha norma en elementos como As, Cd y Sb, por lo cual los considera como residuos tóxicos.

En las muestras de terreros y jales, las concentraciones lixiviables de EPT normados son inferiores a los límites máximos permisibles. Considera que esto se debe a que se encuentran en forma de compuestos químicamente estables.

3. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE CONTAMINACIÓN EN ZONAS MINERAS

3.1 Zonas mineras en México

México es un país con una gran riqueza mineral. Su tradición minera se remonta a la época prehispánica. En esta época se practicaba la minería y metalurgia en las zonas que actualmente son conocidas como: Taxco, Guerrero; la Cuenca del Río Balsas, la Sierra de Querétaro, Oaxaca y Chiapas. Durante el siglo XIX, se fundaron ciudades cerca de las zonas mineras entre las que se encuentran Durango, Chihuahua, Guanajuato, Saltillo, San Luis Potosí y Zacatecas (Cortinas y Ordáz, 1994). Para la época de la colonia, la minería se convirtió en el motor del crecimiento económico (Volke – Sepúlveda *et al.*, 2005).

Basados en datos del INEGI (2010), los principales productos explotados en México son: metales preciosos (Au y Ag), metales industriales no ferrosos (Pb, Cu y Zn), metales y minerales siderúrgicos (carbón mineral y Fe) y minerales no metálicos (fluorita, arena sílica y sal). Los principales estados productores de metales preciosos y metales industriales no ferrosos se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Principales productores de metales preciosos y materiales industriales no ferrosos.

| Au | Ag | Pb | Cu | Zn |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------------|
| Durango | Chihuahua | Chihuahua | Sonora | Chihuahua |
| Guanajuato | Durango | Zacatecas | Zacatecas | San Luis Potosí |
| Querétaro | Guanajuato | | | Zacatecas |
| Sinaloa | Hidalgo | | | |
| Sonora | Sonora | | | |
| | Zacatecas | | | |

Entre los tipos de yacimiento que han sido explotados destacan los epitermales (Taxco, Guanajuato, Pachuca, Zacatecas, Santa Bárbara, etc.), los de metasomatismo de contacto o skarn (Charcas, Zimapán, La Paz, San Martín, etc.), los sulfuros masivos vulcanogénicos (Tizapa, Rey de

Plata, etc.) y yacimientos del tipo pórfido cuprífero (La Caridad, Cananea, etc.) (Romero y Gutiérrez, 2010).

En la Figura 3.1, se presenta la distribución de las provincias metalogenéticas de la República Mexicana correspondientes a los principales productos explotados.

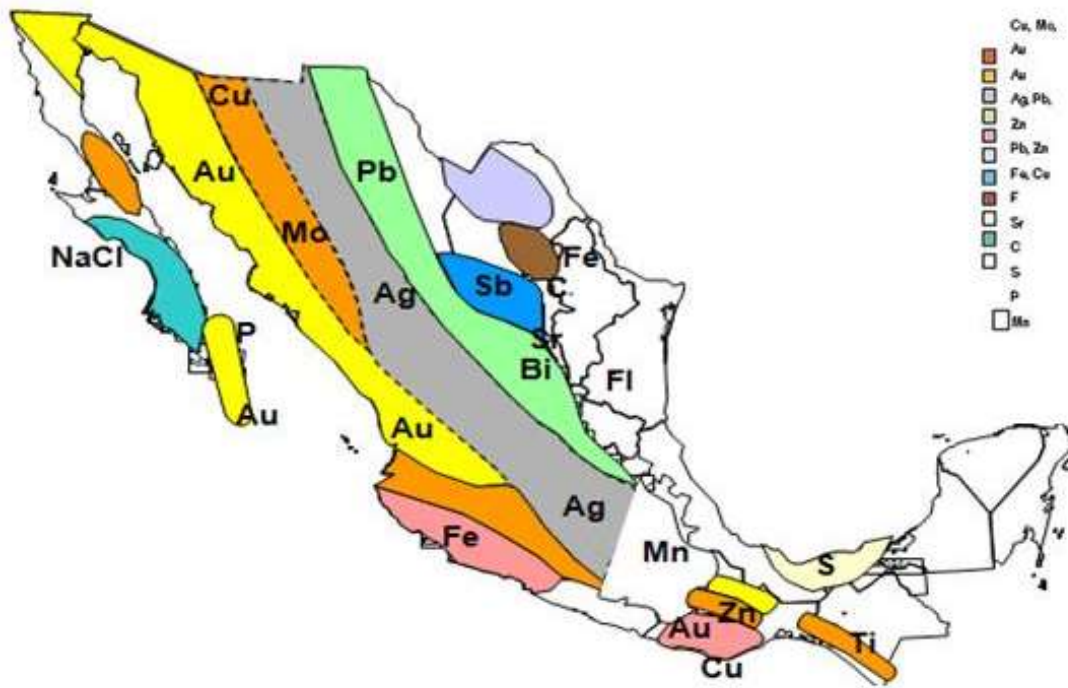


Figura 3. 1. Mapa de provincias metalogenéticas de la República Mexicana. Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2011.

3.2 Residuos mineros: fuente de contaminación en zonas mineras

Si bien la minería es una de las industrias con mayor antigüedad y utilidad para el hombre (Gutiérrez y Moreno, 1995), se estima que genera el 65% de los residuos industriales que se producen en México (Mejía *et al.*, 1999). Antiguamente, los residuos no habían tenido algún tipo de manejo ambiental y, en general, eran abandonados en patios industriales, barrancas y espacios abiertos lo que les proporcionó la posibilidad de ser transportados por viento y/o agua afectando los cuerpos de agua, los suelos y finalmente la salud de la población (Posada – Ayala, 2011).

Históricamente, los problemas ambientales que ha traído consigo la industria minera en México se pudieron haber generado desde las minas prehispánicas de la Sierra Gorda, los jales de la época colonial de Pachuca, Taxco, Guanajuato, Zacatecas, etc. Pero es en la actualidad que, con el aumento de la población y la explotación generalizada de los recursos naturales, se ponen en evidencia (Gutiérrez y Moreno, 1995).

Aun no existe información suficiente para conocer el impacto ambiental que ha causado la minería en México, sin embargo, se reconoce que es significativo y mayor que el de otras ramas industriales (Gutiérrez y Moreno, 1995).

La NOM-157-SEMARNAT-2009 establece que “la minería es una actividad que se caracteriza por su alto volumen de generación de residuos los cuales pueden constituir un riesgo a la salud y al medio ambiente, en caso de ser manejados de manera inadecuada”.

El avance tecnológico en la industria minera mundial introdujo en México, a inicios del siglo XX, procesos metalúrgicos que permitieron explotar mayores volúmenes de mineral con valor comercial, sin embargo, se generó una mayor cantidad de residuos (Romero y Gutiérrez, 2010). En los yacimientos minerales, la especie de interés económico (mena) se encuentra unida a una parte sin interés económico (ganga) (Volke – Sepúlveda *et al.*, 2005). Esta mezcla es sometida a diferentes procesos físicos y químicos que permiten su separación.

Se sabe que la explotación de yacimientos y beneficio de minerales puede causar algún impacto negativo al entorno (Cortinas y Ordáz, 1994), sin embargo, es necesario realizar una clasificación del tipo de residuo para conocer el grado de peligrosidad que presenta. Con base en la NOM-157-SEMARNAT-2009, la composición de los residuos de las actividades mineras puede variar de acuerdo con la mineralogía del yacimiento y el proceso de beneficio utilizado.

El conjunto de obras realizadas para iniciar la extracción del mineral con valor económico del yacimiento, tanto a cielo abierto como subterráneas, se conoce como minado (NOM-157-SEMARNAT-2009) y se compone de varias etapas que son:

a) Explotación

Es la etapa en la cual se realizan las obras y trabajos destinados a la preparación y desarrollo del área que comprende el depósito mineral, así como los encaminados a desprender y extraer los productos minerales o sustancias existentes en el mismo (NOM-157-SEMARNAT-2009). En esta etapa, se realiza la transformación necesaria del ambiente para los objetivos mineros: construcción y obras diversas como son: remoción de la roca que cubre el mineral (descapote), obras de acceso al mineral (rampas, tiros, socavones), instalaciones auxiliares (talleres, planta de beneficio, oficinas, etc.), caminos e instalaciones para el almacenamiento de residuos (Cortinas y Ordáz, 1994).

Algunos de los residuos generados durante esta etapa son los terreros de material estéril (roca que cubre al yacimiento mineral y que no es de interés) y terreros de mineral marginal (mineral con baja ley que se almacena temporalmente) (NOM-157-SEMARNAT-2009).

b) Beneficio

Esta etapa comprende los trabajos para preparación, tratamiento, fundición de primera mano y refinación de productos minerales, en cualquiera de sus fases, con el propósito de recuperar u obtener minerales o sustancias, al igual que elevar la concentración y pureza de sus contenidos (NOM-157-SEMARNAT-2009). Durante esta etapa, generalmente se realiza una reducción de tamaño del mineral mediante la trituración y molienda (Cortinas y Ordáz, 1994). Posterior a la molienda, se lleva a cabo el proceso de concentración mediante el cual se separan los minerales de mena y ganga.

Entre los residuos que se generan durante la etapa de concentración se encuentran los jales que son residuos de granulometría fina producidos durante el proceso de beneficio de yacimientos minerales sulfurados por flotación selectiva (Romero *et al.*, 2008) y las escorias que son los residuos provenientes de las operaciones de fundición por la acción química y la fusión, a través de la combinación de fundentes (carbonatos y silicatos) con la ganga o porción sin valor del mineral (NOM-157-SEMARNAT-2009).

c) Refinación

Esta etapa comprende el uso de hornos industriales para obtener metales y sus aleaciones hasta conformarlos como materias primas para uso industrial, así como la eliminación de impurezas en los metales obtenidos para alcanzar una alta ley de contenido.

Entre los residuos que se generan durante esta etapa se encuentran las cenizas que quedan como remanente en los hornos de fundición.

Uno de los principales minerales explotados en México es el oro (Au) que frecuentemente se encuentra asociado a la pirita o a minerales sulfurosos. El proceso de refinación comúnmente utilizado para separar el oro de la mena refractaría consiste en moler la mena o tostarla a temperaturas que sobrepasan los 500 °C, con la finalidad de oxidar a los sulfuros. La tostación en pequeña y mediana escala genera dióxido de azufre (SO₂), no recuperable, el cual contamina el ambiente (Arias – Arce *et al.*, 2005).

En este contexto, en el Distrito Minero SA-ET, los valores principales extraídos corresponden a Au, Ag, Pb, Zn y As. Se utilizaron dos tipos de minas, uno mediante tajo a cielo abierto, y otro tipo fueron las minas subterráneas. La explotación se realizaba selectivamente en rebajes abiertos, dejando gran parte de mineral de baja ley como retajes, al interior de la mina. Los métodos de beneficio empleados incluyen: la amalgamación con Hg la cianuración y la fundición. En la década de los 50's, se utilizó el método combinado de concentración por medio pesado, flotación y fundición para tratar las minas de sulfuros (Volke – Sepúlveda *et al.*, 2003).

3.2.1 Problemática ambiental asociada a los residuos mineros

Según la etapa de minado, existe una problemática ambiental asociada. En la etapa de explotación, destacan los riesgos asociados la remoción del suelo y la vegetación (en minas a cielo abierto) y al almacenamiento de terreros. En la etapa de beneficio, la problemática es que la trituración y molienda pueden provocar ruido, vibración y emisión de polvo que son efectos de bajo impacto, pero también puede incluir la operación de presas de jales que pueden generar escurrimientos y arrastre de residuos minero-metalúrgicos peligrosos de alto impacto ambiental

así como la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores. Durante la etapa de refinación, los contaminantes que se producen se centran en las emisiones a la atmósfera, sin embargo, también se generan residuos peligrosos y aguas residuales (Cortinas y Ordáz, 1994).

La principal problemática ambiental de los residuos mineros está relacionada con la dispersión de los mismos al entorno y está determinada por las condiciones climáticas de la zona. En zonas áridas, la acción del viento puede originar un problema de propagación eólica, mientras que en zonas lluviosas el problema radica en la lixiviación o escurrimientos superficiales originando una dispersión hídrica. Para el caso de zonas con clima semiseco, seco y semicálido, en donde los valores de evaporación son mayores a los de precipitación, los fenómenos de infiltración y escorrentía pueden ser mínimos o nulos, este fenómeno puede suscitar la formación de sales que son muy solubles y que son fácilmente lavables.

Entre los riesgos asociados a la dispersión de los residuos se encuentran:

a) Elementos potencialmente tóxicos (EPT)

Los residuos mineros, que provienen de la explotación de yacimientos de metales base y de metales preciosos, contienen cantidades variables de sulfuros metálicos como la pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$) galena (PbS) esfalerita (ZnS) calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS), que son la fuente de EPT como: As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, entre otros (Romero *et al.*, 2008).

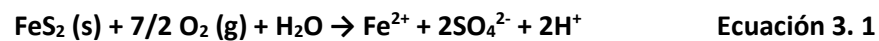
De los EPT comúnmente reportados en la industria minera el Fe, Zn y Cu son elementos esenciales en la composición o funcionamiento de los organismos vivos, pero en altas concentraciones pueden causar efectos adversos (Gutiérrez *et al.*, 2007). Por otra parte, el As, Cd, Pb y Hg se conocen como los elementos químicos más tóxicos en la naturaleza, no se les conoce alguna función biológica y, aún en concentraciones bajas, pueden contaminar los ecosistemas provocando efectos nocivos para los organismos vivos (Gutiérrez *et al.*, 2007). El As es considerado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) como un cancerígeno humano (Joo - Sung, 2005).

b) Drenaje ácido

De acuerdo a la NOM-157-SEMARNAT-2009 el drenaje ácido es el lixiviado, efluente o drenaje contaminante que ha sido afectado por la oxidación natural de minerales sulfurosos contenidos en rocas o residuos expuestos al aire, agua y/o microorganismos promotores de la oxidación de sulfuros.

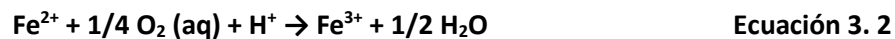
El drenaje ácido se genera por la oxidación de los sulfuros metálicos y consiste en una disolución que se caracteriza por tener valores bajos de pH y altas concentraciones de EPT disueltos que, al transportarse, puede provocar contaminación de suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas. Algunos factores importantes que influyen en la generación del drenaje ácido son el geológico, la mineralogía del yacimiento y la roca encajonante (Romero *et al.*, 2008).

De acuerdo a Martínez – Soria (2011), al exponer a la intemperie a los sulfuros metálicos provenientes de yacimientos minerales formados en condiciones reductoras, se favorecen los procesos de oxidación; con la subsecuente generación de acidez (generación de protones H⁺) y liberación de EPT a las fases acuosas. El sulfuro que más comúnmente acompaña a los minerales de interés económico es la pirita (FeS₂) y su reacción de oxidación se escribe de la siguiente forma.



Los productos de la oxidación de la pirita son Fe²⁺ disuelto, sulfatos (SO₄²⁻) y protones (H⁺), que es la medida de la acidez generada.

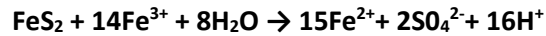
En presencia de suficientes especies oxidantes, ocurre la reacción 3.2



Si las condiciones de acidez lo permiten (pH superior a 3.5) se precipita el hidróxido férrico, que es lo que le da el color amarillo-café a los jales o rocas oxidadas.



Algunos cationes férricos que no precipitan, pueden seguir oxidando adicionalmente la pirita:



Ecuación 3. 4

Para que ocurra la oxidación en los jales es necesario que contengan sulfuros metálicos reactivos y que existan las condiciones climáticas apropiadas (agua o atmósfera húmeda); por lo que la oxidación es generalmente muy limitada durante la operación y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo. Es importante resaltar que la presencia de sulfuros metálicos no siempre genera drenaje ácido, ya que esta tendencia queda en función del balance entre minerales que son productores potenciales de drenaje ácido (sulfuros metálicos) y minerales que son potencialmente consumidores de acidez (carbonatos, hidróxidos, aluminosilicatos). El proceso en el cual se consume ácido se denomina neutralización; a grandes rasgos, la neutralización ocurre cuando los minerales consumidores de acidez (Potencial de Neutralización) están en igual proporción a los minerales generadores de acidez (Potencial de Acidez) (Romero *et al.*, 2008).

El desarrollo de otros procesos geoquímicos y físicos también tiene la capacidad de controlar la acidez, la movilidad y la dispersión de los EPT en los depósitos de jales. La disolución y alteración de algunos minerales como calcita, wollastonita, gibsita, goetita, feldespatos, entre otros, involucra el consumo de protones, lo que contribuye de manera importante en el proceso de neutralización. Los oxihidróxidos de hierro tienen una gran capacidad para la sorción y coprecipitación de arsénico y metales pesados. Se reporta que la sorción de los EPT en los oxihidróxidos y la precipitación de minerales secundarios como anglesita, beudantita y escorodita, son controles importantes de su movilidad (Romero *et al.*, 2008).

3.3.2 Afectación de suelos y sedimentos debido a la dispersión de los residuos mineros

a) Contaminación de suelo y sedimentos

Antiguamente era común que los residuos mineros fueran depositados en las cercanías de las minas en sitios topográficamente bajos sin considerar medidas de protección ambiental (Romero y

Gutiérrez, 2010). La disposición inadecuada de los residuos mineros sumada a la acción del viento y la lluvia ha generado la contaminación de suelos y sedimentos por medio de la dispersión eólica de sustancias que contienen EPT (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

La contaminación de suelos y sedimentos con EPT es reconocida actualmente como un problema importante a nivel mundial, ya que puede representar un riesgo para la salud humana y para los ecosistemas en general; por lo que, el conocimiento de la distribución espacial de los contaminantes, en el suelo y sedimento, es fundamental para la gestión ambiental y toma de decisiones. Para lograr conocer la distribución espacial de los EPT es necesario realizar estudios geoquímicos que permitan identificar el peligro y riesgo que representan para el ambiente y salud humana.

La composición química y estructura física de los suelos y sedimentos están determinados por el tipo de roca de la cual se origina, el clima, la cubierta vegetal, el grado de intemperismo y la topografía (Gutiérrez *et al.*, 2007), por lo que son característicos del sitio al que pertenecen.

b) Caracterización de suelos contaminados con base en la normatividad ambiental mexicana

La Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 es la norma que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación del suelo contaminado por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

Esta norma presenta diferentes alternativas para determinar la concentración objetivo a la cual se debe remediar un suelo. Una de ellas indica que, para identificar y delimitar los suelos contaminados, se deben determinar las concentraciones totales de EPT en el suelo evaluado. Si las concentraciones de EPT del medio estudiado superan los valores de referencia de dicha NOM (Tabla 3.2), estas pueden representar un riesgo al ambiente o a la salud.

Tabla 3. 2. Concentraciones de referencia totales establecidas por la NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004.

| Contaminante | Uso agrícola / residencial / comercial (mg·kg ⁻¹) | Uso industrial (mg·kg ⁻¹) |
|-------------------|---|--|
| Arsénico | 22 | 260 |
| Bario | 5400 | 67000 |
| Berilio | 150 | 1900 |
| Cromo Hexavalente | 37 | 450 |
| Cadmio | 280 | 510 |
| Mercurio | 23 | 310 |
| Níquel | 1600 | 20000 |
| Plata | 390 | 5100 |
| Plomo | 400 | 800 |
| Selenio | 390 | 5100 |
| Talio | 5.2 | 67 |
| Vanadio | 78 | 1000 |

La NOM-147 también señala que los EPT pueden estar presentes en los suelos y sedimentos de manera natural por lo que es importante establecer criterios que permitan diferenciar la contaminación antropogénica de la natural. Debido a esto, es necesario determinar los valores naturales de fondo (VNF) de los EPT en la región donde se ubique el área de estudio a fin de que sirvan como niveles de referencia de la contaminación natural (Gutiérrez *et al.*, 2007).

Sin embargo, la sola presencia de los EPT en los suelos y sedimentos en altas concentraciones no es un suficiente para establecer la existencia de riesgo. Es necesario que los EPT se encuentren en formas disponibles a fin de que puedan lixiviarse y contaminar otros medios abióticos o ser absorbidos por los organismos vivos. La ocurrencia o no de efectos adversos dependerá de las condiciones específicas de los suelos evaluados.

Una vez identificados los suelos contaminados se procede a valorar el riesgo, lo que conlleva a obtener datos para calcular las concentraciones específicas de remediación, considerando las características propias del sitio y las formas en que los EPT estén presentes en los suelos evaluados, especialmente en cuanto a la disponibilidad para que puedan lixiviarse y contaminar otros medios abióticos o para ser absorbidos por los organismos vivos del suelo.

De acuerdo a la NOM-147, cuando no hay población humana expuesta, se puede llevar a cabo una evaluación de riesgo ambiental para aquellos elementos que contaminan el suelo o medir la fracción soluble o concentración geodisponible. Pero cuando hay población humana expuesta, hay que valorar el riesgo a la salud, que implica determinar las concentraciones biodisponibles de EPT.

El texto de la NOM-147 indica que “las concentraciones solubles tienen como fundamento científico el que la fracción geodisponible, que en este documento se le denomina “soluble”, corresponde a iones solubles y/o partículas de tamaño pequeño (<0.45 micrómetros), que pueden moverse a través de los poros del suelo y subsuelo, y representar un riesgo potencial para los cuerpos de agua y por lo tanto al medio ambiente”.

En el caso en que las concentraciones solubles del suelo estudiado superen las concentraciones de referencia solubles (Tabla 3.3); la concentración específica (límite de remediación) se determina aplicando la siguiente fórmula:

$$CE_s = CR_s + CF_s$$

CE_s = concentración específica con base en la fracción soluble

CR_s = concentración de referencia soluble señalada en la Tabla 3.3

CF_s = concentración soluble en las muestras de fondo

La concentración soluble se determina de acuerdo a la metodología descrita en el apéndice normativo “B”, que, en síntesis, consiste en determinar la concentración de los contaminantes en extractos obtenidos a través de suspensiones de las muestras sólidas homogenizadas con agua en equilibrio con la atmósfera (relación sólido(g): agua(ml) 1:20); las cuales se agitan durante 18 horas y se filtran con membranas de 0.45µm; de tal manera que se determina tanto los iones solubles como las partículas finas de diámetro inferior a 0.45µm, que estarían disponibles para su movilización y transporte para contaminar otros medios abióticos.

Tabla 3. 3. Concentraciones de referencia solubles establecidas por la NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004.

| Contaminante | Concentración (mg·L⁻¹) |
|---------------------|--|
| Arsénico | 0.500 |
| Bario | 10.000 |
| Berilio | 0.122 |
| Cadmio | 0.100 |
| Mercurio | 0.020 |
| Níquel | 1.100 |
| Plata | 0.500 |
| Plomo | 0.500 |
| Selenio | 0.100 |
| Talio | 0.020 |
| Vanadio | 0.160 |

Las concentraciones biodisponibles corresponden a la fracción de la concentración total que puede desorberse, disolverse o disociarse de la matriz del suelo, de manera que esté disponible para la absorción por la flora y la fauna terrestre (US-DDF, 2003).

La biodisponibilidad de los EPT en suelos se determina en experimentos utilizando animales “in vivo”, lo que requiere de grandes inversiones de tiempo y dinero (Basta *et al.*, 2000; US-DDF, 2003); por lo que se han desarrollado métodos “in vitro” para determinar la biodisponibilidad. A la biodisponibilidad determinada “in vitro” se le denomina bioaccesibilidad (Ruby *et al.*, 1993).

La bioaccesibilidad consiste en determinar la disponibilidad de los EPT en extractos que simulen los jugos gástricos o gastrointestinales de humanos. Se han propuesto varios métodos para determinar la bioaccesibilidad, entre los que destacan el denominado SBRC (por las siglas en inglés de “Consortio de Investigación sobre Solubilidad y Biodisponibilidad”) que fue diseñado para determinar la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, cadmio y níquel. Esta prueba consiste en la extracción de los contaminantes solamente en la fase gástrica, pH 1.5 (Drexler y Brattin, 2007). Es importante señalar que este es el método indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT /SSA1-2004, para determinar la bioaccesibilidad del Pb en suelos contaminados.

De acuerdo a los criterios de la NOM-147, una vez obtenida la bioaccesibilidad en las muestras de suelos; las concentraciones específicas de remediación se calculan con la siguiente fórmula:

$$CE_T = \frac{CR_T}{BA}$$

CE_T = concentración específica total con base en riesgo a la salud ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

CR_T = concentración de referencia total en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tabla 3.2)

BA = factor de bioaccesibilidad (Tabla 5.14)

4. METODOLOGÍA

4.1 MUESTREO

El muestreo fue realizado durante el periodo comprendido entre el 5 y el 10 de septiembre de 2012.

El plan de muestreo se elaboró de tal forma que se cubrieran aquellas zonas en las cuales se considera que pudiera existir una afectación por la dispersión de los residuos mineros históricos. De esta forma, se realizó un muestreo de fondo y un muestreo exploratorio que incluye muestreo superficial y muestreo vertical o subsuperficial.

Se colectaron un total de 128 muestras de suelos con la distribución que se describe a continuación:

- 12 muestras de fondo.
- 57 muestras superficiales.
- 59 muestras subsuperficiales.

4.1.1 Muestreo de fondo

El método utilizado para determinar la localización y distribución de las muestras de fondo fue a juicio de experto, de acuerdo a la NMX-AA-132-SCFI-2006. El objetivo de este muestreo fue obtener muestras representativas de los suelos no afectados de manera antropogénica y que son contiguos a la zona que se presume contaminada. De acuerdo a lo anterior, las muestras de fondo fueron colectadas en las zonas altas de la región, donde se presume que no existe afectación por la dispersión de los residuos mineros históricos.

Se colectaron muestras simples en cada punto a una profundidad de entre 0 y 5 cm a partir de la superficie.

La finalidad de este muestreo fue determinar los valores naturales de fondo (VNF) o concentraciones totales naturales locales de EPT que sirvieron de referencia y representación de los suelos no afectados.

En la Tabla 4.1, se presenta la relación de las muestras de fondo con las coordenadas y las claves correspondientes.

Tabla 4. 1. Relación de muestras de fondo.

| Coordenadas | | Clave de Mapa | Clave de Campo |
|-------------|---------|---------------|----------------|
| X | Y | | |
| 590749 | 2655897 | F1 | FSAT-1 |
| 585178 | 2649265 | F2 | FSAT-2 |
| 586331 | 2644026 | F3 | FSAT-3 |
| 586190 | 2640789 | F4 | FSAT-4 |
| 586676 | 2633571 | F5 | FSAT-5 |
| 588323 | 2628702 | F6 | FSAT-6 |
| 598174 | 2626153 | F7 | FSAT-7 |
| 604546 | 2627509 | F8 | FSAT-8 |
| 609412 | 2628074 | F9 | FSAT-9 |
| 619066 | 2635706 | F10 | FSAT-10 |
| 617950 | 2644294 | F11 | FSAT-11 |
| 617664 | 2649060 | F12 | FSAT-12 |

En la Figura 4.1, se muestran las imágenes fotográficas de las zonas en las que fueron colectadas las muestras de fondo. En ellas se puede observar que, como se mencionó anteriormente, estas muestras fueron tomadas en las regiones altas en las cuales se considera que no existe contaminación.



Figura 4. 1. Imágenes fotográficas de la zona de muestreo de fondo.

4.1.2 Muestreo superficial

El muestreo superficial se realizó en zonas de uso residencial y en zonas de uso indefinido. Para este muestreo se utilizaron dos métodos para determinar la localización y distribución de las muestras. Uno fue a juicio de experto y el otro fue el muestreo sistemático, de acuerdo a la NMX-132.

De acuerdo al tipo de drenaje hídrico que se presenta en la zona de almacenamiento de residuos, se considera que los escurrimientos que afectan a estos llegan a un colector principal que se dirige a la cuenca de San Juan de los Planes, debido a esto, la zona del colector principal y sus alrededores, considerada la zona con mayor afectación, se muestreó mediante el método de juicio de experto.

En las muestras colectadas en las zonas de uso residencial, también se realizó un muestreo a juicio de experto y en la cuenca de San Juan de los planes se realizó un muestreo sistemático con el fin de cubrir la mayor parte de la cuenca.

El objetivo de este muestreo fue obtener muestras de suelo representativas para establecer la presencia de contaminación y en su caso, la distribución horizontal de la misma.

Las muestras fueron colectadas en la zona de los poblados San Antonio y El Triunfo, la zona de almacenamiento de residuos y en la cuenca de San Juan de los Planes, desde la zona de almacenamiento de residuos hasta la costa de la Bahía La Ventana, aproximadamente 30 km aguas abajo.

Se colectaron muestras simples en cada punto a una profundidad de entre 0 y 5 cm a partir de la superficie.

En la Tabla 4.2, se presenta la relación de las muestras de superficiales con las coordenadas y las claves correspondientes.

Tabla 4. 2. Relación de muestras superficiales.

| Coordenadas | | Clave de Mapa | Clave de Campo |
|-------------|---------|---------------|----------------|
| X | Y | | |
| 602631 | 2644509 | E1 | ESAT-1 |
| 602738 | 2646372 | E2 | ESAT-2 |
| 602524 | 2648200 | E3 | ESAT-3 |
| 602738 | 2649956 | E4 | ESAT-4 |
| 602917 | 2651712 | E5 | ESAT-5 |
| 603059 | 2653862 | E6 | ESAT-6 |
| 614558 | 2653467 | E7 | ESAT-7 |
| 606380 | 2644509 | E8 | ESAT-8 |
| 606595 | 2646408 | E9 | ESAT-9 |
| 606880 | 2648128 | E10 | ESAT-10 |

| Coordenadas | | Clave de Mapa | Clave de Campo |
|-------------|---------|---------------|----------------|
| X | Y | | |
| 606666 | 2649884 | E11 | ESAT-11 |
| 607023 | 2651747 | E12 | ESAT-12 |
| 607166 | 2653683 | E13 | ESAT-13 |
| 614451 | 2651568 | E14 | ESAT-14 |
| 610273 | 2644509 | E15 | ESAT-15 |
| 610308 | 2646372 | E16 | ESAT-16 |
| 610558 | 2648271 | E17 | ESAT-17 |
| 610380 | 2649991 | E18 | ESAT-18 |
| 610701 | 2651712 | E19 | ESAT-19 |
| 610665 | 2653575 | E20 | ESAT-20 |
| 614343 | 2650027 | E21 | ESAT-21 |
| 614272 | 2648200 | E22 | ESAT-22 |
| 614165 | 2646193 | E23 | ESAT-23 |
| 614022 | 2644473 | E24 | ESAT-24 |
| 598454 | 2634896 | Z1 | ZSAT-01 0-5 |
| 599591 | 2635101 | Z2 | ZSAT-02 0-5 |
| 597262 | 2637670 | Z3 | ZSAT-03 0-5 |
| 599765 | 2637129 | Z4 | ZSAT-04 0-5 |
| 596458 | 2636873 | Z5 | ZSAT-05 0-5 |
| 599606 | 2639288 | Z6 | ZSAT-06 0-5 |
| 600176 | 2639515 | Z7 | ZSAT-07 0-5 |
| 600854 | 2642146 | Z8 | ZSAT-08 0-5 |
| 598744 | 2641256 | Z9 | ZSAT-09 0-5 |
| 601690 | 2640489 | Z10 | ZSAT-10 0-5 |
| 603658 | 2640514 | Z11 | ZSAT-11 0-5 |
| 601410 | 2643123 | Z12 | ZSAT-12 0-5 |
| 600353 | 2642876 | Z13 | ZSAT-13 0-5 |
| 595900 | 2632943 | S1 | SSAT-1 |
| 596154 | 2632928 | S2 | SSAT-2 |

| Coordenadas | | Clave de Mapa | Clave de Campo |
|-------------|---------|---------------|----------------|
| X | Y | | |
| 596023 | 2633066 | S3 | SSAT-3 |
| 596174 | 2633054 | S4 | SSAT-4 |
| 595900 | 2633245 | S5 | SSAT-5 |
| 596078 | 2633258 | S6 | SSAT-6 |
| 595898 | 2633460 | S7 | SSAT-7 |
| 596160 | 2633478 | S8 | SSAT-8 |
| 595787 | 2633569 | S9 | SSAT-9 |
| 595945 | 2633626 | S10 | SSAT-10 |
| 596045 | 2633901 | S11 | SSAT-11 |
| 590714 | 2632455 | S12 | SSAT-12 |
| 590579 | 2632655 | S13 | SSAT-13 |
| 590727 | 2632606 | S14 | SSAT-14 |
| 590806 | 2632600 | S15 | SSAT-15 |
| 590675 | 2632830 | S16 | SSAT-16 |
| 590871 | 2632785 | S17 | SSAT-17 |
| 591016 | 2632732 | S18 | SSAT-18 |
| 590868 | 2632860 | S19 | SSAT-19 |
| 591019 | 2632847 | S20 | SSAT-20 |

En la zona de los poblados San Antonio y El Triunfo, el uso de los suelos es residencial, por lo que se considera que en esta zona hay población humana expuesta, mientras que en las otras zonas muestreadas no se determinó un uso de suelo específico, por lo que se considera como una zona con uso de suelo indefinido y se puede concluir que no hay población humana expuesta.

En la Figura 4.2, se muestran las imágenes fotográficas de las zonas en las que fueron colectadas las muestras superficiales. Las imágenes a, b, c y d corresponden a las zonas de uso indefinido y las e, f, g y h corresponden a las zonas de uso residencial.



Figura 4. 2. Imágenes fotográficas de la zona de muestreo superficial. Se presentan las zonas de uso indefinido (a, b, c y d) y las zonas de uso residencial (e, f, g y h).

En la Figura 4.3, se aprecia la distribución de las muestras de fondo y las muestras superficiales de suelos de uso indefinido y de uso residencial. Así mismo, se puede observar la ubicación de los poblados y la localización de la zona de residuos mineros ubicada dentro del Distrito Minero SA-ET.

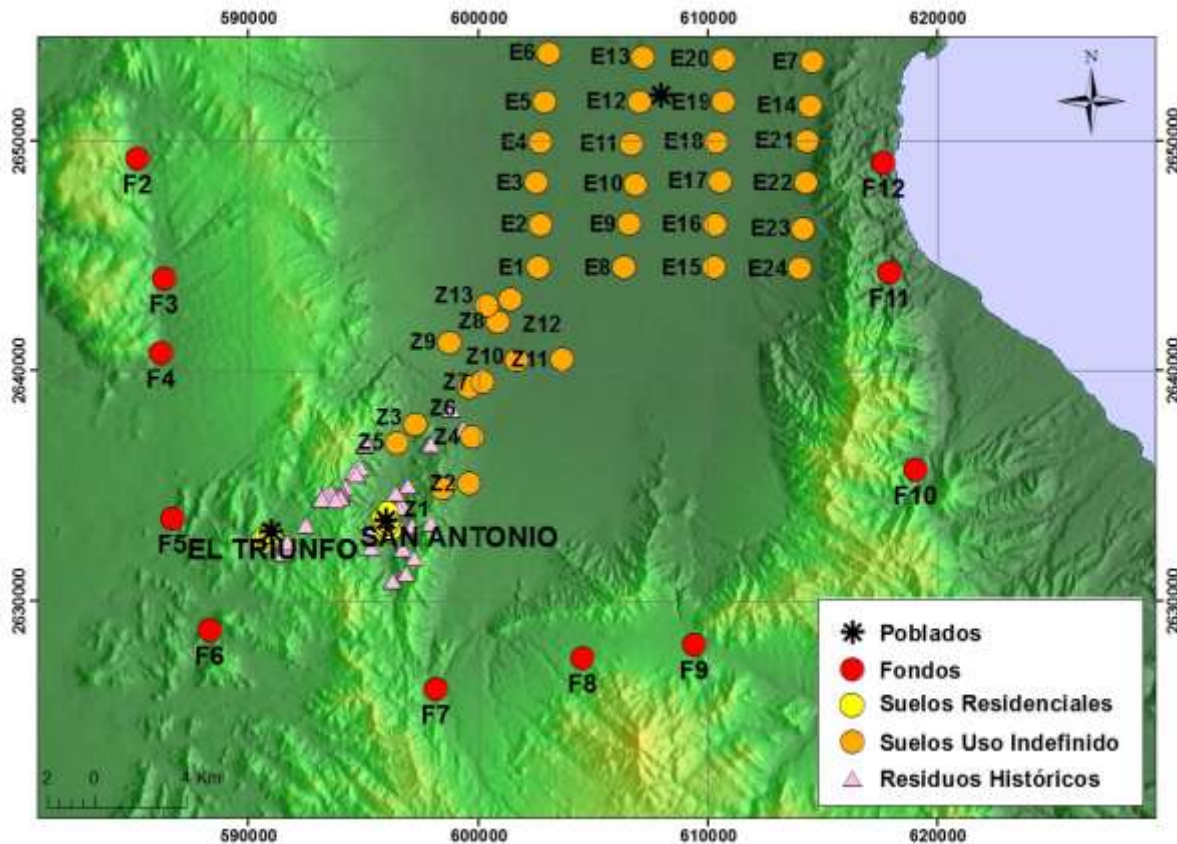


Figura 4. 3. Distribución de las muestras de fondo y muestras superficiales de la unidad minera San Antonio – El Triunfo.

Las Figuras 4.4 y 4.5 presentan una visión detallada de la ubicación de las muestras superficiales de los suelos de uso residencial colectadas en los poblados de San Antonio y El Triunfo respectivamente. En estas imágenes es posible apreciar que las muestras fueron colectadas muy cerca de las construcciones, entre las que se encuentran casas habitadas.

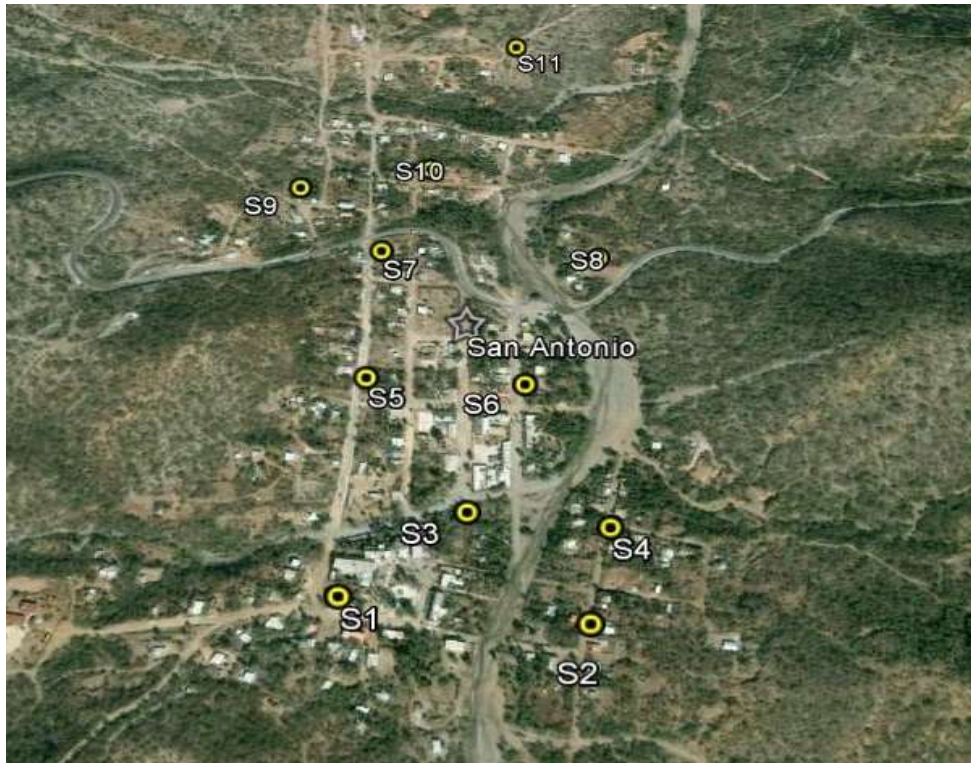


Figura 4. 4. Visión detallada de la distribución de las muestras superficiales en el poblado San Antonio.



Figura 4. 5. Visión detallada de la distribución de las muestras superficiales en el poblado El Triunfo.

4.1.3 Muestreo subsuperficial

El muestreo subsuperficial se realizó mediante el método de juicio de experto de acuerdo a la NMX-132 y fue realizado en la zona del colector principal y sus alrededores, desde la zona de residuos hasta una distancia en línea recta de entre 10 y 15 km aguas abajo en dirección a la Bahía La Ventana, presumiblemente la zona que ha sido mayormente afectada por la dispersión de los residuos.

Este muestreo se realizó en 13 perfiles de aproximadamente 2 m de profundidad, perforados con retroexcavadora. En cada perfil, se tomó una muestra simple por cada 50 cm de profundidad. El objetivo de estas muestras fue evaluar la migración vertical de los contaminantes.

En la Tabla 4.3, se presenta la relación de las muestras de subsuperficiales con las coordenadas y las claves correspondientes, tanto al perfil como a cada muestra. Así mismo, se señala la profundidad a la cuál fue tomada cada una de las muestra dentro de los perfiles. La profundidad se presenta en números negativos por considerarse una distancia por debajo de la superficie.

Tabla 4. 3. Relación de muestras subsuperficiales.

| Coordenadas | | Clave del Perfil | Clave de Mapa | Clave de Campo | Profundidad (cm) |
|-------------|---------|------------------|---------------|-----------------|------------------|
| X | Y | | | | |
| 598454 | 2634896 | ZSAT-1 | Z1 | ZSAT-01 5-50 | -5 |
| | | | Z1 | ZSAT-01 50-100 | -50 |
| | | | Z1 | ZSAT-01 100-150 | -100 |
| | | | Z1 | ZSAT-01 150-190 | -150 |
| | | | Z1 | ZSAT-01 190 | -190 |
| 599591 | 2635101 | ZSAT-2 | Z2 | ZSAT-02 5-50 | -5 |
| | | | Z2 | ZSAT-02 50-100 | -50 |
| | | | Z2 | ZSAT-02 100-150 | -100 |
| | | | Z2 | ZSAT-02 150-190 | -150 |
| | | | Z2 | ZSAT-02 190 | -190 |
| 597262 | 2637670 | ZSAT-3 | Z3 | ZSAT-03 5-50 | -5 |
| | | | Z3 | ZSAT-03 50-100 | -50 |
| | | | Z3 | ZSAT-03 100-150 | -100 |
| | | | Z3 | ZSAT-03 150-180 | -180 |

| Coordenadas | | Clave del Perfil | Clave de Mapa | Clave de Campo | Profundidad (cm) |
|-------------|---------|------------------|---------------|-----------------|------------------|
| X | Y | | | | |
| 599765 | 2637129 | ZSAT-4 | Z4 | ZSAT-04 5-50 | -5 |
| | | | Z4 | ZSAT-04 50-100 | -50 |
| | | | Z4 | ZSAT-04 100-150 | -100 |
| | | | Z4 | ZSAT-04 150-220 | -150 |
| | | | Z4 | ZSAT-04 220 | -220 |
| 596458 | 2636873 | ZSAT-5 | Z5 | ZSAT-05 5-50 | -5 |
| | | | Z5 | ZSAT-05 50-100 | -100 |
| | | | Z5 | ZSAT-05 roca | -100 |
| 599606 | 2639288 | ZSAT-6 | Z6 | ZSAT-06 5-50 | -5 |
| | | | Z6 | ZSAT-06 50-100 | -50 |
| | | | Z6 | ZSAT-06 100-150 | -100 |
| | | | Z6 | ZSAT-06 150-200 | -150 |
| | | | Z6 | ZSAT-06 200 | -200 |
| 600176 | 2639515 | ZSAT-7 | Z7 | ZSAT-07 5-50 | -5 |
| | | | Z7 | ZSAT-07 50-100 | -50 |
| | | | Z7 | ZSAT-07 100-150 | -100 |
| | | | Z7 | ZSAT-07 150-190 | -190 |
| 600854 | 2642146 | ZSAT-8 | Z8 | ZSAT-08 5-50 | -5 |
| | | | Z8 | ZSAT-08 50-100 | -50 |
| | | | Z8 | ZSAT-08 100-150 | -100 |
| | | | Z8 | ZSAT-08 150-188 | -188 |
| 598744 | 2641256 | ZSAT-9 | Z9 | ZSAT-09 5-50 | -5 |
| | | | Z9 | ZSAT-09 50-100 | -50 |
| | | | Z9 | ZSAT-09 100-150 | -100 |
| | | | Z9 | ZSAT-09 150-200 | -150 |
| | | | Z9 | ZSAT-09 200 | -200 |
| 601690 | 2640489 | ZSAT-10 | Z10 | ZSAT-10 5-50 | -5 |
| | | | Z10 | ZSAT-10 50-100 | -50 |
| | | | Z10 | ZSAT-10 100-150 | -100 |
| | | | Z10 | ZSAT-10 150-200 | -150 |
| | | | Z10 | ZSAT-10 220 | -220 |
| 603658 | 2640514 | ZSAT-11 | Z11 | ZSAT-11 5-50 | -5 |
| | | | Z11 | ZSAT-11 50-100 | -50 |
| | | | Z11 | ZSAT-11 100-150 | -100 |
| | | | Z11 | ZSAT-11 150-220 | -150 |
| | | | Z11 | ZSAT-11 220 | -220 |

| Coordenadas | | Clave del Perfil | Clave de Mapa | Clave de Campo | Profundidad (cm) |
|-------------|---------|------------------|---------------|-----------------|------------------|
| X | Y | | | | |
| 601410 | 2643123 | ZSAT-12 | Z12 | ZSAT-12 5-50 | -5 |
| | | | Z12 | ZSAT-12 50-100 | -50 |
| | | | Z12 | ZSAT-12 100-150 | -100 |
| | | | Z12 | ZSAT-12 150-220 | -150 |
| | | | Z12 | ZSAT-12 220 | -220 |
| 600353 | 2642876 | ZSAT-13 | Z13 | ZSAT-13 5-50 | -5 |
| | | | Z13 | ZSAT-13 50-100 | -50 |
| | | | Z13 | ZSAT-13 100-150 | -100 |
| | | | Z13 | ZSAT-13 150-180 | -180 |

En la Figura 4.6, se aprecia la ubicación de las zonas en las cuales fueron excavados los perfiles para coleccionar las muestras subsuperficiales.

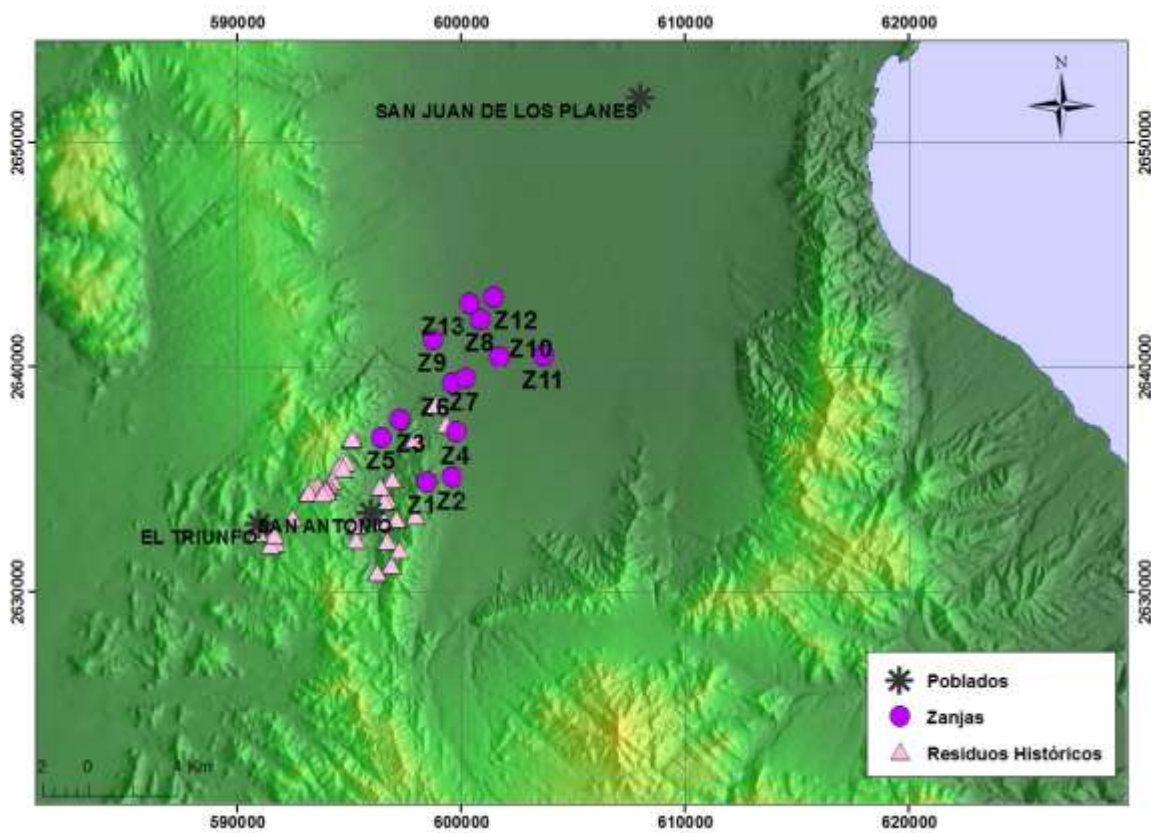


Figura 4. 6. Distribución de las zanjas en las que se tomaron las muestras sub-superficiales de la unidad minera San Antonio – El Triunfo.

En la figura 4.7, se presentan las imágenes fotográficas en las cuales se puede observar tanto la perforación de las zanjas como la toma de muestras subsuperficiales en los perfiles.



Figura 4. 7. Imágenes fotográficas de la zona de muestreo para las muestras sub-superficiales.

4.2 PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

La preparación de las muestras y los análisis de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (LAFQA) de la Facultad de Química, en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología y en el Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) del Instituto de Geofísica, todos pertenecientes a la Universidad Nacional Autónoma de México. Así como en los Laboratorios de Caracterización Analítica de Contaminantes del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA).

4.2.1 Preparación General de las Muestras

Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente, homogeneizadas y cuarteadas. La mitad de cada muestra fue tamizada por malla número 10 y la otra mitad fue guardada como muestra testigo.

4.2.2 Conductividad Eléctrica y pH

Para la obtención del pH y la conductividad eléctrica (CE) se prepararon suspensiones de las muestras homogeneizadas en una relación 1:5 sólido – agua destilada (g/ml). En el caso del pH, las suspensiones se agitaron durante una hora a una velocidad de 220 rpm, de acuerdo al método de la US-EPA 9045C, y se leyeron con un potenciómetro HI98185 PH/ORP/ISE Meter. En esta misma suspensión, una vez centrifugada, se determinó la conductividad eléctrica con un conductímetro Hanna HI99301 portátil, de acuerdo al método de la SSSA Book Series No.5 parte III (1996).

4.2.3 Evaluación del riesgo ambiental y a la salud humana

a) Concentración total de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

En todas las muestras, se cuantificó la concentración total de los principales elementos regulados por la Norma Oficial Mexicana NOM-147 mediante Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX), utilizando un equipo NITTON XLt3 de Thermo Scientific, de acuerdo al método estandarizado US-EPA 6200¹.

Los elementos regulados que se cuantificaron son los siguientes: arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), plata (Ag), plomo (Pb), selenio (Se) y vanadio (V). Adicionalmente se cuantificaron manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y fierro (Fe).

1 Method 6200: "Field portable X-ray Fluorescence Spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment". Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846). <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/6200.pdf>

Para este análisis, se tomaron 10 g de cada muestra homogeneizada y tamizada, se pulverizaron en un molino de bolas y se colocaron en bolsas plásticas.

Entre los parámetros que se determinaron para asegurar un riguroso control de calidad con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados están:

1. Límites de detección

Los límites de detección (LD) de la técnica de análisis utilizada (FRX) son bajos (Tabla 4.4) e inferiores a los límites permisibles para suelos contaminados y establecidos en la NOM-147 (Tabla 3.2).

Tabla 4. 4. Límites de detección del equipo de FRX.

| Elementos potencialmente tóxicos (EPT) | Concentración (mg·kg⁻¹) |
|---|---|
| Arsénico | 14.5 |
| Cadmio | 6.0 |
| Cromo | 95.5 |
| Mercurio | 30.0 |
| Plata | 40.0 |
| Plomo | 3.7 |
| Selenio | 40.0 |
| Vanadio | 93.2 |
| Manganeso | 107.3 |
| Zinc | 61.1 |
| Cobre | 42.7 |
| Fierro | 113.0 |

2. Exactitud en los análisis

Para valorar este parámetro se determinó la concentración de los elementos estudiados en muestras internacionales certificadas: 2710 a Montana Soil y Till 4.

Se determinaron las concentraciones de estos estándares certificados en lotes de muestras. En cada lote se hicieron 10 determinaciones y se compararon con los valores certificados reportados. El valor de exactitud fue determinado a través de las siguientes fórmulas:

$$\%Error = \frac{\text{Valor certificado} - \text{Valor determinado}}{\text{Valor Certificado}} \times 100 \quad \text{Ecuación 4. 1}$$

$$\%Exactitud = 100 - \%Error \quad \text{Ecuación 4. 2}$$

Los resultados del cálculo de la exactitud (Tabla 4.5) presentan valores que se encuentran dentro de un rango de ± 20 por ciento por lo que se consideran analíticamente aceptables, de acuerdo al método estandarizado US-EPA 6200.

Tabla 4. 5. Cálculo de exactitud en los análisis de Pb, Se, As, Hg, Zn y Cu.

| Estándar | Pb | | | Se | | | As | | | Hg | | | Zn | | | Cu | | |
|------------------|------|------|-----|-----|------|-----|------|------|----|-----|-----|-----|------|------|----|------|------|----|
| | VC | VD | EX | VC | VD | EX | VC | VD | EX | VC | VD | EX | VC | VD | EX | VC | VD | EX |
| Montana 2710a | 5532 | 5261 | 95 | 4 | < LD | N/A | 1550 | 1482 | 96 | N/D | <LD | N/A | 4180 | 4028 | 96 | 3420 | 3218 | 94 |
| | 5532 | 5271 | 95 | 4 | < LD | N/A | 1550 | 1454 | 94 | N/D | <LD | N/A | 4180 | 4099 | 98 | 3420 | 3215 | 94 |
| | 5532 | 5258 | 95 | 4 | < LD | N/A | 1550 | 1441 | 93 | N/D | <LD | N/A | 4180 | 3963 | 95 | 3420 | 3229 | 94 |
| | 5532 | 5293 | 96 | 4 | < LD | N/A | 1550 | 1487 | 96 | N/D | <LD | N/A | 4180 | 4120 | 99 | 3420 | 3288 | 96 |
| | 5532 | 5281 | 95 | 4 | < LD | N/A | 1550 | 1478 | 95 | N/D | <LD | N/A | 4180 | 4099 | 98 | 3420 | 3233 | 95 |
| | 5532 | 5224 | 94 | 4 | < LD | N/A | 1550 | 1476 | 95 | N/D | <LD | N/A | 4180 | 3968 | 95 | 3420 | 3199 | 94 |
| | 5532 | 5328 | 96 | 4 | < LD | N/A | 1550 | 1490 | 96 | N/D | 32 | N/A | 4180 | 4140 | 99 | 3420 | 3211 | 94 |
| Till 4 | 50 | 52 | 104 | N/D | < LD | N/A | 111 | 100 | 90 | N/D | <LD | N/A | 70 | 61 | 87 | 237 | 216 | 91 |
| | 50 | 53 | 105 | N/D | < LD | N/A | 111 | 103 | 93 | N/D | <LD | N/A | 70 | 57 | 82 | 237 | 197 | 83 |
| | 50 | 53 | 107 | N/D | < LD | N/A | 111 | 105 | 94 | N/D | <LD | N/A | 70 | 54 | 77 | 237 | 219 | 92 |
| | 50 | 51 | 102 | N/D | < LD | N/A | 111 | 99 | 89 | N/D | <LD | N/A | 70 | 58 | 83 | 237 | 206 | 87 |
| | 50 | 49 | 98 | N/D | < LD | N/A | 111 | 103 | 93 | N/D | <LD | N/A | 70 | 64 | 92 | 237 | 212 | 89 |
| | 50 | 52 | 105 | N/D | < LD | N/A | 111 | 104 | 94 | N/D | <LD | N/A | 70 | 60 | 85 | 237 | 222 | 94 |
| | 50 | 52 | 104 | N/D | < LD | N/A | 111 | 106 | 95 | N/D | <LD | N/A | 70 | 66 | 94 | 237 | 219 | 93 |

VC Valor certificado ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), VD Valor Determinado ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), EX Exactitud (%), <LD Por debajo del límite de detección de la técnica de análisis, N/A No aplica, N/D No disponible

Tabla 4. 6. Cálculo de exactitud en los análisis de Fe, Mn, Cr, V, Cd y Ag.

| Estándar | Fe | | | Mn | | | Cr | | | V | | | Cd | | | Ag | | |
|------------------|-------|-------|-----|------|------|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | VC | VD | EX | VC | VD | EX | VC | VD | EX | VC | VD | EX | VC | VD | EX | VC | VD | EX |
| Montana 2710a | 43200 | 43193 | 100 | 2140 | 2139 | 100 | 23 | <LD | N/A | 80 | <LD | N/A | 123 | 19 | 16 | 39 | 39 | 98 |
| | 43200 | 43087 | 100 | 2140 | 2171 | 101 | 23 | <LD | N/A | 80 | <LD | N/A | 123 | 16 | 13 | 39 | 42 | 106 |
| | 43200 | 42250 | 98 | 2140 | 2071 | 97 | 23 | <LD | N/A | 80 | <LD | N/A | 123 | 17 | 14 | 39 | 42 | 106 |
| | 43200 | 43655 | 101 | 2140 | 2196 | 103 | 23 | <LD | N/A | 80 | <LD | N/A | 123 | 15 | 12 | 39 | 40 | 102 |
| | 43200 | 43527 | 101 | 2140 | 2108 | 98 | 23 | <LD | N/A | 80 | 105 | 123 | 123 | 15 | 12 | 39 | 41 | 104 |
| | 43200 | 42276 | 98 | 2140 | 2050 | 96 | 23 | <LD | N/A | 80 | <LD | N/A | 123 | 17 | 13 | 39 | 49 | 124 |
| | 43200 | 43420 | 101 | 2140 | 2087 | 98 | 23 | <LD | N/A | 80 | <LD | N/A | 123 | <LD | N/A | 39 | 38 | 96 |
| Till 4 | 39700 | 33668 | 85 | 490 | 402 | 82 | 53 | <LD | N/A | 67 | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A |
| | 39700 | 33853 | 85 | 490 | 367 | 75 | 53 | <LD | N/A | 67 | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A |
| | 39700 | 33095 | 83 | 490 | 397 | 81 | 53 | <LD | N/A | 67 | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A |
| | 39700 | 33056 | 83 | 490 | 413 | 84 | 53 | <LD | N/A | 67 | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A |
| | 39700 | 33666 | 85 | 490 | 429 | 88 | 53 | <LD | N/A | 67 | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A |
| | 39700 | 32803 | 83 | 490 | 412 | 84 | 53 | <LD | N/A | 67 | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A |
| | 39700 | 34012 | 86 | 490 | 458 | 93 | 53 | <LD | N/A | 67 | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A | N/D | <LD | N/A |

VC Valor certificado (mg·kg⁻¹), VD Valor Determinado (mg·kg⁻¹), EX Exactitud (%), <LD Por debajo del límite de detección de la técnica de análisis, N/A No aplica, N/D No disponible

3. Precisión en los análisis

Para valorar la precisión de los análisis, al total de las muestras se les determinó la concentración total de EPT por triplicado y se calculó el coeficiente de variación (CV) a través de la siguiente fórmula:

$$\%CV = \frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Media}} \times 100 \quad \text{Ecuación 4. 3}$$

En los resultados del cálculo del CV (Tabla 4.6), se observan valores menores al 20 por ciento por lo que, con base en el método estandarizado US-EPA 6200, se considera que la precisión del método es adecuada.

Tabla 4. 7. Cálculo de precisión en los análisis de Pb, Se, As, Hg, Zn y Cu.

| Muestra | Pb | | | Se | | | As | | | Hg | | | Zn | | | Cu | | |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV |
| ZSAT-01 0-5 | 37 | 6 | 15 | <LD | N/A | N/A | 491 | 94 | 19 | <LD | N/A | N/A | <LD | 2 | N/A | 46 | N/A | N/A |
| ZSAT-01 5-50 | 31 | 4 | 13 | <LD | N/A | N/A | 419 | 8 | 2 | <LD | N/A | N/A | 73 | 9 | 13 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-01 50-100 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 397 | 21 | 5 | <LD | N/A | N/A | 70 | 8 | 11 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-01 100-150 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 316 | 22 | 7 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-01 150-190 | 24 | 1 | 5 | <LD | N/A | N/A | 380 | 19 | 5 | <LD | N/A | N/A | 74 | 4 | 6 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-01 190 | 26 | 5 | 19 | <LD | N/A | N/A | 407 | 54 | 13 | <LD | N/A | N/A | 61 | 0 | 1 | 53 | 6 | 11 |
| ZSAT-02 0-5 | 20 | 3 | 17 | <LD | N/A | N/A | 331 | 28 | 9 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 5-50 | 25 | 2 | 9 | <LD | N/A | N/A | 414 | 32 | 8 | <LD | N/A | N/A | 61 | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 50-100 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 315 | 54 | 17 | <LD | N/A | N/A | 61 | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 100-150 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 231 | 19 | 8 | <LD | N/A | N/A | 61 | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 150-190 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 228 | 39 | 17 | <LD | N/A | N/A | 61 | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 190 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 222 | 5 | 2 | <LD | N/A | N/A | 61 | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 0-5 | 84 | 9 | 11 | <LD | N/A | N/A | 505 | 62 | 12 | <LD | N/A | N/A | 73 | 2 | 3 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 5-50 | 123 | 11 | 9 | <LD | N/A | N/A | 713 | 51 | 7 | <LD | N/A | N/A | 82 | 5 | 7 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 50-100 | 160 | 6 | 4 | <LD | N/A | N/A | 720 | 84 | 12 | <LD | N/A | N/A | 74 | 3 | 4 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 100-150 | 78 | 2 | 3 | <LD | N/A | N/A | 681 | 90 | 13 | <LD | N/A | N/A | 72 | 11 | 15 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 150-180 | 71 | 10 | 15 | <LD | N/A | N/A | 351 | 20 | 6 | <LD | N/A | N/A | 77 | 6 | 7 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 0-5 | 52 | 2 | 5 | <LD | N/A | N/A | 115 | 3 | 2 | <LD | N/A | N/A | 144 | 7 | 5 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 5-50 | 49 | 1 | 2 | <LD | N/A | N/A | 130 | 30 | 23 | <LD | N/A | N/A | 152 | 9 | 6 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 50-100 | 36 | 8 | 22 | <LD | N/A | N/A | 96 | 13 | 14 | <LD | N/A | N/A | 113 | 8 | 7 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 100-150 | 35 | 6 | 18 | <LD | N/A | N/A | 129 | 5 | 3 | <LD | N/A | N/A | 128 | 13 | 10 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 150-220 | 34 | 3 | 9 | <LD | N/A | N/A | 121 | 11 | 9 | <LD | N/A | N/A | 145 | 18 | 13 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 220 | 35 | 4 | 11 | <LD | N/A | N/A | 111 | 2 | 2 | <LD | N/A | N/A | 117 | 7 | 6 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-05 0-5 | 20 | 0 | 0 | <LD | N/A | N/A | 32 | 2 | 7 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-05 5-50 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 36 | 2 | 5 | <LD | N/A | N/A | 66 | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-05 50-100 | 23 | 2 | 8 | <LD | N/A | N/A | 66 | 7 | 11 | <LD | N/A | N/A | 64 | 5 | 8 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-05 esquisto | 681 | 6 | 1 | <LD | N/A | N/A | 719 | 16 | 2 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 43 | N/A | 9 |
| ZSAT-06 0-5 | 39 | 3 | 6 | <LD | N/A | N/A | 278 | 9 | 3 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 5-50 | 31 | 0 | 2 | <LD | N/A | N/A | 283 | 3 | 1 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 50-100 | 64 | 12 | 19 | <LD | N/A | N/A | 215 | 36 | 17 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 100-150 | 44 | 3 | 7 | <LD | N/A | N/A | 109 | 19 | 17 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 150-200 | 48 | 5 | 10 | <LD | N/A | N/A | 113 | 9 | 8 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 200 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 75 | 8 | 11 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-07 0-5 | 76 | 11 | 14 | <LD | N/A | N/A | 504 | 11 | 2 | <LD | N/A | N/A | 64 | 6 | 9 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-07 5-50 | 46 | 4 | 9 | <LD | N/A | N/A | 390 | 9 | 2 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |

| Muestra | Pb | | | Se | | | As | | | Hg | | | Zn | | | Cu | | |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV |
| ZSAT-07 50-100 | 70 | 11 | 15 | <LD | N/A | N/A | 399 | 30 | 8 | <LD | N/A | N/A | 63 | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-07 100-150 | 59 | 8 | 14 | <LD | N/A | N/A | 264 | 35 | 13 | <LD | N/A | N/A | <LD | 1 | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-07 150-190 | 102 | 13 | 13 | <LD | N/A | N/A | 126 | 10 | 8 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 0-5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 38 | 4 | 11 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 5-50 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 45 | 6 | 13 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 50-100 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 37 | 5 | 12 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 100-150 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 64 | 5 | 7 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 150-188 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 31 | 5 | 16 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 0-5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 5-50 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 50-100 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 100-150 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 150-200 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 200 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 0-5 | 172 | 20 | 11 | <LD | N/A | N/A | 221 | 4 | 2 | <LD | N/A | N/A | 89 | 14 | 16 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 5-50 | 157 | 10 | 6 | <LD | N/A | N/A | 203 | 9 | 5 | <LD | N/A | N/A | 74 | 9 | 12 | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 50-100 | 40 | 6 | 15 | <LD | N/A | N/A | 92 | 16 | 17 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 100-150 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 74 | 4 | 5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 150-200 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 73 | 1 | 1 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 220 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 78 | 16 | 21 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 0-5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 18 | 3 | 15 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 5-50 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 50-100 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 19 | 2 | 13 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 100-150 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 18 | 1 | 6 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 150-220 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 17 | 2 | 10 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 220 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 26 | 1 | 4 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 0-5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 39 | 6 | 16 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 5-50 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 35 | 6 | 18 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 50-100 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 36 | 5 | 14 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 100-150 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 53 | 7 | 12 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 150-220 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 58 | 3 | 5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 220 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 60 | 6 | 10 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-13 0-5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 30 | 1 | 2 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-13 5-50 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 20 | 3 | 15 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-13 50-100 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 28 | 2 | 7 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-13 100-150 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 41 | 8 | 20 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |

| Muestra | Pb | | | Se | | | As | | | Hg | | | Zn | | | Cu | | |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV |
| ZSAT-13 150-180 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | 24 | 1 | 5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |

M Media de la concentración ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), **SD** Desviación estándar, **CV** Coeficiente de Variación (%), **<LD** Por debajo del límite de detección de la técnica de análisis, **N/A** No aplica, **N/D** No disponible

Tabla 4. 8. Cálculo de precisión en los análisis de Fe, Mn, Cr, V, Cd y Ag.

| Muestra | Fe | | | Mn | | | Cr | | | V | | | Cd | | | Ag | | |
|------------------|-------|------|----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV |
| ZSAT-01 0-5 | 39335 | 530 | 1 | 421 | 40 | 10 | <LD | N/A | N/A | 175 | 37 | 21 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-01 5-50 | 37351 | 928 | 2 | 485 | 25 | 5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-01 50-100 | 41265 | 845 | 2 | 552 | 56 | 10 | <LD | N/A | N/A | 141 | 23 | 16 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-01 100-150 | 40932 | 567 | 1 | 527 | 56 | 11 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-01 150-190 | 42900 | 250 | 1 | 536 | 33 | 6 | <LD | N/A | N/A | 154 | 18 | 12 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-01 190 | 42205 | 2168 | 5 | 462 | 25 | 5 | <LD | N/A | N/A | 147 | 4 | 3 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 0-5 | 25922 | 858 | 3 | 343 | 20 | 6 | <LD | N/A | N/A | <LD | 6 | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 5-50 | 27565 | 692 | 3 | 432 | 68 | 16 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 50-100 | 23322 | 1964 | 8 | 344 | 62 | 18 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 100-150 | 21338 | 1885 | 9 | 279 | 20 | 7 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 150-190 | 23637 | 2067 | 9 | 323 | 32 | 10 | <LD | N/A | N/A | <LD | 4 | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-02 190 | 22726 | 1333 | 6 | 313 | 7 | 2 | <LD | N/A | N/A | <LD | 6 | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 0-5 | 37509 | 2190 | 6 | 550 | 78 | 14 | <LD | N/A | N/A | 127 | 16 | 13 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 5-50 | 39143 | 3402 | 9 | 540 | 27 | 5 | <LD | N/A | N/A | 169 | 38 | 22 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 50-100 | 35739 | 2111 | 6 | 500 | 63 | 13 | <LD | N/A | N/A | 134 | 21 | 15 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 100-150 | 35687 | 575 | 2 | 511 | 13 | 3 | <LD | N/A | N/A | 135 | 9 | 7 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-03 150-180 | 29277 | 552 | 2 | 443 | 35 | 8 | <LD | N/A | N/A | 141 | 36 | 25 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 0-5 | 31233 | 124 | 0 | 580 | 34 | 6 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 5-50 | 32257 | 1469 | 5 | 602 | 67 | 11 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 50-100 | 26770 | 3039 | 11 | 464 | 82 | 18 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 100-150 | 28198 | 540 | 2 | 467 | 41 | 9 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 150-220 | 35394 | 225 | 1 | 618 | 30 | 5 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-04 220 | 31562 | 1598 | 5 | 506 | 32 | 6 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-05 0-5 | 21728 | 994 | 5 | 354 | 18 | 5 | <LD | N/A | N/A | 116 | 11 | 9 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-05 5-50 | 31150 | 790 | 3 | 398 | 53 | 13 | <LD | N/A | N/A | 190 | 21 | 11 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-05 50-100 | 20853 | 1102 | 5 | 173 | 25 | 15 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-05 esquisto | 49855 | 302 | 1 | 357 | 22 | 6 | <LD | N/A | N/A | 192 | 20 | 11 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 0-5 | 23869 | 720 | 3 | 373 | 43 | 12 | <LD | N/A | N/A | 114 | 3 | 3 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 5-50 | 18508 | 288 | 2 | 339 | 44 | 13 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |

| Muestra | Fe | | | Mn | | | Cr | | | V | | | Cd | | | Ag | | |
|-----------------|-------|------|----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV |
| ZSAT-06 50-100 | 29232 | 1759 | 6 | 467 | 74 | 16 | <LD | N/A | N/A | 128 | 18 | 14 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 100-150 | 29131 | 966 | 3 | 420 | 48 | 11 | <LD | N/A | N/A | 122 | 17 | 14 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 150-200 | 33906 | 572 | 2 | 585 | 43 | 7 | <LD | N/A | N/A | 164 | 20 | 12 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-06 200 | 32994 | 948 | 3 | 546 | 52 | 9 | <LD | N/A | N/A | 131 | 29 | 22 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-07 0-5 | 31210 | 1531 | 5 | 494 | 84 | 17 | <LD | N/A | N/A | 143 | 42 | 30 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-07 5-50 | 22436 | 171 | 1 | 331 | 34 | 10 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-07 50-100 | 29214 | 689 | 2 | 416 | 17 | 4 | <LD | N/A | N/A | 109 | 11 | 10 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-07 100-150 | 26458 | 941 | 4 | 358 | 20 | 6 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-07 150-190 | 37000 | 987 | 3 | 594 | 73 | 12 | <LD | N/A | N/A | 118 | 22 | 18 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 0-5 | 27514 | 758 | 3 | 454 | 49 | 11 | <LD | N/A | N/A | <LD | <LD | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 5-50 | 29333 | 239 | 1 | 507 | 73 | 14 | <LD | N/A | N/A | <LD | 13 | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 50-100 | 25533 | 1943 | 8 | 444 | 43 | 10 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 100-150 | 21739 | 173 | 1 | 339 | 31 | 9 | <LD | N/A | N/A | 110 | 24 | 22 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-08 150-188 | 19261 | 330 | 2 | 275 | 7 | 3 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 0-5 | 9212 | 176 | 2 | 189 | 28 | 15 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 5-50 | 12120 | 267 | 2 | 272 | 22 | 8 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 50-100 | 12285 | 417 | 3 | 242 | 18 | 8 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 100-150 | 17550 | 1123 | 6 | 213 | 52 | 25 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 150-200 | 14129 | 696 | 5 | 160 | 34 | 21 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-09 200 | 13242 | 238 | 2 | 197 | 19 | 10 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 0-5 | 42760 | 589 | 1 | 695 | 72 | 10 | <LD | N/A | N/A | 133 | 11 | 8 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 5-50 | 41489 | 2526 | 6 | 683 | 55 | 8 | <LD | N/A | N/A | 150 | 11 | 8 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 50-100 | 35559 | 1725 | 5 | 585 | 64 | 11 | <LD | N/A | N/A | 124 | 6 | 4 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 100-150 | 36222 | 1751 | 5 | 579 | 9 | 2 | <LD | N/A | N/A | 162 | 23 | 14 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 150-200 | 34530 | 299 | 1 | 521 | 49 | 9 | <LD | N/A | N/A | 145 | 12 | 8 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-10 220 | 35353 | 1733 | 5 | 520 | 70 | 13 | <LD | N/A | N/A | 135 | 13 | 9 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 0-5 | 20803 | 1406 | 7 | 406 | 82 | 20 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 5-50 | 31014 | 1835 | 6 | 600 | 19 | 3 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 50-100 | 20715 | 90 | 0 | 332 | 20 | 6 | <LD | N/A | N/A | <LD | 4 | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 100-150 | 22146 | 2229 | 10 | 410 | 55 | 14 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 150-220 | 26894 | 3296 | 12 | 493 | 50 | 10 | <LD | N/A | N/A | <LD | 9 | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-11 220 | 27894 | 248 | 1 | 501 | 48 | 10 | <LD | N/A | N/A | 97 | 1 | 1 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 0-5 | 26750 | 938 | 4 | 485 | 27 | 6 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 5-50 | 26225 | 183 | 1 | 455 | 28 | 6 | <LD | N/A | N/A | 121 | 13 | 11 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 50-100 | 23849 | 2795 | 12 | 420 | 50 | 12 | <LD | N/A | N/A | <LD | <LD | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 100-150 | 25444 | 496 | 2 | 431 | 17 | 4 | <LD | N/A | N/A | 116 | 18 | 15 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |

| Muestra | Fe | | | Mn | | | Cr | | | V | | | Cd | | | Ag | | |
|-----------------|-------|------|----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV | M | SD | CV |
| ZSAT-12 150-220 | 31425 | 499 | 2 | 469 | 26 | 6 | <LD | N/A | N/A | 161 | 7 | 4 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-12 220 | 27939 | 191 | 1 | 433 | 50 | 11 | <LD | N/A | N/A | 150 | 23 | 15 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-13 0-5 | 14506 | 196 | 1 | 222 | 13 | 6 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-13 5-50 | 10593 | 134 | 1 | 157 | 43 | 27 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-13 50-100 | 12802 | 168 | 1 | 190 | 25 | 13 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-13 100-150 | 12499 | 926 | 7 | 212 | 20 | 10 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |
| ZSAT-13 150-180 | 11688 | 1234 | 11 | 215 | 14 | 7 | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A | <LD | N/A | N/A |

M Media de la concentración ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), **SD** Desviación estándar, **CV** Coeficiente de Variación (%), **<LD** Por debajo del límite de detección de la técnica de análisis, **N/A** No aplica, **N/D** No disponible

b) Concentración geodisponible y bioaccesible de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-147.

1. Determinación de las concentraciones solubles o geodisponibles de EPT en las muestras de suelo del sitio de estudio.

Dichas concentraciones se determinaron tanto en las muestras de fondo como en las muestras de suelos y subsuelos cuyas concentraciones superaron los VNF. La metodología utilizada, descrita en el Apéndice Normativo “B” de la NOM-147, básicamente consistió en:

- Preparar suspensiones de las muestras de suelo y sedimento con agua en equilibrio con CO_2 ($\text{pH} = 5.5 \pm 0.2$) en una relación 1 : 20 (g/ml) (burbujear aire al agua destilada).
- Agitar durante 18.0 horas ± 0.25 (Figura 4.8).
- Separar la fase sólida del extracto mediante la centrifugación y filtración con membrana de 0.45 μm .
- Determinar la concentración soluble de los EPT de interés.

Los análisis químicos de los extractos se realizaron utilizando Espectroscopia de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP-AES) para la identificación de metales y Cromatografía iónica (CI) para la determinación de iones mayores. El Hg se determinó mediante el método US-

EPA 7470A² utilizando el equipo Flow Injection Mercury System (FIMS, por sus siglas en inglés). Los bicarbonatos se determinaron por medio de titulación.



Figura 4. 8. Imagen fotográfica del dispositivo utilizado para la determinación de la concentración geodisponible de acuerdo al Apéndice Normativo “B” de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

2. Determinación de las concentraciones bioaccesible en las muestras de suelo del sitio de estudio.

Se determinó la concentración biodisponible “in vitro” (concentración bioaccesible) de EPT en las muestras de suelos colectadas en los poblados de San Antonio y El Triunfo cuyas concentraciones superaron los VNF. Es importante resaltar que son zonas con uso de suelo residencial, por lo tanto, existe población humana expuesta.

La metodología utilizada para la determinación de la bioaccesibilidad o concentración bioaccesible (CB) de EPT, de acuerdo al Apéndice Normativo “C” de la NOM-147, consistió en:

² Method 7470A: “Mercury in liquid waste (Manual cold-vapor technique). Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846).

<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/7470a.pdf>

- Preparar las muestras de suelo: Las muestras de suelo se secan en estufa a una temperatura $< 40^{\circ}\text{C}$ y se tamizan a $< 250 \mu\text{m}$. Se usa la fracción del tamaño $< 250 \mu\text{m}$ porque ese tamaño de partícula es representativo de la que se adhiere en las manos de los niños.
- Determinar la concentración total de As y Pb en las muestras tamizadas (diámetro $< 250 \mu\text{m}$), a la que se denomina “concentración en sólido” ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y que se usa para el cálculo de la CB.
- Preparar la solución de extracción que simula fase gástrica: En 1.9 L de agua destilada, agregar 60.06 g de glicina (base libre, Ultra Sigma o equivalente). Poner la mezcla en un baño de agua a 37°C hasta que el fluido de extracción alcance 37°C . Agregar HCl (12,1N) hasta que la solución alcance un valor de $\text{pH} = 1.50 \pm 0.05$. Llevar la solución a volumen final de 2 L (0.4 M glicina).
- Preparar la suspensión de solución de extracción con el suelo contaminado: Medir $100 \pm 0.5 \text{ ml}$ de la solución de extracción y transferir a un frasco de boca ancha HDPE de 125 ml y agregar $1.00 \pm 0.05 \text{ g}$ del suelo tamizado a $<250\mu\text{m}$.
- Agitar la suspensión: Poner los frascos con la suspensión en el extractor (Figura 4.9) y rotar con vueltas completas de $30 \pm 2 \text{ rpm}$ por una hora.
- Filtrar la suspensión con filtros de acetato de celulosa de $0.45\mu\text{m}$ y conservar las muestras filtradas en un refrigerador a 4°C hasta su análisis.
- Determinar la concentración de As y Pb en el extracto a la que se denomina “concentración del extracto in vitro”, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; que se usa para el cálculo de la CB.
- Calcular la CB de As y Pb utilizando la siguiente fórmula:

$$CB = \frac{\text{Concentración del extracto in vitro } \text{mg L}^{-1} \times 0.1 \text{ L}}{\text{Concentración en sólido, } \text{mg kg}^{-1} \times 0.001}$$

Ecuación 4. 4

La concentración total de As y Pb se determinó utilizando la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX), utilizando un analizador portátil NITTON XLt3 de Thermo Scientific y la concentración de As y Pb en el extracto se determinó utilizando la técnica indicada en la NOM-147: Espectroscopia de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP-AES).



Figura 4. 9. Imagen fotográfica del dispositivo utilizado para la determinación de la bioaccesibilidad de As y Pb de acuerdo al Apéndice Normativo “C” de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

4.2.5 Identificación de fases sólidas a las que están asociados los elementos de naturaleza tóxica de mayor interés en la zona: As y Pb

La identificación de las fases sólidas a las cuáles están asociados el As y Pb en las muestras analizadas, se realizó por medio de Microscopía Electrónica de Barrido Acoplada con Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS). Este análisis fue realizado en el Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 VALORES NATURALES DE FONDO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

En la Tabla 5.1 se presentan los valores naturales de fondo (VNF), pH, CE y concentraciones totales de los EPT de interés.

Los resultados obtenidos muestran que los valores de pH varían entre 5.7 y 8.0, con una media de 6.9, y los de conductividad eléctrica (CE) entre 9.7 y 216.0 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, con una media de 52.5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Mientras que las concentraciones de los EPT analizados varían en un amplio intervalo: As (No detectado – 113 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Pb (No detectado – 34 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), V (No detectado – 180 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Mn (270 – 1228 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Zn (No detectado – 120 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Cu (No detectado – 96 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Fe (1.3 – 7.3 %).

Tabla 5. 1. Valores Naturales de Fondo (VNF) de EPT (pH, CE y concentraciones totales).

| Clave de campo | pH | C.E. | As | Cd | Cr | Hg | Ag | Pb | Se | V | Mn | Zn | Cu | Fe |
|----------------------------|-----|-------------------------|-----------------------|-----|------|-----|-----|------|-----|-------|--------|-------|------|------|
| | | $\mu\text{S}/\text{cm}$ | mg/kg | | | | | | | | | | | % |
| FSAT -1 | 7.1 | 21.9 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 18 | <LD | <LD | 270 | <LD | <LD | 1.5 |
| FSAT -2 | 7.2 | 19.3 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 159 | 1228 | 75 | 51 | 7.3 |
| FSAT -3 | 7.1 | 18.1 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 22 | <LD | <LD | 482 | 68 | <LD | 2.3 |
| FSAT -4 | 7.4 | 82.3 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 161 | 976 | 68 | 96 | 6.7 |
| FSAT -5 | 6.0 | 23.8 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 20 | <LD | <LD | 333 | 69 | <LD | 1.5 |
| FSAT -6 | 6.3 | 216.0 | 60 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 367 | <LD | <LD | 1.5 |
| FSAT -7 | 6.2 | 18.7 | 40 | <LD | <LD | <LD | <LD | 34 | <LD | 179 | 915 | 61 | <LD | 6.6 |
| FSAT -8 | 5.7 | 9.7 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 604 | 68 | <LD | 3.0 |
| FSAT -9 | 6.2 | 40.4 | 113 | <LD | <LD | <LD | <LD | 30 | <LD | <LD | 422 | 64 | <LD | 2.4 |
| FSAT -10 | 7.5 | 87.2 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 20 | <LD | <LD | 433 | 75 | <LD | 1.3 |
| FSAT -11 | 7.7 | 39.3 | 16 | <LD | <LD | <LD | <LD | 30 | <LD | <LD | 540 | 102 | <LD | 3.7 |
| FSAT -12 | 8.0 | 53.2 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 17 | <LD | 180 | 855 | 120 | 55 | 6.0 |
| Mínimo | 5.7 | 9.7 | 16.0 | <LD | <LD | <LD | <LD | 17.0 | <LD | 159.0 | 270.0 | 61.0 | 51.0 | 1.3 |
| Máximo | 8.0 | 216.0 | 113.0 | <LD | <LD | <LD | <LD | 34.0 | <LD | 180.0 | 1228.0 | 120.0 | 96.0 | 7.3 |
| Límite de detección | | | 14.5 | 100 | 95.5 | 30 | 40 | 3.7 | 40 | 93.2 | 107.3 | 61.1 | 42.7 | 0.01 |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis.

Gutiérrez *et al.*, (2009) realizaron un estudio regional de los VNF de los principales EPT en los suelos de las zonas mineras de México. Los valores reportados se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5. 2. Valores de fondo nacionales de elementos potencialmente tóxicos y elementos mayores.
(Fuente: Gutiérrez *et al.*, 2009)

| | As | Cd | Cr | Hg | Ag | Pb | Se | V | Mn | Zn | Cu | Fe |
|---------------|---------------------|-------|--------|-----|--------|--------|-------|--------|---------|---------|--------|----------|
| | mg·kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | |
| Mínimo | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 98.90 |
| Máximo | 493.51 | 25.15 | 275.20 | <LD | 110.19 | 974.62 | 61.50 | 775.00 | 3296.00 | 1759.00 | 307.00 | 86780.00 |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis.

Comparando los VNF de los EPT analizados en la zona de estudio con los VNF de los mismos EPT reportados por Gutiérrez *et al.*, (2009), se observa que todos los elementos se encuentran dentro de los intervalos reportados.

5.1.1 Geodisponibilidad.

Se determinó la geodisponibilidad de los EPT con el fin de conocer las concentraciones de fondo solubles. Los resultados se presentan en la Tabla 5.3 y muestran que la concentración geodisponible para la mayoría de los EPT está por debajo del límite de detección de la técnica de análisis. Los únicos EPT que se encuentran geodisponibles, en concentraciones variables, son: Zn (No detectado – 6.25 mg·L⁻¹) y Fe (0.95 – 8.56 mg·L⁻¹).

Tabla 5. 3. Concentraciones geodisponibles, en mg·L⁻¹, de las muestras de fondo.

| Clave de campo | As | Cd | Cr | Ag | Pb | Se | Mn | Zn | Cu | Fe |
|----------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| | mg·L ⁻¹ | | | | | | | | | |
| FSAT-01 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 1.62 |
| FSAT-02 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 1.49 | <LD | 2.09 |
| FSAT-03 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 3.23 | <LD | 2.28 |
| FSAT-04 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 2.65 | <LD | 1.37 |
| FSAT-05 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 3.27 | <LD | 1.08 |

| Clave de campo | As | Cd | Cr | Ag | Pb | Se | Mn | Zn | Cu | Fe |
|----------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| | mg·L ⁻¹ | | | | | | | | | |
| FSAT-06 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 1.90 |
| FSAT-07 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 3.27 | <LD | 8.56 |
| FSAT-08 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 2.13 | <LD | 0.95 |
| FSAT-09 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 2.17 |
| FSAT-10 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 6.25 | <LD | 1.29 |
| FSAT-11 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 3.16 | <LD | 1.67 |
| FSAT-12 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 2.38 | <LD | 1.07 |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis de la técnica de análisis.

5.2 DETERMINACIÓN DEL RIESGO AL AMBIENTE

5.2.1 Muestras Superficiales

En la Tabla 5.4, se presentan los valores de pH, CE y concentraciones totales de las muestras superficiales. Los valores marcados en negritas son aquellos que presentan niveles mayores a los VNF de los EPT.

Las muestras de los suelos superficiales presentan valores de pH que varían entre 5.7 y 9.0, con una media de 7.5, y la CE entre 9.2 y 761.5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, con una media de 64.7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Se puede considerar que los valores de pH son concordantes con los VNF, sin embargo, la CE presenta un incremento, en algunas muestras, respecto a dichos VNF.

Las concentraciones de los EPT analizados varían en un amplio intervalo: As (No detectado – 3791 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Cd (No detectado – 64 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Hg (No detectado – 22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Pb (No detectado – 15,860 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), V (No detectado – 216 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Mn (111 – 1,407 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Zn (No detectado – 6,850 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Cu (No detectado – 324 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Fe (0.5 – 8.5 %).

Tabla 5. 4. Valores de CE, pH y concentraciones totales de las muestras de superficiales.

| Clave de campo | pH | C.E. | As | Cd | Cr | Hg | Ag | Pb | Se | V | Mn | Zn | Cu | Fe |
|----------------|-----|----------------------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ | mg·kg ⁻¹ | | | | | | | | | | % | |
| ESAT -1 | 5.8 | 170.3 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 16 | <LD | <LD | 200 | <LD | <LD | 1.0 |

| Clave de campo | pH | C.E. | As | Cd | Cr | Hg | Ag | Pb | Se | V | Mn | Zn | Cu | Fe |
|----------------|-----|----------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|-----|
| | | $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ | $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | | | | | | | % |
| ESAT -2 | 5.7 | 29.1 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 489 | 92 | <LD | 2.2 |
| ESAT -3 | 6.5 | 23.2 | 36 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 131 | 516 | <LD | <LD | 2.8 |
| ESAT -4 | 6.0 | 761.5 | 40 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 111 | 383 | <LD | <LD | 2.5 |
| ESAT -5 | 7.0 | 60.3 | 26 | <LD | <LD | <LD | <LD | 15 | <LD | <LD | 358 | <LD | <LD | 1.7 |
| ESAT -6 | 7.2 | 21.4 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 19 | <LD | <LD | 111 | <LD | <LD | 0.6 |
| ESAT -7 | 8.1 | 33.8 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 178 | <LD | <LD | 0.7 |
| ESAT-8 | 6.8 | 10.9 | 46 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 137 | 557 | <LD | <LD | 3.4 |
| ESAT -9 | 6.8 | 21.8 | 52 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 136 | 598 | <LD | <LD | 3.6 |
| ESAT -10 | 6.3 | 14.6 | 28 | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | 131 | 573 | <LD | <LD | 3.0 |
| ESAT -11 | 7.9 | 54.1 | 230 | <LD | <LD | <LD | <LD | 52 | <LD | 139 | 620 | 94 | <LD | 3.9 |
| ESAT-12 | 8.2 | 214.0 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 0.5 |
| ESAT -13 | 8.4 | 31.2 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 79 | <LD | <LD | 748 | 96 | <LD | 4.5 |
| ESAT -14 | 7.4 | 19.2 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 540 | <LD | <LD | 2.7 |
| ESAT -15 | 8.2 | 19.4 | 32 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 159 | 673 | 65 | <LD | 3.8 |
| ESAT-16 | 8.4 | 52.4 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 97 | 398 | <LD | <LD | 2.1 |
| ESAT -17 | 7.5 | 18.8 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | 108 | 536 | 86 | <LD | 3.4 |
| ESAT -18 | 7.3 | 157.6 | 21 | <LD | <LD | <LD | <LD | 25 | <LD | 124 | 891 | 95 | <LD | 4.9 |
| ESAT-19 | 8.0 | 36.5 | 26 | <LD | <LD | <LD | <LD | 18 | <LD | <LD | 663 | 112 | <LD | 5.1 |
| ESAT -20 | 8.1 | 25.5 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | <LD | 171 | <LD | <LD | 0.9 |
| ESAT -21 | 8.6 | 40.2 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 15 | <LD | <LD | 281 | <LD | <LD | 1.8 |
| ESAT -22 | 8.6 | 36.4 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 182 | 894 | 105 | <LD | 5.5 |
| ESAT -23 | 7.0 | 30.9 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 25 | <LD | <LD | 494 | 83 | <LD | 3.5 |
| ESAT-24 | 8.4 | 33.8 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 21 | <LD | 115 | 480 | 74 | <LD | 3.3 |
| ZSAT-01 0-5 | 7.2 | 60.5 | 491 | <LD | <LD | <LD | <LD | 37 | <LD | 175 | 421 | <LD | 46 | 3.9 |
| ZSAT-02 0-5 | 7.5 | 59.8 | 331 | <LD | <LD | <LD | <LD | 20 | <LD | <LD | 343 | <LD | <LD | 2.6 |
| ZSAT-03 0-5 | 8.7 | 47.6 | 505 | <LD | <LD | <LD | <LD | 84 | <LD | 127 | 550 | 73 | <LD | 3.8 |
| ZSAT-04 0-5 | 7.1 | 71.9 | 115 | <LD | <LD | <LD | <LD | 52 | <LD | <LD | 580 | 144 | <LD | 3.1 |
| ZSAT-05 0-5 | 8.2 | 43.8 | 32 | <LD | <LD | <LD | <LD | 20 | <LD | 116 | 354 | <LD | <LD | 2.2 |
| ZSAT-06 0-5 | 9.0 | 21.7 | 278 | <LD | <LD | <LD | <LD | 39 | <LD | 114 | 373 | <LD | <LD | 2.4 |
| ZSAT-07 0-5 | 8.6 | 27.9 | 504 | <LD | <LD | <LD | <LD | 76 | <LD | 143 | 494 | 64 | <LD | 3.1 |
| ZSAT-08 0-5 | 7.5 | 9.2 | 38 | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | <LD | 454 | <LD | <LD | 2.8 |
| ZSAT-09 0-5 | 7.5 | 18.4 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | <LD | 189 | <LD | <LD | 0.9 |
| ZSAT-10 0-5 | 6.6 | 58.6 | 221 | <LD | <LD | <LD | <LD | 172 | <LD | 133 | 695 | 89 | <LD | 4.3 |
| ZSAT-11 0-5 | 6.9 | 10.1 | 18 | <LD | <LD | <LD | <LD | 16 | <LD | <LD | 406 | <LD | <LD | 2.1 |
| ZSAT-12 0-5 | 6.7 | 16.4 | 39 | <LD | <LD | <LD | <LD | 13 | <LD | <LD | 485 | <LD | <LD | 2.7 |
| ZSAT-13 0-5 | 7.3 | 31.1 | 30 | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | <LD | 222 | <LD | <LD | 1.5 |

| Clave de campo | pH | C.E. | As | Cd | Cr | Hg | Ag | Pb | Se | V | Mn | Zn | Cu | Fe |
|----------------------------|----------|----------------------------------|--------------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|--------------|-----|------------|-------------|-------------|------------|------------|
| | | $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ | $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | | | | | | | % |
| SSAT-1 | N/a | N/a | 304 | <LD | <LD | <LD | <LD | 168 | <LD | 174 | 682 | 87 | <LD | 4.5 |
| SSAT-2 | 8.2 | 84.1 | 786 | <LD | <LD | <LD | <LD | 128 | <LD | 168 | 1067 | 138 | 60 | 7.6 |
| SSAT-3 | 8.3 | 81.2 | 224 | <LD | <LD | <LD | <LD | 115 | <LD | 168 | 837 | 79 | <LD | 5.5 |
| SSAT-4 | 8.0 | 86.2 | 906 | <LD | <LD | <LD | <LD | 2338 | <LD | 169 | 1340 | 113 | <LD | 8.5 |
| SSAT-5 | 8.5 | 81.5 | 242 | <LD | <LD | <LD | <LD | 69 | <LD | 152 | 482 | 89 | <LD | 3.3 |
| SSAT-6 | 8.8 | 59.7 | 571 | <LD | <LD | <LD | <LD | 68 | <LD | 148 | 765 | 92 | <LD | 4.8 |
| SSAT-7 | 8.8 | 69.2 | 2148 | 36 | <LD | 22 | 41 | 3121 | <LD | 172 | 617 | 470 | 96 | 5.5 |
| SSAT-8 | 8.0 | 259.0 | 703 | <LD | <LD | <LD | <LD | 19 | <LD | 196 | 971 | 64 | 43 | 7.0 |
| SSAT-9 | 7.8 | 630.0 | 499 | <LD | 149 | <LD | <LD | 92 | <LD | 162 | 824 | 172 | <LD | 5.2 |
| SSAT-10 | 8.7 | 92.2 | 817 | <LD | <LD | <LD | <LD | 52 | <LD | 216 | 428 | 84 | <LD | 4.2 |
| SSAT-11 | 8.6 | 100.1 | 806 | <LD | <LD | <LD | <LD | 102 | <LD | 171 | 250 | 72 | <LD | 3.1 |
| SSAT-12 | 8.9 | 64.3 | 3791 | 48 | <LD | <LD | 70 | 15860 | <LD | <LD | 789 | 6850 | 324 | 7.7 |
| SSAT-13 | 9.0 | 74.5 | 87 | <LD | <LD | <LD | <LD | 279 | <LD | <LD | 495 | 261 | 36 | 3.1 |
| SSAT-14 | 9.0 | 72.9 | 67 | <LD | <LD | <LD | <LD | 110 | <LD | 133 | 652 | 169 | 44 | 4.0 |
| SSAT-15 | 9.1 | 106.4 | 327 | 9 | <LD | <LD | <LD | 1501 | <LD | 134 | 837 | 926 | 77 | 5.4 |
| SSAT-16 | 9.0 | 88.3 | 57 | <LD | <LD | <LD | <LD | 90 | <LD | 106 | 500 | 113 | <LD | 2.9 |
| SSAT-17 | 9.1 | 67.1 | 39 | <LD | <LD | <LD | <LD | 61 | <LD | 129 | 472 | 117 | 46 | 3.2 |
| SSAT-18 | 8.6 | 60.2 | 62 | <LD | <LD | <LD | <LD | 161 | <LD | 140 | 815 | 187 | 43 | 4.6 |
| SSAT-19 | 8.3 | 81.5 | 113 | <LD | <LD | <LD | <LD | 124 | <LD | 123 | 635 | 145 | 48 | 4.4 |
| SSAT-20 | 8.9 | 85.5 | 2547 | 32 | <LD | <LD | <LD | 2156 | <LD | 129 | 1407 | 2709 | 121 | 6.1 |
| Mínimo | 6 | 9 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | <LD | 111 | <LD | <LD | 0.5 |
| Máximo | 9 | 762 | 3791 | 48 | 149 | 22 | 70 | 15860 | <LD | 216 | 1407 | 6850 | 324 | 8.5 |
| Límite de detección | | | 14.5 | 6 | 95.5 | 30 | 40 | 3.7 | 40 | 93.2 | 107.3 | 61.1 | 42.7 | 0.01 |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis de la técnica de análisis.

N/a No analizado

Con base en la NOM-147, existen dos métodos para determinar la contaminación de los suelos y sedimentos. Uno de ellos es comparar las concentraciones totales de EPT con los valores de referencia establecidos en dicha norma (Tabla 3.2) y otro es comparar las concentraciones totales de EPT con los VNF (Tabla 5.1).

La Figura 5.1 indica los porcentajes de muestras contaminadas por EPT al comparar las concentraciones totales con los valores de referencia de la NOM-147 (a) y con los VNF (b).

Con base en los valores de referencia de la NOM-147, se observa que los contaminantes prioritarios en la zona de estudio son As, V y Pb, sin embargo, si se compara con los VNF, se observa que los contaminantes prioritarios son As, Pb y Zn. Es importante señalar que el Zn, además del Mn, Cu y Fe, no se encuentra regulado en la NOM-147.

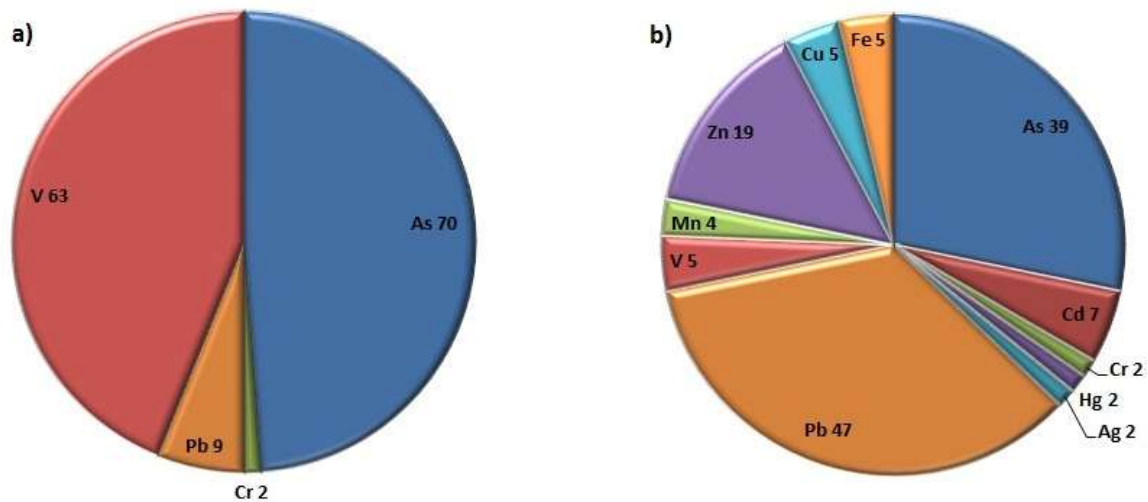


Figura 5. 1. Porcentaje de muestras superficiales contaminadas por EPT con base en los valores de la NOM-147 (a) y con base en los valores naturales de fondo (VNF) (b).

Una vez detectados los contaminantes prioritarios, se analizó el nivel de contaminación que presentan y se observó que las concentraciones totales de As superan los valores de referencia hasta 171.32 veces y los VNF hasta 32.55 veces, las concentraciones totales de V superan los valores de referencia hasta 1.77 veces y los VNF hasta 0.2 veces, las concentraciones totales de Pb superan los valores de referencia hasta 38.65 veces y los VNF hasta 465.47 veces, finalmente las concentraciones totales de Zn superan los VNF hasta 56.08 veces (Figura 5.2).

La Figura 5.2 muestra que los niveles de referencia establecidos en la NOM-147 para el As y V son inferiores a los VNF; por lo que, si se utilizan los valores de referencia de la NOM-147, se estaría sobreestimando el problema de contaminación de As y V en la zona; por el contrario, en el caso del Pb, que presenta valores por encima de los VNF, se estaría subestimando el problema de contaminación. Por esta razón, se decidió utilizar los VNF como referencia para determinar las zonas con contaminación antropogénica.

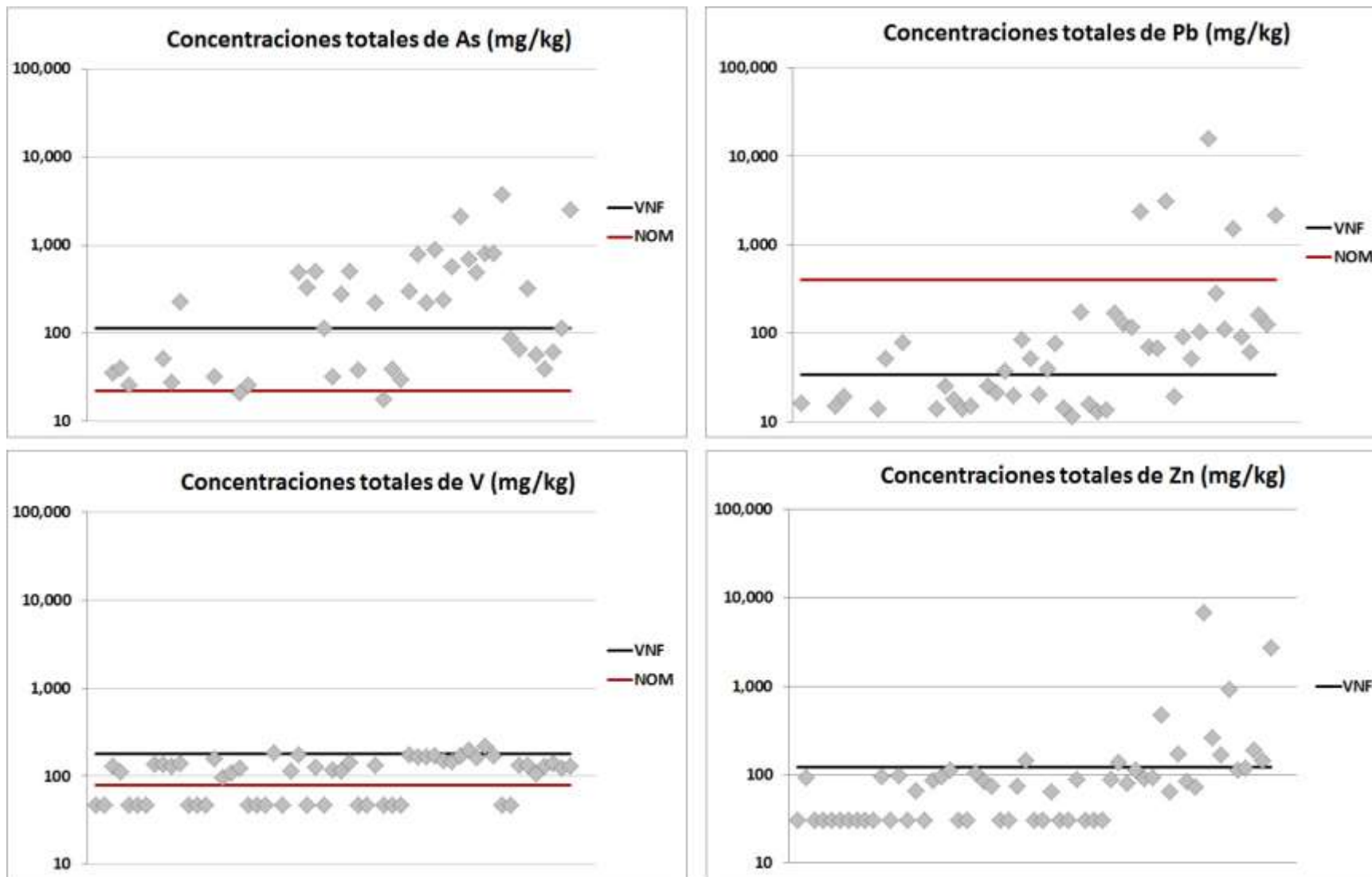


Figura 5. 2. Comparativo de muestras superficiales contaminadas por As, Pb, V y Zn según los valores naturales de fondo (VNF) y los niveles de referencia de la NOM-147 (NOM).

Con el fin de definir el grado de contaminación de los sitios estudiados, con base en los VNF, se propuso la siguiente clasificación:

| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| No contaminados: | concentraciones menores al VNF. |
| Levemente contaminados: | hasta dos veces el VNF. |
| Contaminados: | hasta cinco veces el VNF. |
| Muy contaminados: | más de cinco veces el VNF. |

La Figura 5.3, 5.6 y 5.9 muestra la distribución de las muestras contaminadas por As, Pb y Zn, respectivamente, así como el grado de contaminación que presenta cada una de ellas. Se observa que las muestras que se presumen contaminadas son aquellas que se encuentran dentro de la zona de residuos y hasta una distancia aproximada de 15 km, lo que indica que la afectación superficial por la dispersión de los residuos mineros históricos es de aproximadamente 15 km aguas abajo en dirección al Golfo de California.

Existen tres muestras que presentan contaminación y que se encuentran fuera de la zona que se considera contaminada. Sobre estas muestras se puede deducir que:

- La muestra ESAT – 22 presenta contaminación por V en grado leve ($2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ por encima del VNF). Al ser la única muestra que presenta contaminación y al ser ésta muy leve, no se considera al V como un contaminante antropogénico en los suelos superficiales.
- Para la muestra ESAT – 11, contaminada por As y Pb, y ESAT – 13, contaminada por Pb, se considera que el aporte de estos contaminantes tiene una procedencia distinta a los residuos mineros históricos de la zona de San Antonio – El Triunfo, toda vez que las muestras circundantes no presentan contaminación.

En las Figuras 5.4, 5.5, 5.7, 5.8, 5.10 y 5.11, se presenta una visión detallada de la distribución de las muestras superficiales contaminadas, así como el grado de contaminación por As, Pb y Zn, en las zonas de uso residencial, poblados de San Antonio y El Triunfo respectivamente.

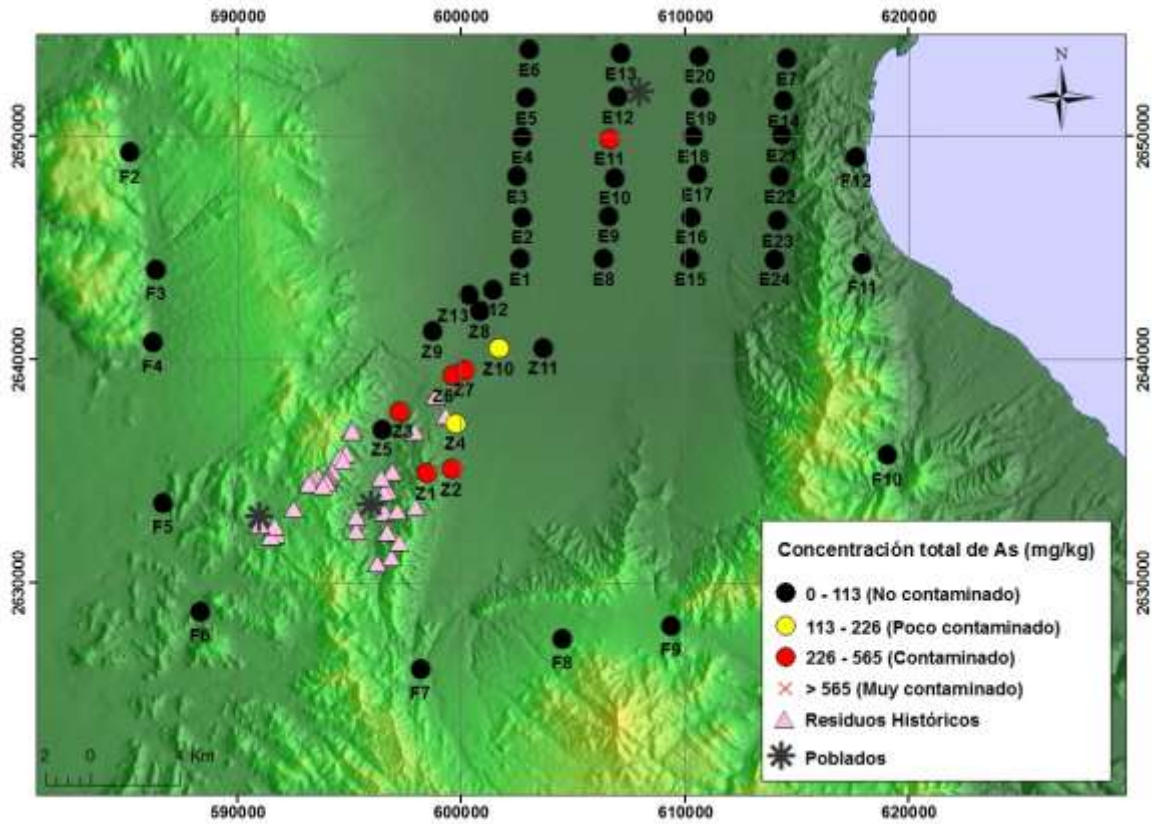


Figura 5. 3. Distribución y grado de contaminación por As en los suelos superficiales.

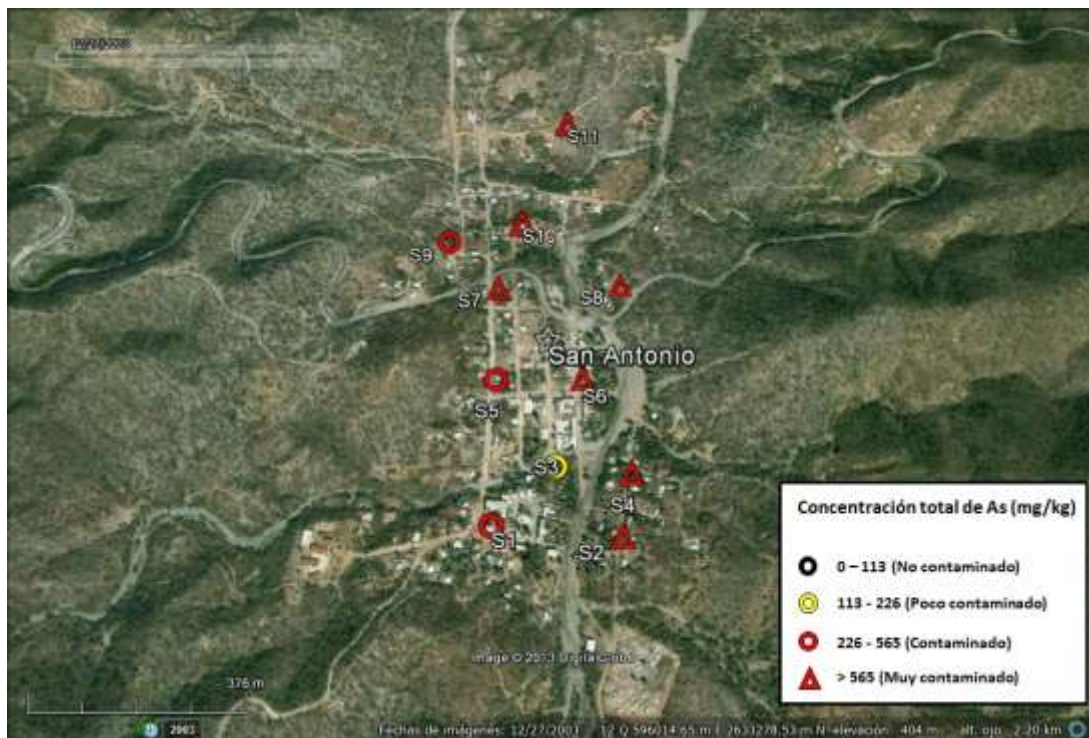


Figura 5. 4. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por As en el poblado San Antonio.

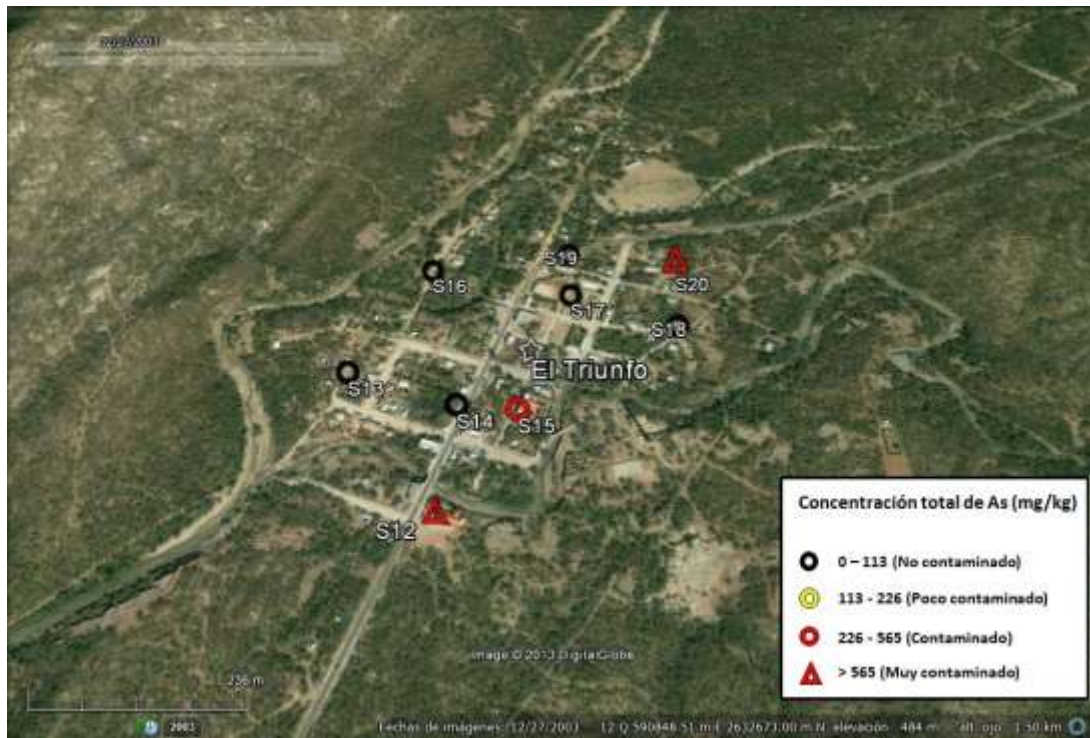


Figura 5. 5. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por As en el poblado El Triunfo.

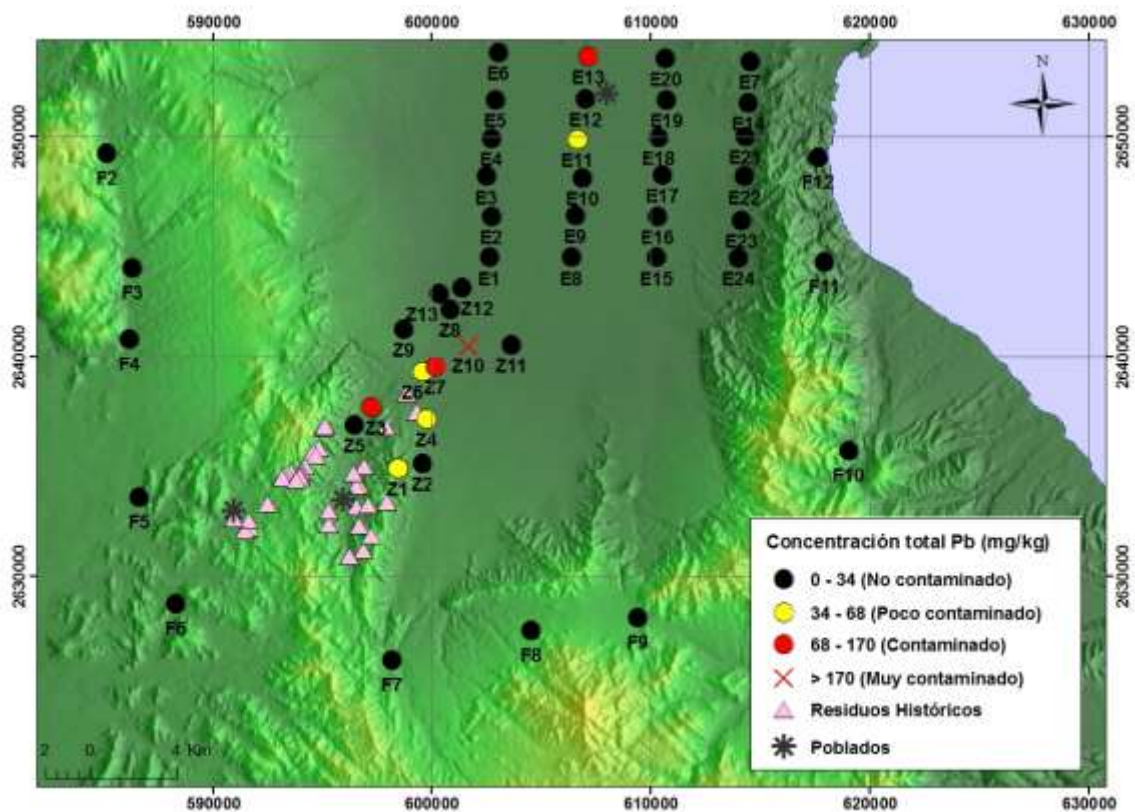


Figura 5. 6. Distribución y grado de contaminación por Pb en los suelos superficiales.

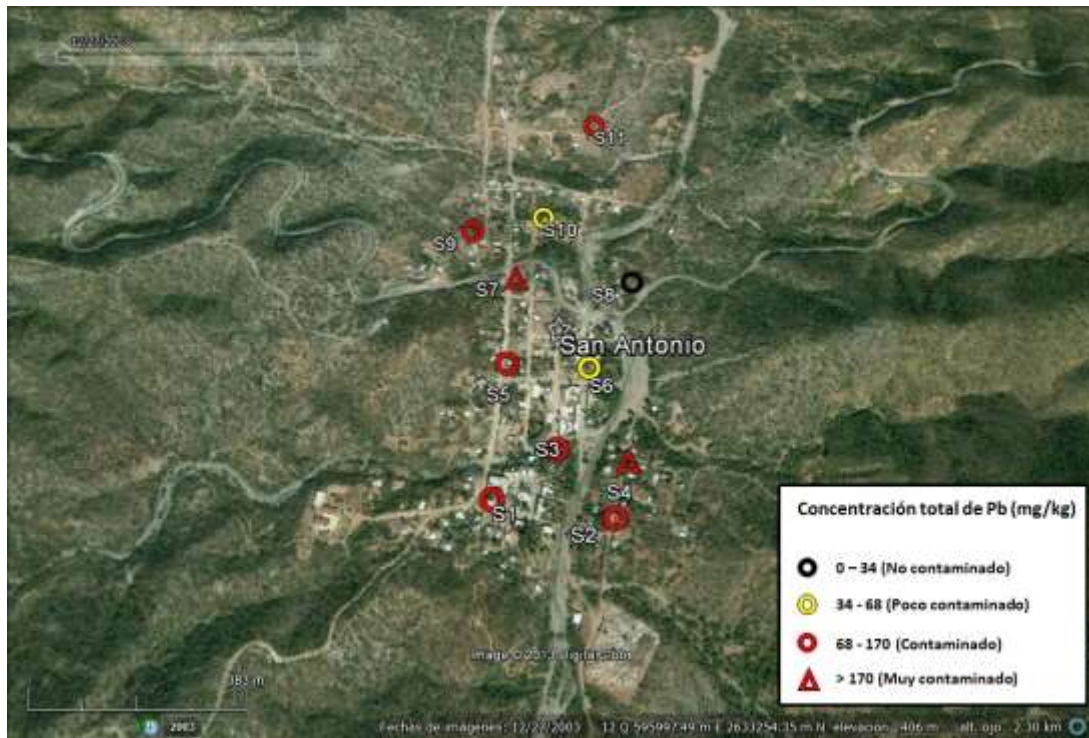


Figura 5. 7. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por Pb en el poblado San Antonio.

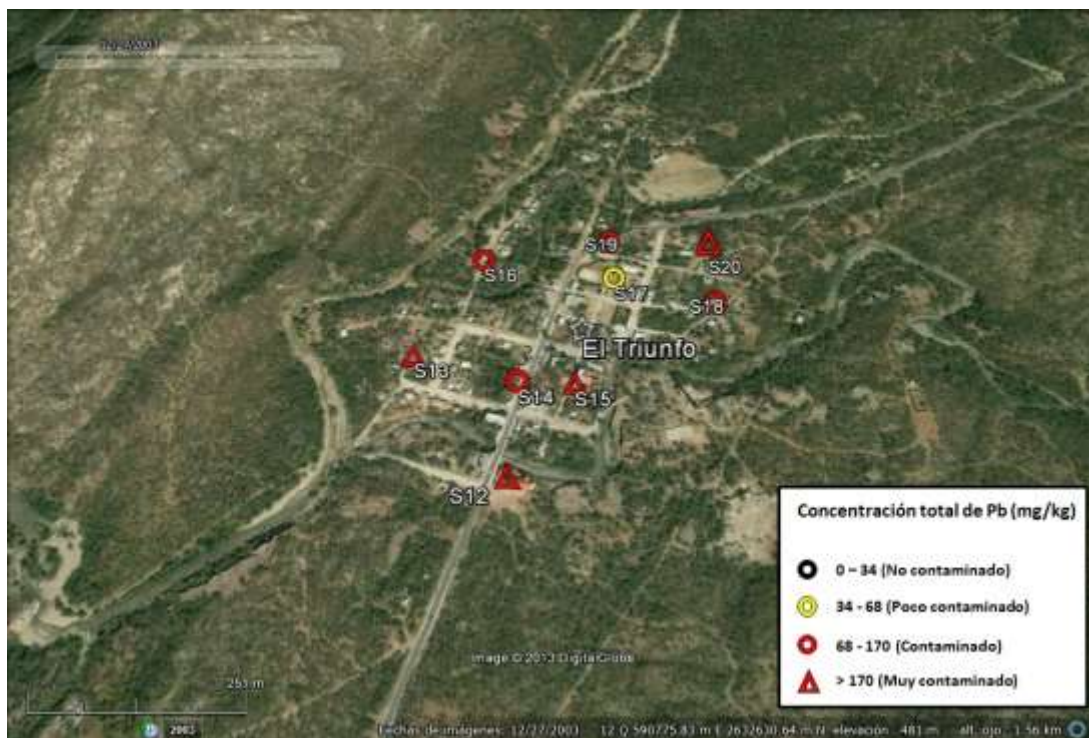


Figura 5. 8. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por Pb en el poblado El Triunfo.

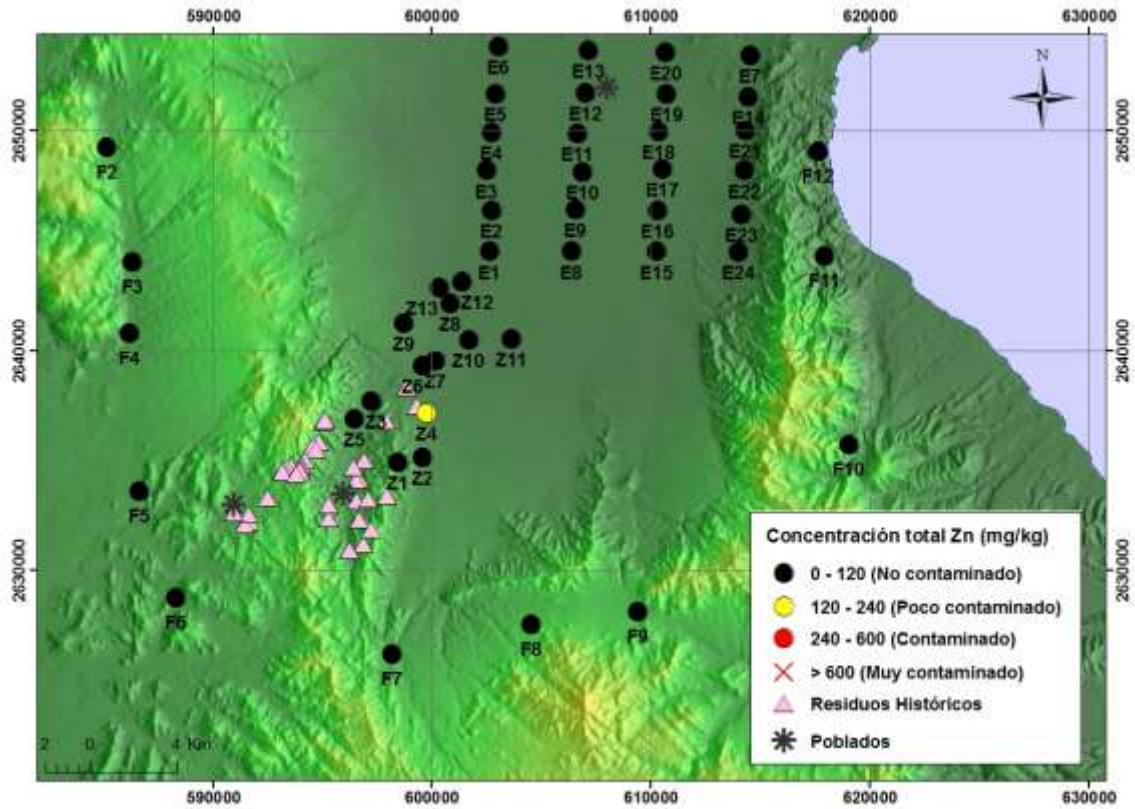


Figura 5. 9. Distribución y grado de contaminación por Zn en los suelos superficiales.

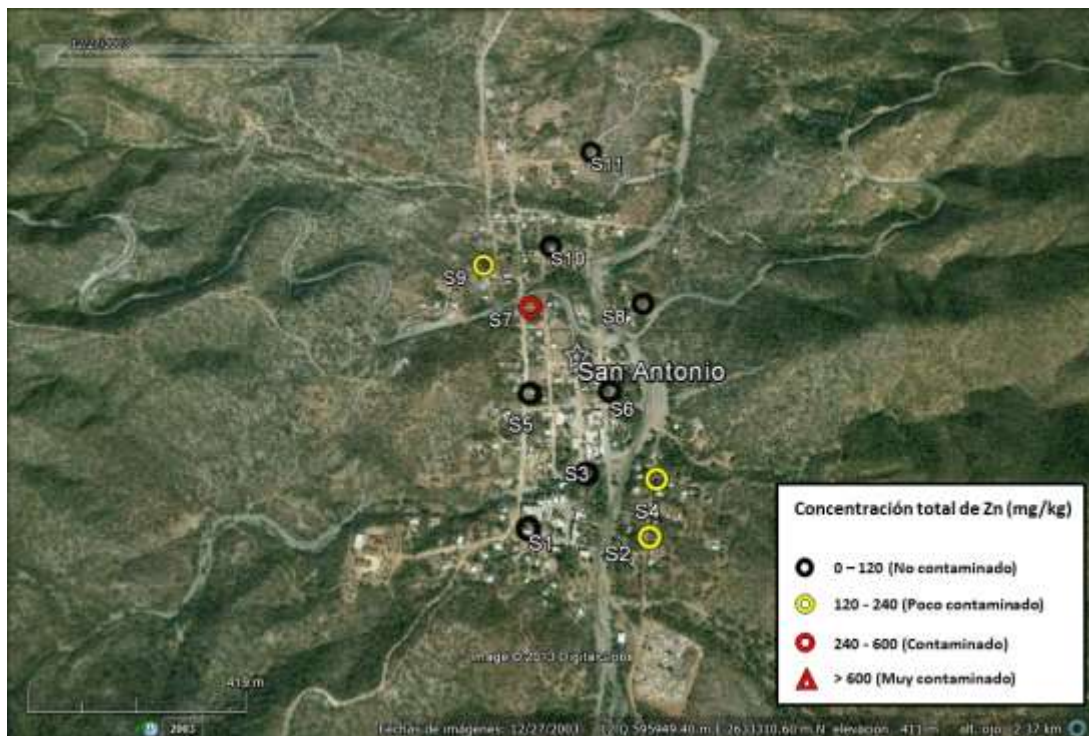


Figura 5. 10. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por Zn en el poblado San Antonio.

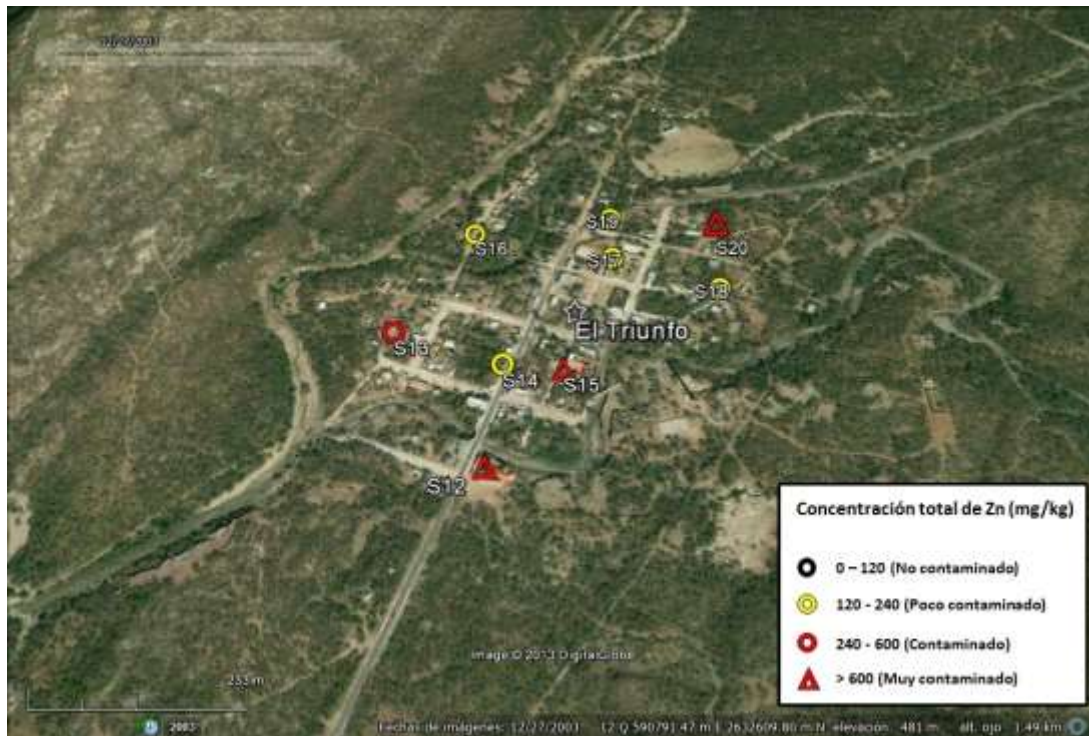


Figura 5. 11. Vista detallada de las muestras superficiales contaminadas por Zn en el poblado El Triunfo.

5.2.1.1 Geodisponibilidad de las muestras superficiales.

Con base en la NOM-147, se calculó la concentración específica soluble (CE_s) para los contaminantes prioritarios normados mediante la siguiente fórmula:

$$CE_s = CR_s + CF_s$$

CE_s = concentración específica con base en la fracción soluble ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

CR_s = concentración de referencia soluble (Tabla 3.3)

CF_s = concentración soluble en las muestras de fondo (Tabla 5.3)

Los resultados se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5. 5. Concentraciones Específicas, en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, con base en la fracción soluble calculada de acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

| EPT | As | Pb |
|------------|--------------|--------------|
| CRs | 0.500 | 0.500 |
| CFs | <LD | <LD |
| CEs | 0.500 | 0.500 |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis

Se realizó la determinación de la geodisponibilidad de los contaminantes prioritarios en las muestras superficiales (Tabla 5.6) que se encuentran dentro del área que se presume afectada por la dispersión de los residuos mineros históricos.

Los resultados muestran que el Zn no se encuentra geodisponible, por lo que se descarta que pueda generar un daño al ambiente, sin embargo, existen concentraciones variables de As (No detectado – $1.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y Pb (No detectado – $1.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Las concentraciones geodisponibles obtenidas (Tabla 5.6) fueron comparadas con las concentraciones específicas solubles (Tabla 5.5). Los resultados indican que algunas de las muestras presentan concentraciones geodisponibles superiores a las concentraciones específicas solubles (negritas). Por lo que se considera que estos suelos podrían representar un riesgo ambiental.

Tabla 5. 6. Concentraciones geodisponibles de los contaminantes prioritarios, en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, en los suelos superficiales. Los valores que superan las CEs se marcan en negritas.

| Clave de Campo | As | Pb | Zn |
|----------------|-------------------------------|--------------|-----|
| | $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | | |
| ZSAT-01 0-5 | 0.022 | <LD | <LD |
| ZSAT-03 0-5 | 0.061 | <LD | <LD |
| ZSAT-07 0-5 | 0.109 | <LD | <LD |
| ZSAT-10 0-5 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-12 0-5 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-01 | <LD | 0.880 | <LD |
| SSAT-02 | 0.524 | 1.230 | <LD |
| SSAT-03 | <LD | 1.322 | <LD |
| SSAT-04 | <LD | 0.840 | <LD |

| Clave de Campo | As | Pb | Zn |
|----------------------------|--------------------|--------------|-------|
| | mg·L ⁻¹ | | |
| SSAT-05 | <LD | 0.726 | <LD |
| SSAT-06 | <LD | 1.371 | <LD |
| SSAT-07 | 1.308 | <LD | <LD |
| SSAT-08 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-09 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-10 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-11 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-12 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-13 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-14 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-15 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-16 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-17 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-18 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-19 | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-20 | 0.125 | <LD | <LD |
| Límite de detección | 0.010 | 0.010 | 0.010 |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis de la técnica de análisis.

Cabe mencionar que dichas muestras se encuentran ubicadas en la zona donde existe población humana expuesta en los poblados de San Antonio – El Triunfo, donde además se reporta que la profundidad del nivel de las aguas subterráneas varía entre 5 y 10 m (Briceño -Arellano, A. D., Tesis en proceso), por lo que las concentraciones geodisponibles de As y Pb en los suelos podrían poner en riesgo la calidad del cuerpo somero de aguas subterráneas del sitio.

Sin embargo, en la zona de influencia, que corresponde al área del cauce del Arroyo Los Planes, las concentraciones geodisponibles de los EPT de interés no fueron detectadas; lo que indica que superficialmente en esta zona de influencia no hay riesgo ambiental; pero dada la alta permeabilidad del material del lecho del cauce (arenas) es necesario valorar si los EPT han migrado hacia los estratos inferiores del perfil en esta zona de influencia.

Con las concentraciones geodisponibles y las concentraciones totales, se calculó el porcentaje soluble o de geodisponibilidad (Tabla 5.7). Se obtuvo como resultado que el mayor porcentaje de

geodisponibilidad para el As es de 1.334%, con una media de 0.136%, y para el Pb es de 40.326%, con una media de 4.591%.

Tabla 5. 7. Concentraciones totales, concentraciones geodisponibles y porcentaje geodisponible de los contaminantes prioritarios en los suelos superficiales.

| Clave de campo | TOTALES | | | GEODISPONIBLES | | | | | | | | |
|----------------|---------------------|--------------|-------------|--------------------|--------------|-----|---------------------|-------|-----|-------|--------|-----|
| | As | Pb | Zn | As | Pb | Zn | As | Pb | Zn | As | Pb | Zn |
| | mg·kg ⁻¹ | | | mg·L ⁻¹ | | | mg·kg ⁻¹ | | | % | | |
| ZSAT-01 0-5 | 491 | 37 | <LD | 0.022 | <LD | <LD | 0.44 | <LD | <LD | 0.090 | <LD | <LD |
| ZSAT-03 0-5 | 505 | 84 | 73 | 0.061 | <LD | <LD | 1.22 | <LD | <LD | 0.242 | <LD | <LD |
| ZSAT-07 0-5 | 504 | 76 | 64 | 0.109 | <LD | <LD | 2.18 | <LD | <LD | 0.433 | <LD | <LD |
| ZSAT-10 0-5 | 221 | 172 | 89 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-12 0-5 | 39 | 13 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD |
| SSAT-1 | 304 | 168 | 87 | <LD | 0.880 | <LD | <LD | 17.61 | <LD | N/S | 10.482 | N/S |
| SSAT-2 | 786 | 128 | 138 | 0.524 | 1.230 | <LD | 10.48 | 24.60 | <LD | 1.334 | 19.222 | N/S |
| SSAT-3 | 224 | 115 | 79 | <LD | 1.322 | <LD | <LD | 26.44 | <LD | N/S | 22.991 | N/S |
| SSAT-4 | 906 | 2338 | 113 | <LD | 0.840 | <LD | <LD | 16.80 | <LD | N/S | 0.719 | N/S |
| SSAT-5 | 242 | 69 | 89 | <LD | 0.726 | <LD | <LD | 14.51 | <LD | N/S | 21.032 | N/S |
| SSAT-6 | 571 | 68 | 92 | <LD | 1.371 | <LD | <LD | 27.42 | <LD | N/S | 40.326 | N/S |
| SSAT-7 | 2148 | 3121 | 470 | 1.308 | <LD | <LD | 26.17 | <LD | <LD | 1.218 | N/S | N/S |
| SSAT-8 | 703 | 19 | 64 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-9 | 499 | 92 | 172 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-10 | 817 | 52 | 84 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-11 | 806 | 102 | 72 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-12 | 3791 | 15860 | 6850 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-13 | 87 | 279 | 261 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-14 | 67 | 110 | 169 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-15 | 327 | 1501 | 926 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-16 | 57 | 90 | 113 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-17 | 39 | 61 | 117 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-18 | 62 | 161 | 187 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-19 | 113 | 124 | 145 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| SSAT-20 | 2547 | 2156 | 2709 | 0.125 | <LD | <LD | 2.50 | <LD | <LD | 0.098 | N/S | N/S |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis de la técnica de análisis.

N/S No soluble

No obstante las altas concentraciones totales, se observa que las concentraciones geodisponibles, son relativamente bajas o completamente nulas, como es el caso del Zn, por esta razón se puede inferir que el mayor porcentaje de estos contaminantes no está lixiviando y se está quedando

retenido en la fase sólida. Con respecto al Pb, se observa que algunas muestras presentan altos porcentajes de geodisponibilidad.

Así mismo, se analizó la concentración de iones mayores que se encuentran geodisponibles (Tabla 5.8). Se obtuvieron concentraciones variables, en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, de Na^+ (0.39 – 0.66), K^+ (2.97 – 4.57), Ca^{2+} (2.22 – 5.71), Mg^{2+} (0.36 – 0.61), F^- (0.01 – 2.36), Cl^- (0.77 – 3.66), NO_3^- (0.23 – 2.79), SO_4^{2-} (0.51 – 0.76) y HCO_3^- (6.74 – 20.22).

Se observa que los iones mayores se presentan en concentraciones menores a las establecidas en la NOM-127-SSA1-1994 para el agua potable por lo que no representan algún problema ambiental, a excepción de la muestras ZSAT 10-05 que presenta valores por encima del límite máximo permisible en agua potable para F^- . De acuerdo a la NOM-127, la concentración máxima de F^- es de $1.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y la muestra ZSAT 10 0-5 presenta una concentración, de $2.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Tabla 5. 8. Concentraciones geodisponibles de los iones mayores, en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, en los suelos superficiales.

| Clave de Campo | Na^+ | K^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | F^- | Cl^- | NO_3^- | SO_4^{2-} | HCO_3^- |
|----------------|-------------------------------|--------------|------------------|------------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|------------------|
| | $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | | | | | | | | |
| ZSAT 01 0-5 | 0.52 | 3.27 | 5.19 | 0.36 | 0.01 | 3.15 | 2.08 | 0.58 | 14.32 |
| ZSAT 03 0-5 | 0.66 | 3.10 | 5.02 | 0.61 | 0.02 | 3.57 | 1.76 | 0.76 | 15.16 |
| ZSAT 07 0-5 | 0.50 | 2.97 | 5.40 | 0.57 | 0.02 | 3.44 | 1.42 | 0.59 | 15.16 |
| ZSAT 10 0-5 | 0.39 | 4.57 | 5.71 | 0.43 | 2.36 | 0.77 | 0.23 | 0.51 | 20.22 |
| ZSAT 12 0-5 | 0.60 | 3.75 | 2.22 | 0.56 | 0.01 | 3.66 | 2.79 | 0.56 | 6.74 |

5.2.2 Muestras Subsuperficiales

Con el fin de valorar si la contaminación está migrando hacia el subsuelo se analizaron muestras subsuperficiales y se determinaron las concentraciones totales y geodisponibles de los EPT de interés.

Estos suelos presentan valores de pH que podrían considerarse neutros, concordantes con los VNF, varían entre 6.1 y 9.0, con una media de 7.6. La conductividad eléctrica (CE) tiene un intervalo de variación de entre 4.1 y $67.6 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, con una media de $31.3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Las concentraciones de los EPT analizados varían en un amplio intervalo: As (No detectado – 720 mg·kg⁻¹), Pb (No detectado – 681 mg·kg⁻¹), V (No detectado – 192 mg·kg⁻¹), Mn (157 – 683 mg·kg⁻¹), Zn (19 – 152 mg·kg⁻¹), Cu (No detectado – 53 mg·kg⁻¹) y Fe (1.1 a 5.0 %).

En la Tabla 5.9, se presentan las concentraciones totales, pH y CE para las muestras de los suelos subsuperficiales. Los valores marcados en negritas indican las concentraciones que superan los VNF.

Se analizó el nivel de contaminación y se observó que las concentraciones totales de As superan los VNF hasta 5.31 veces, las concentraciones totales de V superan los VNF hasta 0.07 veces, las concentraciones totales de Pb superan los VNF hasta 19.02 veces, finalmente las concentraciones totales de Zn superan los VNF hasta 1.07 veces. De acuerdo a lo anterior, se determinó que el As y el Pb son los contaminantes prioritarios.

Tomando como base el As para analizar el comportamiento de las muestras subsuperficiales, es posible clasificar los conjuntos de muestras en tres grupos:

- Grupo 1. Conjuntos de muestras ZSAT – 03, ZSAT – 06, ZSAT – 07 y ZSAT – 10: presentan concentraciones de As relativamente altas en las muestras más someras y se observa una disminución conforme aumenta la profundidad a la cual fueron tomadas.
- Grupo 2. Conjuntos de muestras ZSAT – 01, ZSAT – 02 y ZSAT – 04: presentan concentraciones de As superiores a los VNF que permanecen relativamente constantes en todas las muestras, no muestran variaciones con respecto a la profundidad.
- Grupo 3. Conjuntos de muestras ZSAT – 08, ZSAT – 09, ZSAT – 11, ZSAT – 12 y ZSAT – 13: presentan concentraciones de As por debajo del VNF que permanecen relativamente constantes en todas las muestras, no muestran variaciones con respecto a la profundidad.

El conjunto de muestras ZSAT – 05 presenta un caso especial que será discutido posteriormente.

Tabla 5. 9. CE, pH y concentraciones totales de las muestras de subsuperficiales.

| Clave de campo | Prof. | pH | C.E. | As | Cd | Cr | Hg | Ag | Pb | Se | V | Mn | Zn | Cu | Fe |
|-----------------|-------|-----|----------------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|-----|
| | cm | | $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ | | | | | | | | | | | | |
| ZSAT-01 5-50 | -5 | 7.5 | 56.7 | 419 | <LD | <LD | <LD | <LD | 31 | <LD | <LD | 485 | 73 | <LD | 3.7 |
| ZSAT-01 50-100 | -50 | 8.0 | 47.0 | 397 | <LD | <LD | <LD | <LD | 18 | <LD | 141 | 552 | 70 | <LD | 4.1 |
| ZSAT-01 100-150 | -100 | 8.1 | 44.6 | 316 | <LD | <LD | <LD | <LD | 15 | <LD | <LD | 527 | <LD | <LD | 4.1 |
| ZSAT-01 150-190 | -150 | 8.3 | 47.7 | 380 | <LD | <LD | <LD | <LD | 24 | <LD | 154 | 536 | 74 | <LD | 4.3 |
| ZSAT-01 190 | -190 | 8.4 | 48.3 | 407 | <LD | <LD | <LD | <LD | 26 | <LD | 147 | 462 | 61 | 53 | 4.2 |
| ZSAT-02 5-50 | -5 | 8.1 | 44.5 | 414 | <LD | <LD | <LD | <LD | 25 | <LD | <LD | 432 | 61 | <LD | 2.8 |
| ZSAT-02 50-100 | -50 | 8.2 | 38.1 | 315 | <LD | <LD | <LD | <LD | 15 | <LD | <LD | 344 | <LD | <LD | 2.3 |
| ZSAT-02 100-150 | -100 | 8.8 | 39.0 | 231 | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | <LD | 279 | <LD | <LD | 2.1 |
| ZSAT-02 150-190 | -150 | 9.0 | 42.4 | 228 | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | <LD | 323 | <LD | <LD | 2.4 |
| ZSAT-02 190 | -190 | 9.0 | 38.9 | 222 | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | <LD | 313 | <LD | <LD | 2.3 |
| ZSAT-03 5-50 | -5 | 6.1 | 45.4 | 713 | <LD | <LD | <LD | <LD | 123 | <LD | 169 | 540 | 82 | <LD | 3.9 |
| ZSAT-03 50-100 | -50 | 6.7 | 39.0 | 720 | <LD | <LD | <LD | <LD | 160 | <LD | 134 | 500 | 74 | <LD | 3.6 |
| ZSAT-03 100-150 | -100 | 6.8 | 39.4 | 681 | <LD | <LD | <LD | <LD | 78 | <LD | 135 | 511 | 72 | <LD | 3.6 |
| ZSAT-03 150-180 | -180 | 7.3 | 47.5 | 351 | <LD | <LD | <LD | <LD | 71 | <LD | 141 | 443 | 77 | <LD | 2.9 |
| ZSAT-04 5-50 | -5 | 7.2 | 45.8 | 130 | <LD | <LD | <LD | <LD | 49 | <LD | <LD | 602 | 152 | <LD | 3.2 |
| ZSAT-04 50-100 | -50 | 7.6 | 52.7 | 96 | <LD | <LD | <LD | <LD | 36 | <LD | <LD | 464 | 113 | <LD | 2.7 |
| ZSAT-04 100-150 | -100 | 7.6 | 56.1 | 129 | <LD | <LD | <LD | <LD | 35 | <LD | <LD | 467 | 128 | <LD | 2.8 |
| ZSAT-04 150-220 | -150 | 8.1 | 56.2 | 121 | <LD | <LD | <LD | <LD | 34 | <LD | <LD | 618 | 145 | <LD | 3.5 |
| ZSAT-04 220 | -220 | 7.5 | 62.3 | 111 | <LD | <LD | <LD | <LD | 35 | <LD | <LD | 506 | 117 | <LD | 3.2 |
| ZSAT-05 5-50 | -5 | 7.9 | 58.5 | 36 | <LD | <LD | <LD | <LD | 16 | <LD | 190 | 398 | 66 | <LD | 3.1 |
| ZSAT-05 50-100 | -100 | 8.0 | 67.6 | 66 | <LD | <LD | <LD | <LD | 23 | <LD | <LD | 173 | 64 | <LD | 2.1 |
| ZSAT-05 roca | -100 | 8.5 | 44.9 | 719 | <LD | <LD | <LD | <LD | 681 | <LD | 192 | 357 | 60 | 43 | 5.0 |
| ZSAT-06 5-50 | -5 | 8.2 | 19.5 | 283 | <LD | <LD | <LD | <LD | 31 | <LD | <LD | 339 | <LD | <LD | 1.9 |
| ZSAT-06 50-100 | -50 | 8.1 | 18.3 | 215 | <LD | <LD | <LD | <LD | 64 | <LD | 128 | 467 | <LD | <LD | 2.9 |
| ZSAT-06 100-150 | -100 | 8.3 | 16.9 | 109 | <LD | <LD | <LD | <LD | 44 | <LD | 122 | 420 | <LD | <LD | 2.9 |
| ZSAT-06 150-200 | -150 | 8.5 | 21.5 | 113 | <LD | <LD | <LD | <LD | 48 | <LD | 164 | 585 | <LD | <LD | 3.4 |
| ZSAT-06 200 | -200 | 8.2 | 14.2 | 75 | <LD | <LD | <LD | <LD | 16 | <LD | 131 | 546 | <LD | <LD | 3.3 |
| ZSAT-07 5-50 | -5 | 8.6 | 23.3 | 390 | <LD | <LD | <LD | <LD | 46 | <LD | <LD | 331 | <LD | <LD | 2.2 |
| ZSAT-07 50-100 | -50 | 8.6 | 24.0 | 399 | <LD | <LD | <LD | <LD | 70 | <LD | 109 | 416 | 63 | <LD | 2.9 |
| ZSAT-07 100-150 | -100 | 8.4 | 14.2 | 264 | <LD | <LD | <LD | <LD | 59 | <LD | <LD | 358 | <LD | <LD | 2.6 |

| Clave de campo | Prof. | pH | C.E. | As | Cd | Cr | Hg | Ag | Pb | Se | V | Mn | Zn | Cu | Fe |
|----------------------------|-------|-----|----------------------------------|--------------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|------|------|------|
| | cm | | $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ | $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | | | | | | | |
| ZSAT-07 150-190 | -190 | 8.7 | 19.6 | 126 | <LD | <LD | <LD | <LD | 102 | <LD | 118 | 594 | <LD | <LD | 3.7 |
| ZSAT-08 5-50 | -5 | 7.5 | 7.0 | 45 | <LD | <LD | <LD | <LD | 12 | <LD | <LD | 507 | <LD | <LD | 2.9 |
| ZSAT-08 50-100 | -50 | 7.4 | 4.1 | 37 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 444 | <LD | <LD | 2.6 |
| ZSAT-08 100-150 | -100 | 7.3 | 4.5 | 64 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 110 | 339 | <LD | <LD | 2.2 |
| ZSAT-08 150-188 | -188 | 7.1 | 4.2 | 31 | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | <LD | 275 | <LD | <LD | 1.9 |
| ZSAT-09 5-50 | -5 | 6.9 | 14.1 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | <LD | 272 | <LD | <LD | 1.2 |
| ZSAT-09 50-100 | -50 | 6.4 | 7.2 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 12 | <LD | <LD | 242 | <LD | <LD | 1.2 |
| ZSAT-09 100-150 | -100 | 6.4 | 10.1 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | <LD | 213 | <LD | <LD | 1.8 |
| ZSAT-09 150-200 | -150 | 6.2 | 6.0 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | <LD | 160 | <LD | <LD | 1.4 |
| ZSAT-09 200 | -200 | 6.3 | 6.2 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | <LD | 197 | <LD | <LD | 1.3 |
| ZSAT-10 5-50 | -5 | 7.1 | 47.1 | 203 | <LD | <LD | <LD | <LD | 157 | <LD | 150 | 683 | 74 | <LD | 4.1 |
| ZSAT-10 50-100 | -50 | 7.2 | 42.6 | 92 | <LD | <LD | <LD | <LD | 40 | <LD | 124 | 585 | <LD | <LD | 3.6 |
| ZSAT-10 100-150 | -100 | 7.5 | 39.3 | 74 | <LD | <LD | <LD | <LD | 17 | <LD | 162 | 579 | <LD | <LD | 3.6 |
| ZSAT-10 150-220 | -150 | 7.4 | 48.1 | 73 | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | 145 | 521 | <LD | <LD | 3.5 |
| ZSAT-10 220 | -220 | 7.7 | 54.7 | 78 | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | 135 | 520 | <LD | <LD | 3.5 |
| ZSAT-11 5-50 | -5 | 7.0 | 8.1 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | <LD | 600 | <LD | <LD | 3.1 |
| ZSAT-11 50-100 | -50 | 6.7 | 5.3 | 19 | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | 85 | 332 | <LD | <LD | 2.1 |
| ZSAT-11 100-150 | -100 | 6.5 | 5.4 | 18 | <LD | <LD | <LD | <LD | 14 | <LD | <LD | 410 | <LD | <LD | 2.2 |
| ZSAT-11 150-220 | -150 | 6.5 | 5.9 | 17 | <LD | <LD | <LD | <LD | 13 | <LD | <LD | 493 | <LD | <LD | 2.7 |
| ZSAT-11 220 | -220 | 7.3 | 45.2 | 26 | <LD | <LD | <LD | <LD | 13 | <LD | 97 | 501 | <LD | <LD | 2.8 |
| ZSAT-12 5-50 | -5 | 6.7 | 13.1 | 35 | <LD | <LD | <LD | <LD | 10 | <LD | 121 | 455 | <LD | <LD | 2.6 |
| ZSAT-12 50-100 | -50 | 7.0 | 12.5 | 36 | <LD | <LD | <LD | <LD | 17 | <LD | <LD | 420 | <LD | <LD | 2.4 |
| ZSAT-12 100-150 | -100 | 7.1 | 37.6 | 53 | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | 116 | 431 | <LD | <LD | 2.5 |
| ZSAT-12 150-220 | -150 | 7.2 | 24.3 | 58 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 161 | 469 | <LD | <LD | 3.1 |
| ZSAT-12 220 | -220 | 7.6 | 42.3 | 60 | <LD | <LD | <LD | <LD | 12 | <LD | 150 | 433 | <LD | <LD | 2.8 |
| ZSAT-13 5-50 | -5 | 7.3 | 28.9 | 20 | <LD | <LD | <LD | <LD | 9 | <LD | <LD | 157 | <LD | <LD | 1.1 |
| ZSAT-13 50-100 | -50 | 7.7 | 29.6 | 28 | <LD | <LD | <LD | <LD | 13 | <LD | <LD | 190 | <LD | <LD | 1.3 |
| ZSAT-13 100-150 | -100 | 7.9 | 27.1 | 41 | <LD | <LD | <LD | <LD | 13 | <LD | <LD | 212 | <LD | <LD | 1.2 |
| ZSAT-13 150-180 | -180 | 7.8 | 33.5 | 24 | <LD | <LD | <LD | <LD | 11 | <LD | <LD | 215 | <LD | <LD | 1.2 |
| Límite de detección | | | | 14.5 | 6 | 95.5 | 30 | 40 | 3.7 | 40 | 93.2 | 107.3 | 61.1 | 42.7 | 0.01 |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis de la técnica de análisis.

En la Figura 5.12, se muestra el comportamiento de las concentraciones totales de As y Pb para cada uno de los conjuntos de muestras subsuperficiales. La línea discontinua muestra el VNF del As en la región y la línea punteada el del Pb.

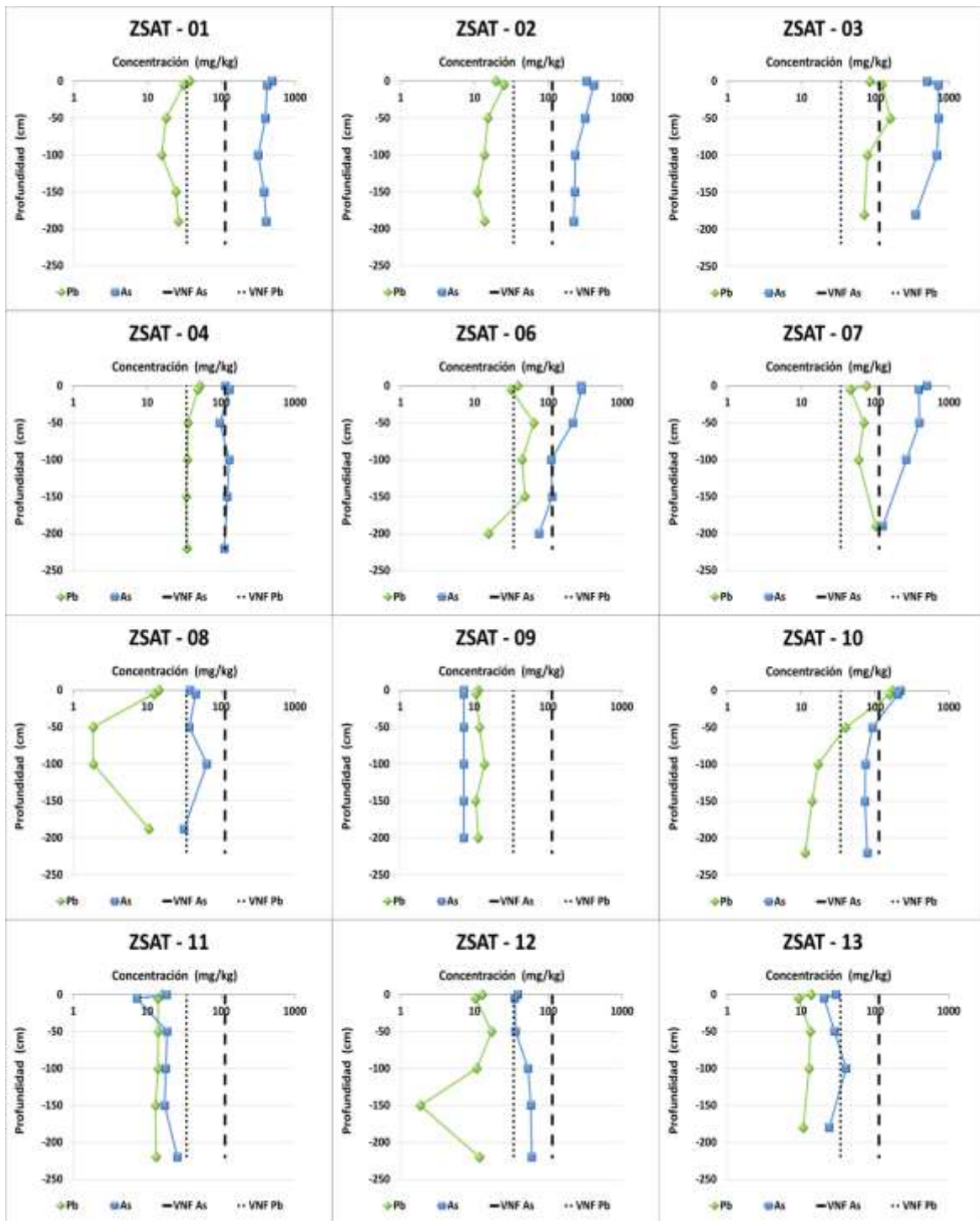


Figura 5. 12. Comportamiento del As (azul) y Pb (verde) en las muestras subsuperficiales.

Se observa que, en general, el Pb tiene un comportamiento similar al As con algunas excepciones como en los conjuntos ZSAT – 6 en el que, en los primeros 100 metros de profundidad, el As disminuye notablemente y el Pb aumenta. El conjunto ZSAT – 7 presenta una amplia disminución en las concentraciones de As, mientras el Pb se mantiene relativamente constante. En los conjuntos ZSAT – 8 y ZSAT – 12 se observan ligeros aumentos en la concentración de As y mientras el Pb disminuye.

Basados en la clasificación antes mencionada, se observa que las concentraciones de As presentan una disminución en función al aumento en la distancia con respecto a la zona de residuos. Los conjuntos de muestras ZSAT – 01 a ZSAT – 03 son las que presentan las mayores concentraciones de As, todas por encima de los VNF, seguidos de los conjuntos ZSAT – 04, ZSAT – 06, y ZSAT – 07 que presentan menores concentraciones de As, algunas de ellas por debajo de los VNF, mientras que los conjuntos de muestras ZSAT – 08 a ZSAT – 13 son los de menor concentración de As, todas por debajo del VNF.

De esta forma, se corrobora que la afectación de la zona de influencia debido a la dispersión de los residuos mineros históricos es preferentemente superficial.

Sin embargo, en la zanja ZSAT – 05 los EPT presenta un comportamiento diferente a todos los demás conjuntos de muestras que sugiere una posible migración de los contaminantes hacia el subsuelo.

El comportamiento observado en este conjunto de muestras presenta concentraciones de As y Pb relativamente bajas en la superficie, las cuales se encuentran por debajo de los VNF. Se muestra un ligero aumento en las concentraciones con respecto a la profundidad, permaneciendo por debajo de los VNF, sin embargo, en la última muestra de esta zanja se presentan concentraciones muy superiores al VNF, siendo las mayores concentraciones de todas las muestras colectadas.

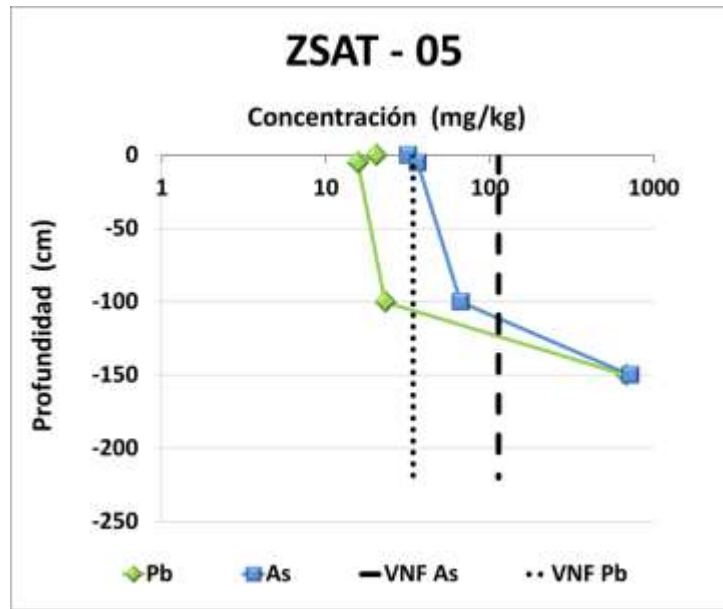


Figura 5. 13. Comportamiento del As y Pb en el conjunto de muestras subsuperficiales ZSAT – 05.

En el fondo de la zanja ZSAT – 05 (1.5 m), se alcanzó el techo del estrato rocoso, lo que sugiere que las concentraciones de EPT en esta última muestra sea de origen natural; ya que se ha reportado la presencia de arsenopirita (FeAsS) y galena (PbS) en las rocas que yacen en estratos rocosos relativamente profundos (< 80 m) de acuerdo a Ziegler, F. (Tesis en proceso).



Figura 5. 14. Imagen fotográfica de la zanja ZSAT – 05.

5.2.2.1 Análisis de muestras de roca

Las muestras de roca obtenidas al fondo de la zanja ZSAT – 05 (1.5 m) se analizaron mediante Microscopía Electrónica de Barrido Acoplada con Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS). Los resultados obtenidos (Tabla 5.10) indican la presencia de dos tipos de partículas en las que predominan Fe-As-S y Pb-S; que pudieran ser asociados a la arsenopirita y galena, lo que corroboraría la presencia de estos dos minerales en las rocas de la zonas como ha sido documentado por Ziegler, F. (Tesis en proceso); y en consecuencia aportaría evidencias del origen natural de la presencia de As y Pb.

Tabla 5. 10. Concentraciones elementales de las muestras de roca analizadas mediante MEB-EDS.

| Elemento | Punto 1 | Punto 2 | Punto 3 | Punto 4 | Punto 5 |
|----------|------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Peso en % | | | | |
| Na | 0.004 | 0.914 | ND | ND | 0.226 |
| Mg | ND | 0.125 | 0.718 | ND | ND |
| Al | ND | 1.320 | 1.154 | ND | ND |
| Si | 0.849 | 2.159 | 1.365 | 4.647 | 3.255 |
| S | 22.915 | 7.923 | 7.793 | 22.061 | 19.632 |
| K | 0.124 | 0.608 | 0.357 | 0.325 | 1.078 |
| Ca | 0.096 | 0.424 | 0.440 | ND | ND |
| Ti | ND | 0.339 | 0.049 | 0.634 | 0.455 |
| Mn | 0.410 | ND | ND | 0.221 | 1.228 |
| Fe | 38.549 | 1.329 | 3.543 | 33.331 | 39.349 |
| Ni | ND | 0.327 | ND | 1.511 | 1.282 |
| As | 37.054 | ND | 0.152 | 37.271 | 33.495 |
| Pb | ND | 84.533 | 84.431 | ND | ND |

ND: No detectado

La Figura 5.15 muestra las imágenes captadas por medio de MEB-EDS. Las partículas resaltadas son aquellas que fueron analizadas y los espectros obtenidos mediante dicho análisis se muestran en la Figura 5.16.

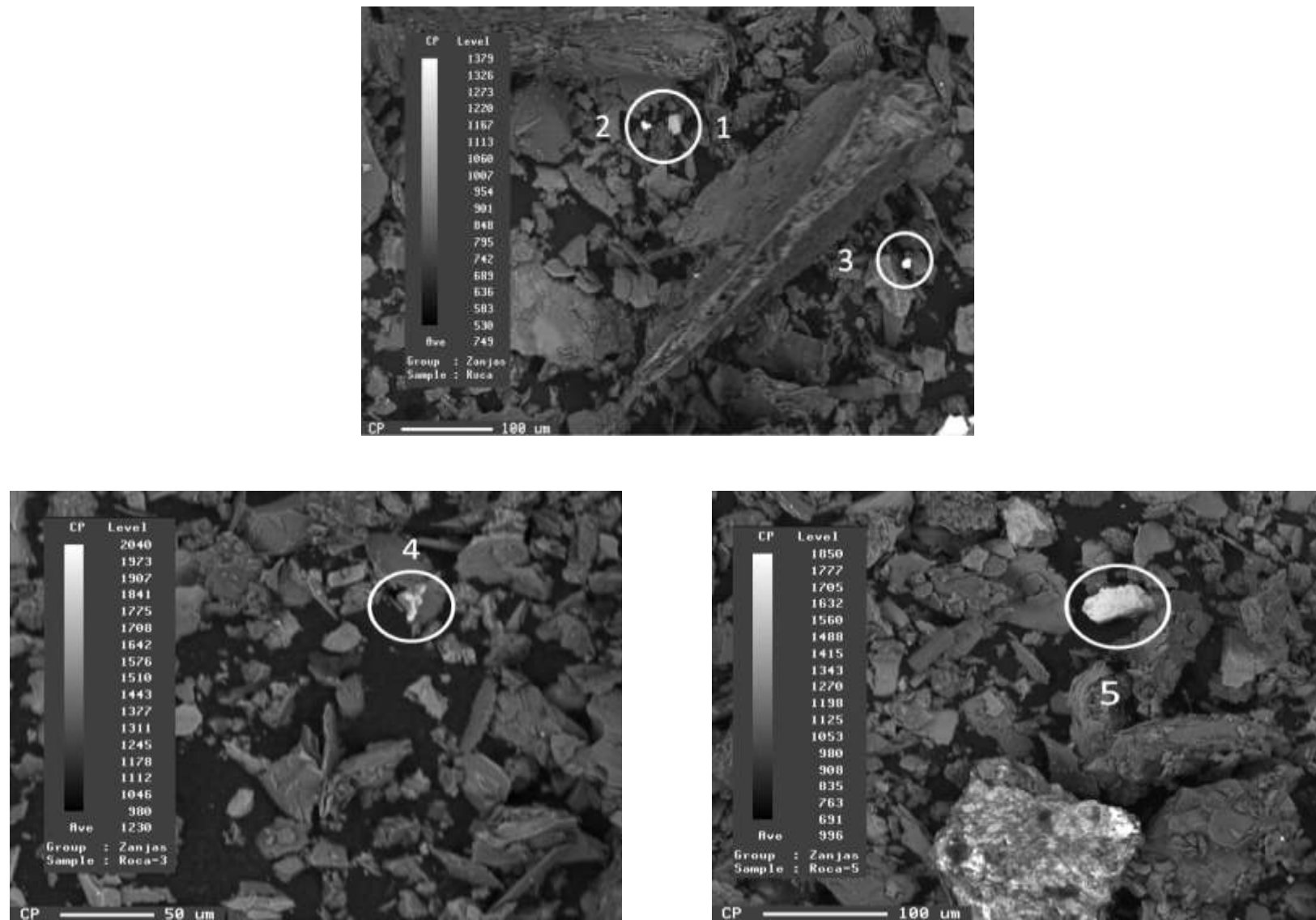


Figura 5. 15. Microfotografías obtenidas mediante MEB - EDS de la muestras del fondo de la zanja ZSAT – 05. Las partículas 1, 4 y 5 corresponden a Fe-As-S y las partículas 2 y 3, a Pb-S.

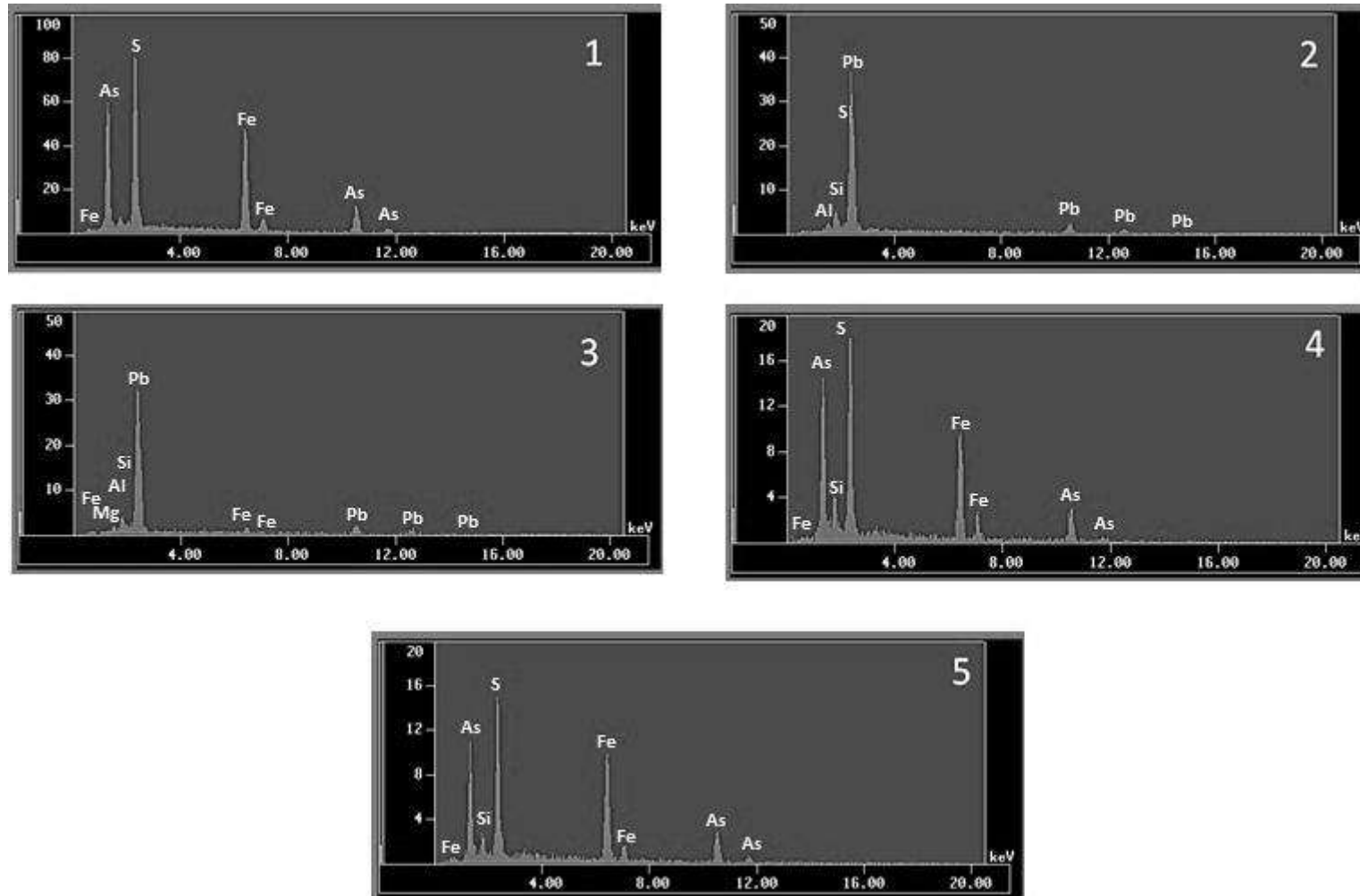


Figura 5. 16. Espectros obtenidos mediante MEB – EDS de la muestra del fondo de la zanja ZSAT – 05. Los espectros 1, 4 y 5 corresponden a partículas de Fe-As-S y los espectros 2 y 3 corresponden a partículas de Pb-S.

5.2.2.2 Geodisponibilidad de las muestras subsuperficiales

Se realizó la determinación de la geodisponibilidad de los contaminantes prioritarios en las muestras subsuperficiales. Se realizó una selección con base en la ubicación y concentraciones totales.

Los análisis muestran que el Zn no se encuentra geodisponible y se presentan concentraciones variables de As (No detectado – 0.301 mg·L⁻¹) y Pb (No detectado – 0.047 mg·L⁻¹) (Tabla 5.11).

Las concentraciones geodisponibles fueron comparadas con las concentraciones específicas solubles (Tabla 5.5). Los resultados muestran bajas concentraciones geodisponibles de As, Pb y Zn, todas ellas menores a las concentraciones específicas solubles; lo que corrobora que estos elementos no están migrando a las partes inferiores del perfil y que la contaminación de esta zona de influencia, debido a la dispersión de los residuos mineros históricos, es superficial.

Tabla 5. 11. Concentraciones geodisponibles de los contaminantes prioritarios en los suelos subsuperficiales.

| Clave de Campo | As | Pb | Zn |
|-----------------|--------------------|-------|-----|
| | mg·L ⁻¹ | | |
| ZSAT-01 0-5 | 0.022 | <LD | <LD |
| ZSAT-01 5-50 | 0.030 | <LD | <LD |
| ZSAT-01 50-100 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-01 100-150 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-01 150-190 | 0.015 | <LD | <LD |
| ZSAT-01 190 | <LD | 0.005 | <LD |
| ZSAT-03 0-5 | 0.061 | <LD | <LD |
| ZSAT-03 5-50 | 0.075 | <LD | <LD |
| ZSAT-03 50-100 | 0.157 | 0.047 | <LD |
| ZSAT-03 100-150 | 0.040 | <LD | <LD |
| ZSAT-03 150-180 | 0.301 | 0.031 | <LD |
| ZSAT-07 0-5 | 0.109 | <LD | <LD |
| ZSAT-07 5-50 | 0.032 | <LD | <LD |
| ZSAT-07 50-100 | 0.115 | <LD | <LD |
| ZSAT-07 100-150 | 0.166 | <LD | <LD |

| Clave de Campo | As | Pb | Zn |
|----------------------------|--------------------|-------|-------|
| | mg·L ⁻¹ | | |
| ZSAT-07 150-190 | 0.030 | <LD | <LD |
| ZSAT-10 0-5 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-10 5-50 | 0.023 | 0.007 | <LD |
| ZSAT-10 50-100 | 0.089 | <LD | <LD |
| ZSAT-10 100-150 | <LD | 0.007 | 0.011 |
| ZSAT-10 150-220 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-10 220 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-12 0-5 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-12 5-50 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-12 50-100 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-12 100-150 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-12 150-220 | <LD | <LD | <LD |
| ZSAT-12 220 | <LD | <LD | <LD |
| Límite de detección | 0.010 | 0.010 | 0.010 |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis de la técnica de análisis.

Así mismo, se analizaron las concentraciones de los iones mayores (Tabla 5.12). Los extractos se caracterizan por concentraciones variables, en mg·L⁻¹, de Na⁺ (0.42 – 2.06), K⁺ (2.00 – 20.14), Ca²⁺ (1.79 – 10.52), Mg²⁺ (0.29 – 1.39), F⁻ (No detectado – 2.36), Cl⁻ (3.25 – 27.99), NO₃⁻ (0.36 – 5.91), SO₄²⁻ (0.36 – 1.56) y HCO₃⁻ (3.37 – 24.43).

Se observa que los iones mayores se presentan en concentraciones menores a las establecidas en la NOM-127-SSA1-1994 para el agua potable por lo que no representan algún problema ambiental.

Tabla 5. 12. Concentraciones de los iones mayores en los extractos de los suelos subsuperficiales.

| Clave de Campo | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | F ⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ |
|-----------------|--------------------|----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | mg·L ⁻¹ | | | | | | | | |
| ZSAT 01 5-50 | 0.57 | 3.20 | 6.19 | 0.54 | 0.01 | 3.40 | 2.28 | 0.58 | 21.06 |
| ZSAT 01 50-100 | 0.42 | 2.00 | 6.67 | 0.46 | 0.05 | 3.34 | 0.43 | 0.47 | 18.53 |
| ZSAT 01 100-150 | 0.54 | 2.29 | 6.42 | 0.49 | 0.03 | 3.41 | 0.65 | 0.53 | 18.53 |
| ZSAT 01 150-190 | 0.98 | 2.27 | 7.56 | 0.79 | 0.03 | 3.65 | 3.44 | 0.76 | 22.74 |
| ZSAT 01 190 | 0.76 | 2.22 | 6.88 | 0.58 | 0.03 | 3.39 | 1.14 | 0.60 | 21.48 |
| ZSAT 03 5-50 | 0.51 | 3.10 | 5.04 | 0.73 | 0.03 | 3.42 | 5.91 | 0.60 | 12.64 |
| ZSAT 03 50-100 | 0.46 | 3.05 | 3.58 | 0.96 | 0.05 | 3.25 | 0.36 | 0.36 | 15.16 |

| Clave de Campo | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | F ⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ |
|-----------------|--------------------|----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | mg·L ⁻¹ | | | | | | | | |
| ZSAT 03 100-150 | 0.99 | 3.08 | 3.52 | 1.03 | 0.07 | 3.38 | 0.84 | 0.50 | 17.69 |
| ZSAT 03 150-180 | 2.06 | 3.01 | 3.38 | 1.04 | 0.07 | 3.58 | 1.88 | 1.56 | 16.85 |
| ZSAT 07 5-50 | 0.47 | 3.12 | 3.35 | 0.53 | 0.03 | 3.49 | 1.48 | 1.03 | 10.11 |
| ZSAT 07 50-100 | 0.92 | 19.95 | 9.38 | 1.39 | 0.03 | 27.89 | 1.08 | 1.14 | 16.51 |
| ZSAT 07 100-150 | 0.58 | 2.56 | 4.00 | 0.45 | 0.02 | 3.40 | 0.77 | 0.69 | 12.64 |
| ZSAT 07 150-190 | 0.76 | 20.11 | 9.59 | 1.12 | 0.03 | 27.99 | 1.10 | 0.49 | 14.98 |
| ZSAT 10 5-50 | 0.84 | 2.80 | 6.95 | 0.44 | 0.05 | 3.72 | 2.50 | 0.67 | 16.85 |
| ZSAT 10 50-100 | 1.31 | 2.81 | 6.30 | 0.29 | 0.02 | 4.26 | 1.91 | 1.04 | 16.85 |
| ZSAT 10 100-150 | 1.09 | 20.14 | 10.52 | 0.64 | 0.02 | 27.73 | 0.75 | 0.52 | 13.14 |
| ZSAT 10 150-220 | 1.66 | 2.46 | 5.80 | 0.55 | 0.03 | 3.91 | 1.17 | 0.98 | 18.53 |
| ZSAT 10 220 | 1.52 | 2.34 | 6.72 | 0.48 | 0.02 | 3.85 | 0.75 | 0.81 | 22.74 |
| ZSAT 12 5-50 | 0.53 | 2.69 | 1.79 | 0.46 | 0.01 | 3.44 | 2.18 | 0.43 | 3.37 |
| ZSAT 12 50-100 | 0.84 | 2.66 | 2.66 | 0.54 | 0.01 | 3.44 | 1.32 | 0.43 | 7.58 |
| ZSAT 12 100-150 | 0.87 | 2.62 | 2.22 | 0.45 | <LOD | 3.52 | 0.77 | 0.61 | 8.42 |
| ZSAT 12 150-220 | 1.26 | 2.72 | 2.86 | 0.62 | <LOD | 3.57 | 1.02 | 0.47 | 10.11 |
| ZSAT 12 220 | 1.62 | 2.31 | 5.90 | 1.07 | 0.02 | 3.54 | 1.52 | 0.58 | 24.43 |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis de la técnica de análisis.

Con las concentraciones geodisponibles y las concentraciones totales de las muestras sólidas, se calculó el porcentaje soluble o geodisponible de los contaminantes prioritarios en los suelos subsuperficiales (Tabla 5.13). Se observa que existen porcentajes variables de As (0 – 1.939%, media 0.289%) y Pb (0 – 0.875%, media 0.087%), pero porcentajes nulos de Zn.

Tabla 5. 13. Concentraciones totales y geodisponibles, en mg·kg⁻¹ y porcentaje, de los contaminantes prioritarios en los suelos subsuperficiales.

| Clave de campo | TOTALES | | | GEODISPONIBLES | | | | | |
|-----------------|---------------------|------------|-----|---------------------|------|-----|-------|-------|-----|
| | As | Pb | Zn | As | Pb | Zn | As | Pb | Zn |
| | mg·kg ⁻¹ | | | mg·kg ⁻¹ | | | % | | |
| ZSAT-01 5-50 | 419 | 31 | 73 | 0.60 | <LD | <LD | 0.142 | N/S | N/S |
| ZSAT-01 50-100 | 397 | 18 | 70 | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| ZSAT-01 100-150 | 316 | 15 | <LD | <LD | <LD | <LD | N/S | N/S | N/S |
| ZSAT-01 150-190 | 380 | 24 | 74 | 0.29 | <LD | <LD | 0.077 | N/S | N/S |
| ZSAT-01 190 | 407 | 26 | 61 | <LD | <LD | <LD | 0.000 | N/S | N/S |
| ZSAT-03 5-50 | 713 | 123 | 82 | 1.50 | <LD | <LD | 0.211 | N/S | N/S |
| ZSAT-03 50-100 | 720 | 160 | 74 | 3.14 | 0.95 | <LD | 0.435 | 0.594 | N/S |
| ZSAT-03 100-150 | 681 | 78 | 72 | 0.80 | <LD | <LD | 0.117 | N/S | N/S |

| Clave de campo | TOTALES | | | GEODISPONIBLES | | | | | |
|-----------------|---------------------|-----|-----|---------------------|------|------|-------|-------|-----|
| | As | Pb | Zn | As | Pb | Zn | As | Pb | Zn |
| | mg·kg ⁻¹ | | | mg·kg ⁻¹ | | | % | | |
| ZSAT-03 150-180 | 351 | 71 | 77 | 6.03 | 0.61 | <LD | 1.717 | 0.866 | N/S |
| ZSAT-07 5-50 | 390 | 46 | <LD | 0.65 | <LD | <LD | 0.166 | N/S | N/S |
| ZSAT-07 50-100 | 399 | 70 | 63 | 2.30 | <LD | <LD | 0.576 | N/S | N/S |
| ZSAT-07 100-150 | 264 | 59 | <LD | 3.31 | <LD | <LD | 1.257 | N/S | N/S |
| ZSAT-07 150-190 | 126 | 102 | <LD | 0.60 | <LD | <LD | 0.474 | N/S | N/S |
| ZSAT-10 5-50 | 203 | 157 | 74 | 0.47 | <LD | <LD | 0.229 | 0.094 | N/S |
| ZSAT-10 50-100 | 92 | 40 | <LD | 1.79 | <LD | <LD | 1.939 | N/S | N/S |
| ZSAT-10 100-150 | 74 | 17 | <LD | <LD | <LD | 0.22 | 0.000 | 0.875 | N/S |
| ZSAT-10 150-220 | 73 | 14 | <LD | <LD | <LD | <LD | 0.000 | N/S | N/S |
| ZSAT-10 220 | 78 | 11 | <LD | <LD | <LD | <LD | 0.000 | N/S | N/S |
| ZSAT-12 5-50 | 35 | 10 | <LD | <LD | <LD | <LD | 0.000 | N/S | N/S |
| ZSAT-12 50-100 | 36 | 17 | <LD | <LD | <LD | <LD | 0.000 | N/S | N/S |
| ZSAT-12 100-150 | 53 | 11 | <LD | <LD | <LD | <LD | 0.000 | N/S | N/S |
| ZSAT-12 150-220 | 58 | <LD | <LD | <LD | <LD | <LD | 0.000 | N/S | N/S |
| ZSAT-12 220 | 60 | 12 | <LD | <LD | <LD | <LD | 0.000 | N/S | N/S |

<LD: Menor al límite de detección de la técnica de análisis de la técnica de análisis.

N/S No soluble

Los resultados obtenidos indican que los contaminantes se encuentran en porcentajes geodisponibles muy bajos o nulos y, por lo tanto, se infiere que la presencia de éstos en los lixiviados se debe a muy pequeñas cantidades de partículas sólidas de tamaño menor a 45 µm, que de acuerdo a los criterios de la normatividad ambiental mexicana no representan un riesgo para el ambiente. Estos resultados permiten concluir que la mayor cantidad de los contaminantes está quedando retenida en la fase sólida.

5.3 DETERMINACIÓN DEL RIESGO A LA SALUD

Debido a que las muestras que presentan cierto grado de contaminación se ubican dentro de una zona residencial, pueden representar un riesgo a la salud de la población. Se realizó el análisis de bioaccesibilidad con el fin de calcular la concentración que representa tal riesgo.

Con base en la NOM-147, se determinaron los valores de bioaccesibilidad para la los contaminantes prioritarios normados presentes en la zona donde existe población humana expuesta. Los resultados se muestran en la Tabla 5.14.

Tabla 5. 14. Valores de bioaccesibilidad de los contaminantes prioritarios en los suelos de uso residencial calculados con base en la NOM-147.

| Clave de campo | As | | | | | Pb | | | | |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------|------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------|------|
| | CT (mg·kg ⁻¹) | CB (mg·L ⁻¹) | CB (mg·kg ⁻¹) | % BIO | BA | CT (mg·kg ⁻¹) | CB (mg·L ⁻¹) | CB (mg·kg ⁻¹) | % BIO | BA |
| SSAT-02 | 749.90 | 4.10 | 82.06 | 10.94 | 0.11 | 134.90 | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-03 | 291.90 | 2.48 | 49.52 | 16.96 | 0.17 | 170.42 | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-04 | 865.90 | 7.46 | 149.21 | 17.23 | 0.17 | 1282.66 | 60.44 | 1208.86 | 94.25 | 0.94 |
| SSAT-05 | 313.75 | 2.22 | 44.46 | 14.17 | 0.14 | 43.53 | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-06 | 622.09 | 6.43 | 128.53 | 20.66 | 0.21 | 58.95 | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-07 | 3315.10 | 55.40 | 1107.92 | 33.42 | 0.33 | 4766.46 | 164.37 | 3287.48 | 68.97 | 0.69 |
| SSAT-08 | 602.90 | 5.02 | 100.41 | 16.65 | 0.17 | <LD | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-09 | 442.30 | 6.63 | 132.56 | 29.97 | 0.30 | 121.70 | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-10 | 1092.00 | 5.89 | 117.87 | 10.79 | 0.11 | 69.43 | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-11 | 1037.90 | 8.73 | 174.61 | 16.82 | 0.17 | 145.41 | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-12 | 7276.40 | 32.65 | 653.06 | 8.98 | 0.09 | 25969.73 | 820.90 | 16417.92 | 63.22 | 0.63 |
| SSAT-13 | 133.32 | 1.06 | 21.14 | 15.86 | 0.16 | 426.70 | <LD | <LOD | N/A | N/A |
| SSAT-14 | 146.70 | 1.52 | 30.40 | 20.72 | 0.21 | 224.09 | <LD | <LOD | N/A | N/A |
| SSAT-15 | 506.80 | 4.61 | 92.29 | 18.21 | 0.18 | 2436.50 | 45.89 | 917.87 | 37.67 | 0.38 |
| SSAT-16 | 83.90 | 1.17 | 23.33 | 27.81 | 0.28 | 107.26 | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-17 | 60.80 | <LD | <LD | N/A | N/A | 94.09 | <LD | <LD | N/A | N/A |
| SSAT-18 | 85.29 | <LD | <LD | N/A | N/A | 194.84 | 5.40 | 108.03 | 55.44 | 0.55 |
| SSAT-19 | 153.40 | 1.30 | 26.07 | 16.99 | 0.17 | 167.42 | 5.14 | 102.72 | 61.35 | 0.61 |
| SSAT-20 | 2352.90 | 5.88 | 117.54 | 5.00 | 0.05 | 2419.88 | 60.35 | 1206.98 | 49.88 | 0.50 |
| Mínimo | 60.80 | 1.06 | 21.14 | 5.00 | 0.05 | 43.53 | 5.14 | 102.72 | 37.67 | 0.38 |
| Máximo | 7276.40 | 55.40 | 1107.92 | 33.42 | 0.33 | 25969.73 | 820.90 | 16417.92 | 94.25 | 0.94 |
| Promedio | 1059.64 | 8.97 | 179.47 | 17.72 | 0.18 | 2157.44 | 166.07 | 3321.41 | 61.54 | 0.62 |
| Mediana | 506.80 | 5.02 | 100.41 | 16.96 | 0.17 | 168.92 | 60.35 | 1206.98 | 61.35 | 0.61 |
| SD | 1718.97 | 13.99 | 279.88 | 7.37 | 0.07 | 6074.12 | 293.62 | 5872.48 | 17.66 | 0.18 |

CT Concentración total, CB Concentración bioaccesible, %BIO Porcentaje bioaccesible, BA Factor de bioaccesibilidad, <LD Menor al límite de detección de la técnica de análisis de la técnica de análisis, N/A No aplica, SD Desviación Estándar

Los resultados muestran que los contaminantes prioritarios de los suelos superficiales se encuentran bioaccesibles en concentraciones variables: As (No detectado – 1,107.92 mg·kg⁻¹) y Pb (No detectado – 16,417.92 mg·kg⁻¹).

De acuerdo a la NOM-147, cuando existe población humana expuesta a la contaminación, las concentraciones totales de los contaminantes en el suelo deben ser iguales o inferiores a las concentraciones específicas totales (CE_T). Se determinaron dichas concentraciones específicas para los contaminantes prioritarios regulados de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$CE_T = \frac{CR_T}{BA}$$

CE_T = concentración específica total con base en riesgo a la salud ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

CR_T = concentración de referencia total en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tabla 3.2)

BA = factor de bioaccesibilidad (Tabla 5.14)

Los resultados se presentan en la Tabla 5.15. Es importante mencionar que se para el cálculo se tomó la mediana del FB debido a que las desviaciones estándar calculadas para las CB son altas.

Tabla 5. 15. Concentraciones Específicas Totales (CE_T), en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, de los contaminantes prioritarios en los suelos de uso residencial con base en la NOM-147.

| EPT | As | Pb |
|--------------------------|---------------|---------------|
| CR_T | 22.00 | 400.00 |
| BA | 0.17 | 0.61 |
| CE_T | 129.41 | 655.74 |

Al realizar la comparación de las CE_T (Tabla 5.15) con las Concentraciones Totales obtenidas en los análisis (Tabla 5.4), se observa que el As supera las CE_T hasta 28.29 veces (con una media de 6.02) y el Pb en 23.19 veces (con una media de 2.12). Esto indica que los suelos superficiales de la zona residencial representan un riesgo para la salud de la población.

En las figuras 5.17 y 5.18, se presentan los niveles de riesgo a la salud con base en las concentraciones de As en los suelos de los poblados de San Antonio y El Triunfo, respectivamente, y en las figuras 5.19 y 5.20, se presentan los del Pb.

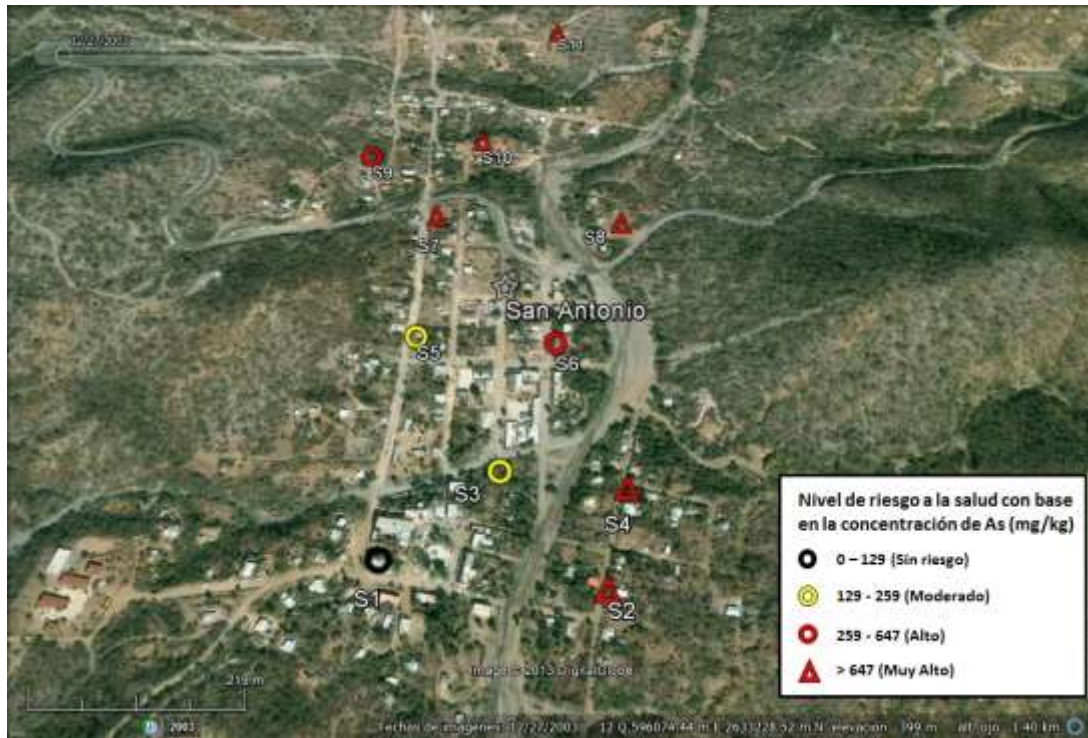


Figura 5. 17. Mapa de niveles de riesgo a la salud con base en la concentración de As en los suelos del poblado San Antonio.

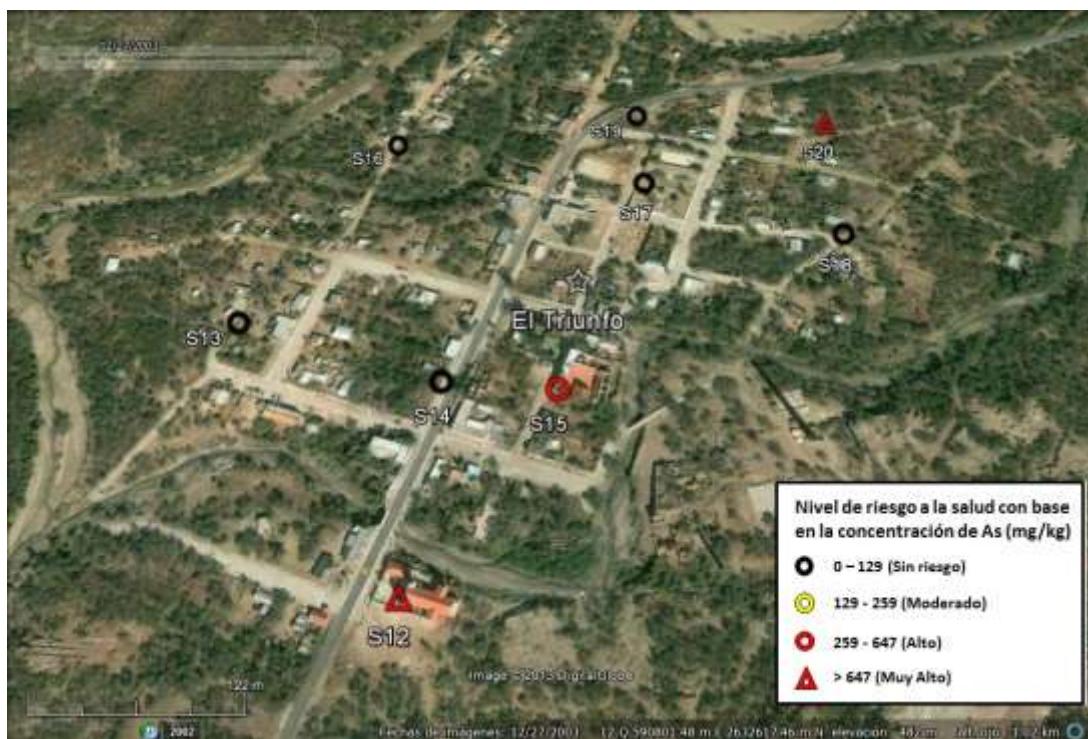


Figura 5. 18. Mapa de niveles de riesgo a la salud con base en la concentración de As en los suelos del poblado El Triunfo.

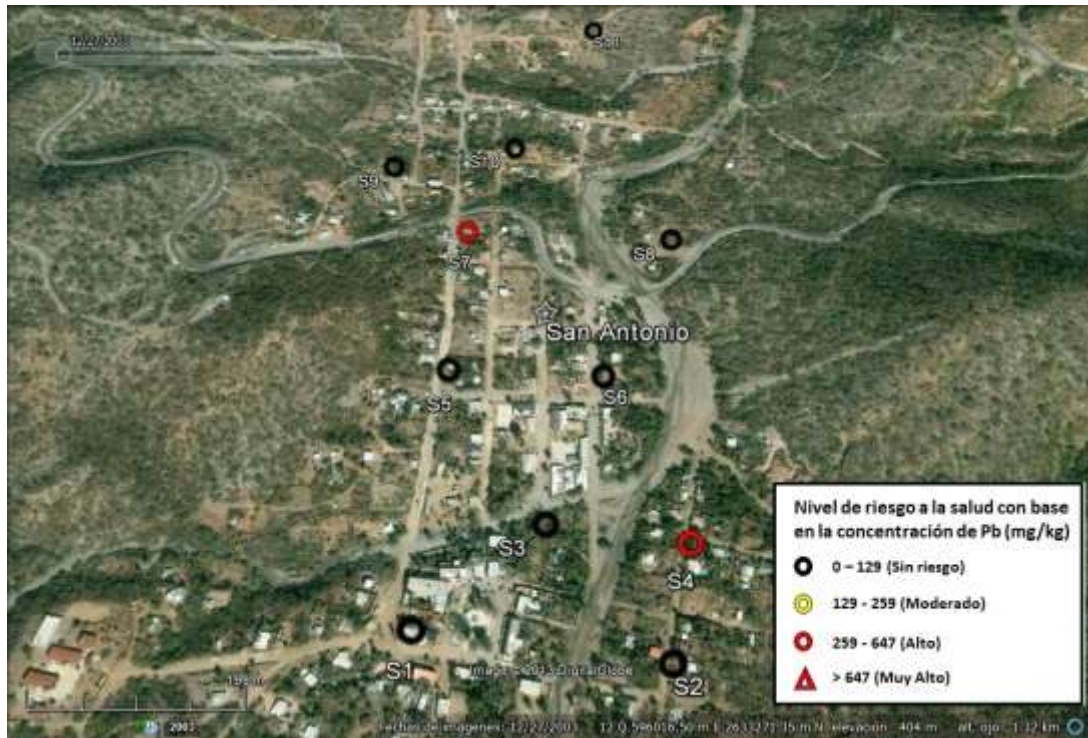


Figura 5. 19. Mapa de niveles de riesgo a la salud con base en la concentración de Pb en los suelos del poblado San Antonio.

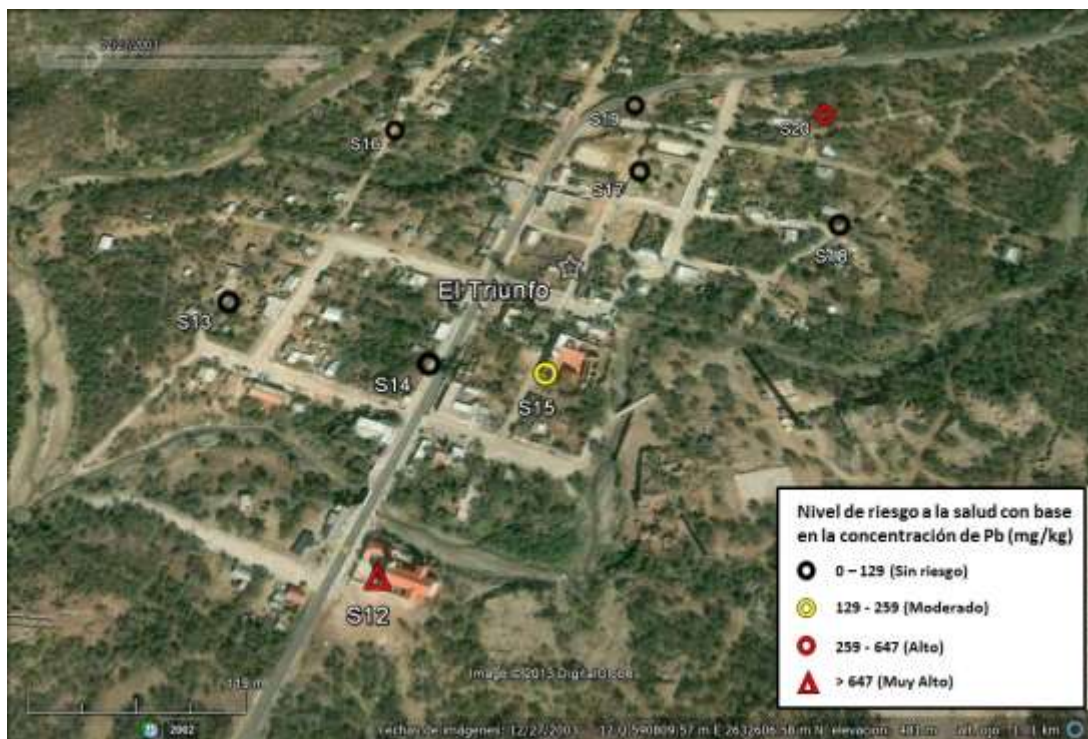


Figura 5. 20. Mapa de niveles de riesgo a la salud con base en la concentración de Pb en los suelos del poblado El Triunfo.

6. CONCLUSIONES

Los residuos mineros históricos se están dispersando, hídrica y eólicamente, y causan afectación a suelos y sedimentos. Los contaminantes prioritarios que afectan los suelos y sedimentos son el As y el Pb alcanzando niveles de hasta 3,791 y 15,860 mg·kg⁻¹, respectivamente.

La zona afectada abarca desde la zona de almacenamiento de los residuos hasta una distancia aproximada de 12 km aguas abajo en dirección a la Bahía La Ventana, en la que se incluye la zona de uso residencial. En esta zona, se considera que existe un riesgo al ambiente debido a las altas concentraciones totales de los EPT.

La afectación es preferentemente superficial, ya que no se detectó migración vertical en la zona de influencia. A pesar de las altas concentraciones totales de los EPT, las concentraciones geodisponibles son relativamente bajas (As 1.308 mg·L⁻¹, Pb 1.371 mg·L⁻¹).

En la zona de uso residencial, poblados San Antonio y El Triunfo, se identificó que, además del riesgo ambiental, existe un riesgo a la salud humana debido a que las mayores concentraciones de los contaminantes prioritarios (As y Pb) se detectan en esta zona y presentan altos niveles de bioaccesibilidad. Las Concentraciones Específicas Totales (CE_T) fueron superadas hasta en 28.29 veces para el As y 23.19 veces para el Pb. Se considera que esta es la zona con mayor afectación

7. RECOMENDACIONES

Debido a las altas concentraciones bioaccesibles de As y Pb en los suelos de uso residencial, se recomienda realizar una remediación por medio de la estabilización de suelos para disminuir la bioaccesibilidad, y a su vez la geodisponibilidad, de los contaminantes. Este método consiste en la precipitación de minerales de Pb y As estables en condiciones gástricas mediante el uso de fosfato de plomo y arseniato de bario o arseniato de plomo.

En virtud de que las rocas de la región presentan niveles importantes de As y Pb, se recomienda considerar los estudios del acuífero de la zona, así como análisis detallados de las rocas de la región con el fin de determinar si las concentraciones de contaminantes detectados en las aguas subterráneas provienen de los residuos mineros históricos o bien su origen se debe a la lixiviación de los minerales presentes en las rocas de la región.

En relación a la presencia del ion F^- en los suelos, se recomienda realizar estudios más detallados para determinar las concentraciones de este ion en los suelos y su posible afectación al acuífero de la zona. Se considera que este ion podría proceder de los residuos históricos, sin embargo, la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 no contempla su análisis aun cuando es un ion tóxico que puede representar un riesgo para el ambiente y la salud humana.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias – Arce, V., Rosa-Coronado, F., Puente-Santibáñez, D., Lovera-Dávila, D., 2005, Refractariedad de Concentrados Auríferos: Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, 8 (16), 5-14.
- Basta, N., Gradwohl, R., 2000, Estimation of Cd, Pb, and Zn Bioavailability in Smelter – Contaminated Soils by a Sequential Extraction Procedure: Journal of Soils Contamination, 9 (2), 149-164.
- Belmonte – Serrato, F., Romero – Díaz, A., Alonso – Sorría, F., Moreno – Brotóns, J., Rojo – López, S., 2010, Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras del sureste de España: Papeles de Geografía, Universidad de Murcia España, 51-52, 45-54.
- Briceño – Arellano, A. D., en proceso, Evaluación de la calidad del agua subterránea en el Distrito Minero San Antonio-El Triunfo: México, D. F., Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Licenciatura.
- Carrillo, A., 1996. Environmental geochemistry of the San Antonio-El Triunfo mining area, southernmost Baja California Peninsula Mexico. Ph. D. Thesis. Department of Geology and Geophysics, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, USA, 186 p.
- Carrillo, A., Drever, J. I., 1998, Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, Mexico: Environmental Geology, 39 (11), 35-39.
- Carrillo, A., Drever, J. I., Martínez, M., 2000, Arsenic content and groundwater geochemistry of the San Antonio – El Triunfo, Carrizal and Los Planes aquifers in southernmost Baja California, Mexico: Geofísica Internacional, 37(1), 1295-1303.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2003, Estudio de caracterización de la intrusión salina en el acuífero de Los Planes, B.C.S., Subdirección General Técnica, Gerencia Regional de la Península de Baja California, Gerencia Estatal en Baja California Sur, Baja California Sur, México, 276 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2009, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero Los Planes, estado de Baja California Sur, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos, México D.F., México, 29 pp.

Compañía Minera Pitalla, S. A. de C. V., 2011, Proyecto minero "San Antonio", Baja California Sur, México, 26 pp.

Compañía Minera Pitalla, S. A. de C. V., 2012, Informe preventivo: Proyecto de exploración minera directa "Texcalama", San Antonio, Municipio de La Paz, Baja California Sur, 192 pp.

Cortinas de Nava, C., Ordáz, Y., 1994, Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1993-1994: D. F., México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Informe.

Drexler, J.W., Brattin, W., 2007. An In Vitro Procedure for Estimation of Lead Relative Bioavailability: With Validation: Human and Ecological Risk Assessment, 13(2), 383-401.

Flores-Martínez, A., Yáñez-Sandoval, A., Sánchez López, J. M., Mondragón-Montes de Oca, A., 2002, Informe de la situación del medio ambiente en México, Compendio de estadísticas ambientales, México, D. F., Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 258 pp.

Gálvez, V., 1922, Exploración en la Península de Baja California, Instituto Geológico de México, Boletín Núm. 39, 108 pp.

Gutiérrez-Ruiz, M. E., Moreno-Turrent, M., 1995, Los residuos en la minería mexicana, en Garfias y Ayala F. J., Barojas-Weber, L. (eds), Residuos peligrosos en México: D. F., México, Inédita, S. A., 37-44.

Gutiérrez-Ruiz, M., Romero, F. M., González-Hernández, G., 2007, Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24(2), pp. 170-184.

Gutiérrez-Ruiz, M. E., Ceniceros-Gómez A., Luna-González, L., Morales-Manilla, L. M., Romero, F., Martínez-Jardines, L. G., Rosas, H. y J. López-Blanco. (2009). Elaboración de un mapa regional de valores de fondo de elementos potencialmente tóxicos (EPT) de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Informe final. SNIBCONABIO proyecto No. GS002. México, D.F.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010, La minería en México 2010, Serie estadísticas sectoriales Número 24, Aguascalientes, Ags., 156 pp.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2011, Anuario estadístico. Baja California Sur, ed. 2011 (en línea), actualización: 23 de agosto de 2012, <<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265&s=inegi&upc=702825201913&pf=Prod&ef=&f=2&cl=0&tg=13&pg=0>>, consulta: 05 de julio de 2013

Joo – Sung, A., Young – Seog, P., Ju – Yong, K., Kyoung – Woong, K., 2005, Mineralogical and geochemical characterization of arsenic in abandoned mine tailings of Korea: Environmental Geochemistry and Health, 27, 147-157.

Kwang – Koo, K., Kyoung – Woong, K, Ju – Yong, K., In S. K., Young – Wook C., Jeong – Sik M., 2001, Characteristics of tailings from the closed metal mines as potential contamination source in South Korea: Environmental Geology, 41, pp. 358-364.

Lottermoser, B. G., 2010, Tailings, in Mine Wastes Characterization, Treatment, Environmental Impacts: Springer Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 205-241.

- Magdaleno – Rico, C. A., 2014, Peligrosidad de los residuos mineros históricos del Distrito Minero San Antonio-El Triunfo en la Paz Baja California Sur y evaluación de generación de drenaje ácido a través de pruebas estáticas: México, D. F., México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Licenciatura.
- Martínez, F.M.A., 1998. Contenido de Arsénico en el Agua subterránea de la Zona Minera de San Antonio, B.C.S., México: Relación de los Yacimientos Minerales y Obras Mineras. Tesis de Licenciatura en Geología. Universidad Autónoma de Baja California Sur. 62 pp.
- Martínez – Soriano, C., 2011, Evaluación de la peligrosidad de jales y lixiviados de una mina de sulfuros masivos en el Estado de México: México, D. F., México, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Licenciatura.
- Mejía, J., Carrizales, L., Rodríguez, V. M., Jiménez – Capdeville, M. E., Díaz – Barriga, F., 1999, Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras: Salud Pública de México, 41(2), 132-140.
- Mendoza – Amézquita, E., Armienta – Hernández, M. A., Ayora, C., Soler, A., Ramos – Ramírez, E., (2006), Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 23(1), 75-83.
- Monroy, M., Díaz-Barriga, F., Razo, I., Carrizales, L., 2002, Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados (Pb, Cu, Zn) y análisis de riesgo en salud en Villa de la Paz – Matehuala, S.L.P., San Luis Potosí, México, Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Nota Informativa, 7 pp.
- Norma Mexicana NMX-132 (2006). Que establece especificaciones generales para el muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. México.

- Naranjo-Pulido, A., H. Romero-Schmidt, L. Mendez-Rodríguez, B. Acosta-Vargas & A. Ortega-Rubio, 2002. Soil arsenic contamination in the Cape Region, B.C.S., Mexico. *Journal of Environmental Biology*, 23(4), 347-352.
- Norma Oficial Mexicana NOM-147 (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. *Diario Oficial de la Federación*, 2 de marzo de 2007. México.
- Norma Oficial Mexicana NOM-157 (2009). Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. *Diario Oficial de la Federación*, 30 de agosto de 2011. México.
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., Campos, A., 2006, Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: *Ecología Aplicada*, 5(1,2), 149-155.
- Posada – Ayala, I. H., 2011, *Geoquímica ambiental del Distrito Minero San Antonio, sedimentos de los arroyos de la cuenca de San Juan de los Planes y plataforma continental de Bahía La Ventana, BCS, México: La Paz, BCS, México, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Tesis de Maestría, 211 pp.*
- Romero – Díaz, A., García – Fernández, G., 2007, Contaminación por erosión eólica e hídrica de las áreas limítrofes a la antigua zona minera de La Unión – Cartagena: *Revista Murciana de Antropología*, 14, 77-96.
- Romero, F. M., Armienta, M. A., Gutiérrez, M. E., Villaseñor, G., 2008, Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24 (2), 43 – 54.
- Romero, F. M., Gutiérrez – Ruíz, M., 2010, Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43-53.

Romero – Guadarrama, J. A., 2011, Geoquímica de As, Hg, Pb y Zn y mineralogía en sedimentos superficiales de la cuenca de drenaje del Distrito Minero El Triunfo, B. C. S., México: La Paz, Baja California Sur, México, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Tesis de Maestría, 98 pp.

Ruby, M.W., Davis, A., Link, T.E., Schoof, R., Chaney, R.L., Freeman, G. B., Bergstrom, P., 1993, Development of an in vitro screening test to evaluate the in vivo bioaccessability of ingested mine-waste lead: *Environmental Science Technology*, 27 (13), 2870-2877.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2000, Suelos dominantes de México 1, (en línea), <http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/naturaleza/estadistica-am/informe/acrobat/capitulo2-1-6.pdf>, consulta: 14 de octubre de 2013

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1996, Carta Geológico-Minera, San Antonio F12-B13, escala 1:50,000: Pachuca, Hidalgo, México, 1 mapa con texto

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2000, Carta Geológico-Minera, San Juan de Los Planes F12-B14, escala 1:50,000: Pachuca, Hidalgo, México, 1 mapa con texto

Servicio Meteorológico Nacional (CNA), 2012, Reporte del Clima en México, Reporte Anual, México D.F., México, 23 pp.

US-DDF, 2003. Guide for incorporating bioavailability adjustments into human health and ecological risk assessments at US Department of Defense Facilities, USA.

Volke-Sepúlveda, T., Solórzano-Ochoa, G., Rosas-Domínguez, A., Izumikawa, C., Encarnación-Aguilar, G., Velasco-Trejo, J. A., Flores Martínez, S., 2003, Remediación de sitios contaminados por metales provenientes de jales mineros en los distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, Baja California Sur: D. F., México, Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, Informe Final, 37 pp.

Volke-Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J. A., De la Rosa-Pérez, D. A., 2005, Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación, México, D. F., Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), 141 pp.

Ziegler – Rivera, F. R., en proceso, Ocurrencia natural del arsénico en el Distrito Minero San Antonio-El Triunfo: México, D. F., Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Licenciatura.