



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“Evaluación de propiedades físicas y geoquímicas en la
selección de sitios para el almacenamiento
ambientalmente seguro de residuos
minero-metalúrgicos”.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

Griselda Berenice Hernández Cruz

COMITÉ TUTOR

Dr. Oscar Arnoldo Escolero Fuentes
Mtra. María Guadalupe Villaseñor Cabral

JURADO EXAMINADOR

- 1) Dra. María Aurora Armineta
- 2) Dra. Christina D. Siebe Grabach
- 3) Dr. Francisco Martín Romero
- 4) Dra. Ofelia Mortón Bermea
- 5) Dr. Jaime Alejandro Carillo Chávez



MÉXICO D.F.

DICIEMBRE DE 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*Vivir no es sólo existir,
sino existir y crear,
saber gozar y sufrir
y no dormir sin soñar.
Descansar, es empezar a morir.
Gregorio Marañón.*

DEDICATORIA

*A mis padres y mi hermano, quienes iniciaron conmigo este camino
A Rodrigo, por su presencia en la culminación de este proyecto*

AGRADECIMIENTOS.

Gracias a la Universidad, porque me ha permitido aprender todos los días. Al Instituto de Geología por abrirme las puertas y confiar en que podía lograrlo. A Gloria, María Luisa, Araceli y Dra. Elizabeth por su apoyo en los trámites administrativos.

Gracias a mi tutor Dr. Francisco Romero, por su infinita paciencia, por todo el tiempo invertido en la tesis, por toda la dedicación en mi aprendizaje y por apoyarme constantemente en estos años. Gracias al comité evaluador, Dra. María Aurora, Dra. Christina Siebe, Dr. Alejandro Carrillo y Dra. Ofelia Mortón, sus aportes en este escrito han sido valiosos y gracias a ellos hoy culmino mi proyecto.

Gracias a todas las personas que se involucraron en el trabajo de la tesis. A Olivia Zamora por el análisis geoquímico, a los integrantes del LAFQA por el trabajo de campo, a José Luis Sánchez por el aporte geológico, a los laboratorios del Instituto de Geofísica y Geografía.

Gracias a CONACYT, por el apoyo económico que me brindó durante mi formación académica. Gracias al personal del complejo metalúrgico por las facilidades que nos brindaron durante el trabajo de investigación.

Gracias a mis padres, y a mi hermano, quienes compartieron mis alegrías y mis tristezas mientras me preparé para poder comenzar con este proyecto. Gracias por iniciar este camino juntos, por todo el apoyo y porque ahora celebramos el fin de este ciclo.

A mi mejor amigo. Dr. Lugo, gracias por estar en los momentos más importantes de mi vida, por su apoyo, por su amistad y por confiar tanto en mí. Gracias Miguel Ángel Gómez por el apoyo moral que me has dado en momentos tan adversos, gracias por tus palabras y por todos tus consejos, por tus burlas y por enseñarme que tu amistad es algo invaluable.

Gracias a Miguel Gámez, Pavel Castro, Denis Avellán y Paola por todo su empeño para que pudiese pasar los exámenes de admisión. Gracias por su tiempo, por su espacio y porque ahora son muy buenos amigos. Gracias a Cecilia y Deni por aligerar tantas y tantas horas de estudio.

Gracias a los amigos que encontré durante mi estancia en el Instituto. Gracias Oliver por tus palabras, por tus consejos y por todo el apoyo durante nuestros cursos. Gracias Ernesto, Maricarmen y Rodrigo por hacer la vida más amena durante los días de trabajo en el cubículo. Gracias Aarón, Sandra y Fabián por su amistad y por todos los días de esparcimiento juntos. Gracias a mis entrañables amigos, Pedro, Nayelli, José Manuel y Sergio, por estar presentes en mi vida y por el apoyo constante y oportuno.

Gracias a la vida, al destino y a la suerte porque en un día inusual, pusieron a Rodrigo en mi camino. Por el valor de hacer “lo correcto” y ahora disfrutar de una nueva familia. Gracias por los errores y por los aciertos, por las veladas y por los descansos, por el trabajo y la tolerancia, por ayudarme a que este proceso terminara, tal como me lo había propuesto. Gracias porque en los momentos que desfallecía tú estabas a mi lado, y por enseñarme a enfrentar la vida cuando no estás conmigo. Gracias por ser mi amigo, mi compañero, mi complemento, gracias por ser mi esposo. Gracias porque hemos terminado juntos uno de nuestros tantos proyectos en el camino. Gracias porque este escrito sin ti, simplemente no tendría sentido.

...Aquel que tiene un porqué para vivir se puede enfrentar a todos los "cómos"...

Friedrich Nietzsche.

CONTENIDO

Resumen

Introducción

I. MARCO GEOGRÁFICO DE REFERENCIA

1.1.	Ubicación del área de estudio	1
1.2.	Características climáticas	2
1.3.	Aspectos geológicos regionales	6
1.3.1	Aspectos litológicos	6
1.3.2	Fallas y fracturas en la zona de estudio	11
1.4.	Aspectos hidrológicos	12

II. ANTECEDENTES.

2.1.	Reseña histórica del sitio de estudio	16
2.2.	Reseña histórica de la gestión de manejo de residuos peligrosos a nivel internacional y nacional	17

III.METODOLOGÍA.

3.1.	Datos climáticos locales	23
3.2.	Características geológicas locales	23
3.3.	Propiedades hidrogeológicas e hidrogeoquímicas	24
3.4.	Vulnerabilidad del acuífero	26
3.5.	Validación de los resultados del cálculo de la vulnerabilidad del acuífero en el área de estudio	29
3.5.1	Pruebas de permeabilidad <i>in situ</i>	29
3.5.2	Perfiles geoquímicos para valorar la migración vertical de elementos potencialmente tóxicos a través de la zona vadosa	32

IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1.	Datos climáticos	36
4.2.	Aspectos geológicos locales	46
4.3.	Aspectos hidrogeológicos locales	51
4.3.1	Profundidad del acuífero en el área de estudio	51
4.3.2	Hidrogeoquímica	54

5.0.	Valoración de la vulnerabilidad del acuífero de la zona de estudio utilizando el método “G.O.D.” indicado en la NOM-141-SEMARNAT-2004	59
5.1.	Generalidades	59
5.2.	Determinación de los valores de G.O. y D. en la zona de estudio	60
5.2.1	Cálculo de la valoración de la vulnerabilidad	61
6.0	Validación de los resultados del cálculo de la vulnerabilidad del acuífero en el área de estudio	62
6.1.	Pruebas de permeabilidad <i>in situ</i>	62
6.2.	Perfiles geoquímicos para valorar la migración vertical de elementos potencialmente tóxicos EPT a través de la zona vadosa	69
6.2.1	Concentración total de arsénico As y plomo Pb	69
6.2.2	Características del As y Pb. en la parte superior de conglomerado (suelo).	80
	V. CONCLUSIONES	85
	VI. BIBLIOGRAFÍA	87
	VII. ANEXO	94

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.

Figura 1.	Localización geográfica del área de estudio.	1
Figura 2.	Valores de temperatura en la Ciudad de San Luis Potosí	3
Figura 3.	Valores de precipitación en la ciudad de San Luis Potosí	4
Figura 4.	Valores de días con heladas	4
Figura 5.	Valores de evaporación y precipitación	5
Figura 6a	Carta geológica de la cuenca de San Luis Potosí	7
Figura 6b.	Columna estratigráfica de La Cuenca de San Luis Potosí	9
Figura 7.	Localización del acuífero de San Luis Potosí	11
Figura 2.1.	Distribución porcentual de los desechos peligrosos en México para 1986	18
Figura 3.1.	Localización geográfica de los pozos muestreados, cercanos al área de estudio	23
Figura 3.2.	Muestreo de agua subterránea en el área de estudio y determinación de algunos parámetros “ <i>in situ</i> ”	23
Figura 3.3.	Esquema del método G.O.D. para valorar la vulnerabilidad de acuíferos	26
Figura 3.4.	Ubicación de los barrenos perforados en el área de estudio	28
Figura 3.5.	Perforación de pozos para la realización de pruebas de permeabilidad y toma de muestras para análisis químicos	28
Figura 3.6.	(A y B) Preparación e introducción del obturador en el pozo. (C) Inyección del agua a presión constante controlada con manómetro y medición de la cantidad de agua inyectada y D) Esquema de la prueba Lugeón	29
Figura 3.7.	Preparación del equipo antes de tomar las lecturas de As y Pb que presentaron los núcleos de los barrenos perforados	32
Figura 3.8.	Organización de los núcleos antes de su análisis geoquímico	32
Figura 3.9.	Selección de las muestras.	33
Figura 4.1.	Promedios mensuales de la temperatura registrados en la estación meteorológica del sitio de estudio	34
Figura 4.2.	Comparación de valores anuales de Evaporación, Precipitación y Temperatura	35
Figura 4.3.	Comparación entre valores mensuales de Evaporación, Precipitación y temperatura	36
Figura 4.4.	Gráfica de frecuencia de lluvias extraordinarias dentro del área de estudio	39
Figura 4.5.	Cantidad de milímetros de lluvia que se reportan en superficie durante las lluvias extraordinarias	40
Figura 4.6.	Diagrama general de la distribución de la precipitación pluvial	40
Figura 4.7.	Vista de la zona de estudio hacia el poniente y oriente respectivamente	41
Figura 4.8.	Gráfica con los promedios registrados de 1993-2008 en la estación meteorológica del sitio de estudio	42
Figura 4.9.	Representación gráfica de las velocidades que pueden arrastrar partículas sedimento en el área de estudio	43
Figura 4.10.	Los datos reportados por INEGI, muestran seis meses con mayores precipitaciones, mismos que reportan una orientación preferencial hacia el E	44
Figura 4.11.	a. La gráfica de la máxima velocidad de viento y b. La gráfica con la máxima cantidad de horas para los seis meses con mayores precipitaciones están dirigidas hacia el E	44
Figura 4.12.	a. Máxima velocidad del viento y b. Máxima exposición de horas con dirección preferencial hacia el SW	45
Figura 4.13.	Mapa geológico del área de estudio	46
Figura 4.14.	Afloramiento de riolita de color rosa en la parte oeste del área de estudio	48
Figura 4.15.	El conglomerado Halcones dentro del área de estudio muestra un intemperismo fuerte en los primeros 60 cm, posteriormente se encuentra un conglomerado muy bien cementado	49

Figura 4.16.	Fracturas en el Conglomerado Halcones	51
Figura 4.17	Diagrama de Piper o triángulos para determinar la clasificación del agua muestreada	57
Figura 4.18.	Diagrama hidrogeoquímico de Stiff que muestra la clasificación del agua	54
Figura 4.19.	Diagrama esquemático los valores de “G”, “O” y “D” obtenidos de acuerdo a las condiciones del sitio de estudio, para el cálculo de la vulnerabilidad del acuífero	61
Figura 4.20.	Valores de permeabilidad y su comportamiento en diferentes profundidades en las perforaciones de la zona de estudio	67
Figura 4.21.	Localización de los barrenos y representación cualitativa de la permeabilidad	68
Figura 4.22.	Resultados de la movilidad de EPT en la zona de estudio	78
Figura 4.23.	Mapa de concentraciones de As en la capa superficial (0.0 – 0.6 m) del área de estudio	79
Figura 4.24.	Microfotografías y microanálisis de partículas de oxihidróxidos de hierro (Fe-oxihidróxidos) que retienen arsénico (As) vía sorción	82
Figura 4.25.	Microfotografías y microanálisis de partículas de oxihidróxidos de hierro (Fe-oxihidróxidos) que retienen plomo (Pb) vía sorción	82
Figura 4.26.	Microfotografías y microanálisis de partículas asociadas a minerales insolubles.	83
Figura 4.27.	Microfotografías y microanálisis de partículas asociadas a minerales insolubles.	84
Tabla 3.1.	Clasificación de las rocas en función de la permeabilidad expresadas en Unidades Lugeón (UL). (Modificado de González de Vallejo et al, 2002)	32
Tabla 4.1	Distribución del viento en el total de horas de exposición y la velocidad para el periodo 1993-2008	41
Tabla 4.2.	Promedio de velocidades máximas (1993-2008)	43
Tabla 4.3.	Clasificación granulométrica de la matriz de la capa intemperizada del Conglomerado Halcones	50
Tabla 4.4.	Descripción litológica de la zona vadosa (No saturada) del pozo IMMSA II	52
Tabla 4.5.	Determinación de los parámetros in situ en el muestreo de pozos cercanos al área	54
Tabla 4.6.	Resultados de los componentes mayores	55
Tabla 4.7	Concentración de componentes menores de las muestras de agua en los pozos de la zona de estudio	58
Tabla 4.8.	Límites no detectados en los componentes menores de las muestras de agua en los pozos de la zona de estudio.	59
Tabla 4.9.	Valoración de la vulnerabilidad de un acuífero en función del Índice de vulnerabilidad “V _{Aq} ” (Fuente: NOM-141-SEMARNAT-2004)	60
Tabla 4.10	Valores de Índice de Vulnerabilidad “V _{Aq} ” para las condiciones del acuífero de la zona de estudio	61
Tabla 4.11	Espesor de la capa superficial intemperizada y deleznable en las perforaciones realizadas para pruebas de permeabilidad	63

RESUMEN

Los residuos generados debido a las operaciones de un complejo metalúrgico, ubicado en San Luis Potosí, requieren ser almacenados “in situ” de tal manera que se garantice su aislamiento ambientalmente seguro.

El Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos indica que una de las opciones para el almacenamiento definitivo y seguro de los residuos minero-metalúrgico es su confinamiento en formación geológicamente estable. El confinamiento en “formación geológicamente estable” es una obra para la disposición final en estructuras naturales o artificiales, impermeables, que garanticen que no haya filtraciones hacia las aguas subterráneas.

Estudios previos indican que el Plomo (Pb) y Arsénico (As) son los elementos potencialmente tóxicos de mayor importancia en estos residuos metalúrgicos que requieren ser almacenados de una manera ambientalmente segura.

En este trabajo se estudiaron características geológicas, hidrogeológicas y geoquímicas del terreno donde se ubica el complejo metalúrgico con el objetivo de valorar si cumple con la condición de “formación geológicamente estable”.

El clima de la zona es semiárido con escasa cubierta vegetal. En promedio la evaporación es al menos tres veces más que la precipitación pluvial, lo que significa que en la zona de estudio es poco probable que ocurra la infiltración del agua de lluvia a través de la zona no saturada (zona vadosa). La dirección del viento es hacia el este (E) y suroeste (SW).

Litológicamente, el sitio se encuentra sobre el denominado “Conglomerado Halcones” (espesor = 150 m). Con excepción del suelo (leptosol), este conglomerado está muy consolidado. En la zona sólo se observaron fracturas con una orientación dominante NW-SE cuyo espesor varía desde unos cuantos mm hasta los 15 cm. La mayoría de las fracturas no rebasan los 10 cm de espesor y en general están rellenas. Es importante señalar que las fracturas observadas se desarrollan solamente en algunos niveles del conglomerado, desapareciendo en los cuerpos de roca que los infra y sobreyacen.

La profundidad del nivel de las aguas subterráneas está a unos 80 - 100 m a partir de la superficie y los análisis químicos permiten clasificarlas como bicarbonatadas sódicas, lo cual indica que están relacionadas con flujos profundos y regionales, cuya recarga debe darse en la sierra de San Miguelito, que está a más de 5.0 km hacia el W de los terrenos del sitio de estudio.

La aplicación del modelo “GOD” (para la valoración de la vulnerabilidad), que es señalado en las Normas Oficiales Mexicanas, indica que el Índice de Vulnerabilidad “VAq” varía entre 0.168 a 0.072, lo que significa que el acuífero en la zona de estudio No es Vulnerable a la contaminación por infiltración a través de la zona vadosa. Los resultados de la No vulnerabilidad del acuífero se validaron con el hecho de que las pruebas de permeabilidad “in situ” permiten clasificar, de manera general, al Conglomerado Halcones, como “muy impermeable” y “prácticamente impermeable”. Sin embargo, el análisis del comportamiento de los valores de permeabilidades en cada uno de las perforaciones permite identificar que, en dos perforaciones (de un total de 10 realizadas), el Conglomerado Halcones es permeable en los tramos superiores.

Por otro lado, los resultados de los análisis químicos (método EPA 6200) en los núcleos de las 10 perforaciones (32 m) indican que los contaminantes (As y Pb) no migran verticalmente a través del conglomerado compacto debido a que la baja permeabilidad de éste no permite la infiltración hacia los estratos inferiores del perfil. Asimismo, el comportamiento de las concentraciones de los contaminantes, en la parte del suelo, sugiere su baja movilidad, lo que indica que están ocurriendo fenómenos geoquímicos de atenuación natural.

Las particularidades geológicas y geoquímicas del sitio de estudio permiten dividir la zona de estudio en I) zona occidental y II) zona oriental. En la zona occidental se cumple con la condición de “formación geológicamente estable” ya que el Conglomerado Halcones se clasifica, en toda la profundidad estudiada, como “muy impermeable” lo que impide la migración vertical de contaminantes, con excepción de los primeros 0.5 m donde se presenta el suelo. En la zona oriental no se cumple con la condición de “Formación Geológicamente Estable”, ya que la parte superior (hasta los 7 y 17 m) es relativamente permeable.

INTRODUCCIÓN.

La gestión por los residuos peligrosos comenzó con los crecientes problemas ambientales que se presentaron en varios países del mundo, sobre todo en la década de los setenta y ochenta, como ejemplo se encuentra el Love Canal en las cataratas del Niagara, los envenenamientos de la población de Japón a causa de la ingesta de mercurio, o la muerte masiva de aves por los residuos de diclorodifeniltricloroetano (DDT), (D. La Grega, 1996).

Los países de la Unión Europea y Estados Unidos fueron los primeros en elaborar y promulgar leyes sobre las que amparan las acciones de control necesarias en materia de residuos peligrosos, siendo la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), el principal centro regulador de leyes para la gestión. En los últimos 20 años se han desarrollado planes específicos sobre este tipo de residuos en los países industrializados, (William G., 1997).

En México, La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, (LGPGIR) clasifica a los residuos peligrosos, y otorga un tratamiento específico a la industria minero-metalúrgica. Además, establece que la disposición oficial de los mismos se podrá hacer en el sitio de su generación conforme a las normas oficiales mexicanas aplicables (SEMARNAT, 2008).

La LGPGIR promueve a las industrias metalúrgicas localizadas en el sitio de estudio a generar planes de manejo que tienen por objeto minimizar la generación y maximizar la valorización de los residuos, para evitar la transferencia de contaminantes de un medio a otro, suelo, subsuelo, cuerpos superficiales de agua, mantos freáticos, acuífero y atmósfera, (Ibíd).

El manejo seguro y ambientalmente adecuado de los residuos minero-metalúrgicos, requiere de conocimiento en las características mineralógicas de los mismos, así como características físico-químicas para identificar su peligrosidad y establecer las normas de manejo adecuadas. Una variable fundamental para disminuir el riesgo ambiental, consiste en atender las condiciones de vulnerabilidad del sitio donde se generan y disponen los residuos.

Al ser una problemática nacional de índole geocientífica, y relativamente reciente, corresponde a los interesados en materia ambiental, desarrollar estrategias en la identificación de sitios para el almacenamiento ambientalmente seguro de los residuos peligrosos.

Considerando lo anterior, se realizó la presente investigación con el objetivo de identificar sitios, dentro del terreno que ocupa el Complejo Metalúrgico en San Luis Potosí, para el almacenamiento

de sus residuos en confinamientos “in situ”, que garanticen su aislamiento permanente y ambientalmente seguro.

Para cumplir con el objetivo propuesto se realizaron estudios relacionados con los aspectos climáticos, geológicos e hidrogeológicos, regionales y locales. Esta información permitió valorar la vulnerabilidad del acuífero en la zona de estudio. Los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad se validaron con los resultados de pruebas de permeabilidad “in situ” y la evaluación de la migración vertical de contaminantes.

I. MARCO GEOGRÁFICO DE REFERENCIA

1.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se localiza en la cuenca de San Luis Potosí y comprende un terreno donde se ubica un complejo metalúrgico, en el extremo oeste de la ciudad de San Luis Potosí, entre las coordenadas geográficas 22°10' y 101°02' (Figura 1).

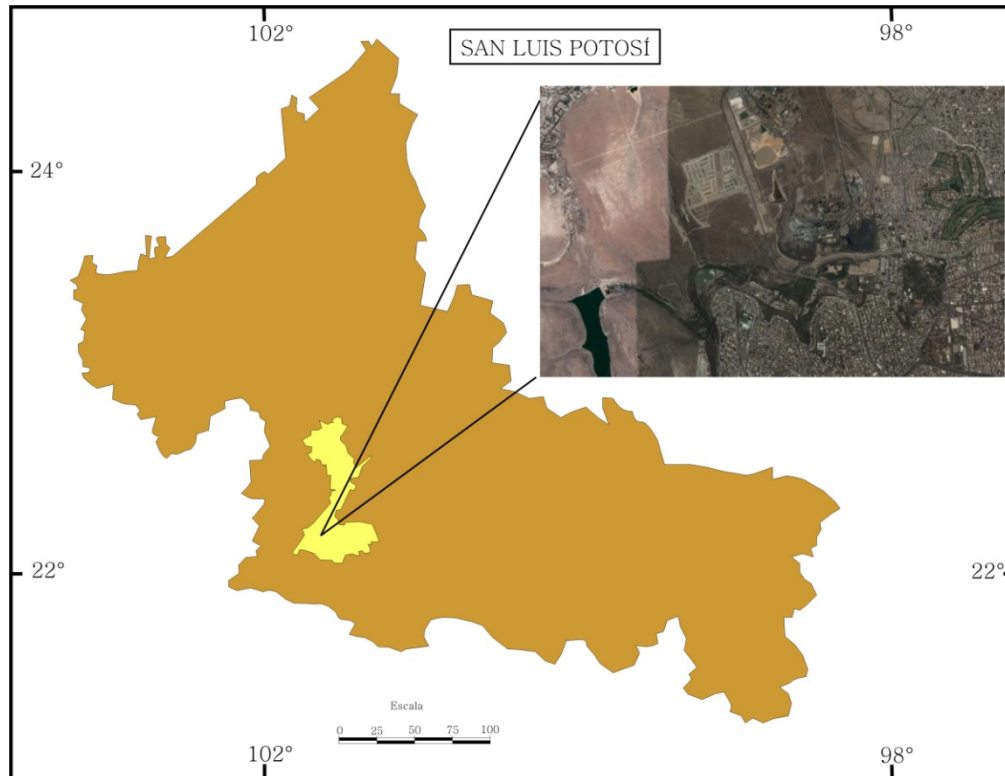


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

De acuerdo a la clasificación de provincias fisiográficas establecidas por Raisz (1959), la cuenca de San Luis Potosí se localiza entre los límites de la provincia *Mesa Central* y la subprovincia fisiográfica de las "Sierras Bajas" de la Sierra Madre Oriental.

Dentro de la subprovincia de las Sierras Bajas se encuentra la Sierra de San Pedro, localizada en la porción más oriental de la cuenca. Las Sierras Bajas están constituidas por rocas calcáreas de edad cretácica sumamente plegadas, con una topografía de contornos suaves.

La provincia de la Mesa Central es un conjunto de sierras alargadas con extensas planicies intermontanas. Entre el conjunto de sierras se encuentra la Sierra de San Miguelito, localizada en la porción oeste y suroeste de la cuenca de San Luis Potosí. La constituyen rocas ígneas extrusivas del Terciario (derrames lávicos, tobas e ignimbritas). Está caracterizada por una topografía abrupta e irregular, con algunas pendientes que superan los 45°. Hay diferentes alturas sobre todo en sus partes más prominentes (Cerro Grande y Cerro San Luis Potosí).

La zona central de la cuenca es una planicie amplia con una altitud media de 1850 m, ésta representa el nivel de base local y está constituida por material granular del Cuaternario. Hacia el norte está limitada por suaves lomeríos de rocas ígneas intrusivas (derrames lávicos) y al sur por un parteaguas.

1.2 Características climáticas.

El clima que predomina en el estado de San Luis Potosí es el seco templado BSkw, cubriendo un área de 27% de la superficie estatal. El clima predominante en la Mesa Central, es el semiseco templado BSkw(w), y cubre el 13% de la superficie estatal. Por su temperatura que oscila entre los 12°-18° C y por su grado de humedad, este sitio se clasifica como árido (Vidal, 2007). Se distribuye en altitudes que van de 1,600 a 2,700 m.

En el estado de San Luis Potosí existen siete estaciones meteorológicas, Tamuín, San Nicolás Tolentino, Armadillo, Presa Ojo Caliente, San Luis Potosí, Moctezuma y Soledad Graciano Sánchez. La estación meteorológica de San Luis Potosí, con clave 24-093 se ubica en la capital del Estado, en los 22° 09' 10'' latitud norte y 100° 58' 38'' longitud oeste y se encuentra a una latitud de 1,877 m.

La densidad por estación es de un área aproximada de 200 Km². Los conceptos climatológicos medidos no son amplios. Estas consideraciones impiden la interpolación y la extrapolación de conceptos aleatorios como la precipitación y hace imposible la aplicación de métodos para obtener algunos parámetros hidrológicos, como por ejemplo, la evapotranspiración real (Maderey, 2007).

La temperatura media anual es de 17.3°C. La temporada cálida, en la mayor parte del estado comprende los meses de abril a septiembre. Los meses más calientes son mayo y junio en los que las temperaturas se elevan a valores mayores de 24° C, dando a estos meses el carácter de semicálidos. La temperatura media anual del año más caluroso es de 19°C.

Octubre y abril son meses de transición, pues la temporada fría comprende de noviembre a marzo, siendo los más fríos diciembre y enero, en los que las temperaturas son semifrías, menores de 10°C. Esta región registra inviernos muy fríos, ya que las masas de aire polar la invaden sin ningún obstáculo; es frecuente que las temperaturas nocturnas alcancen valores cercanos a los 0° C, y que ocurran heladas y nevadas. La temperatura media anual del año más frío es 15° (Figura 2).

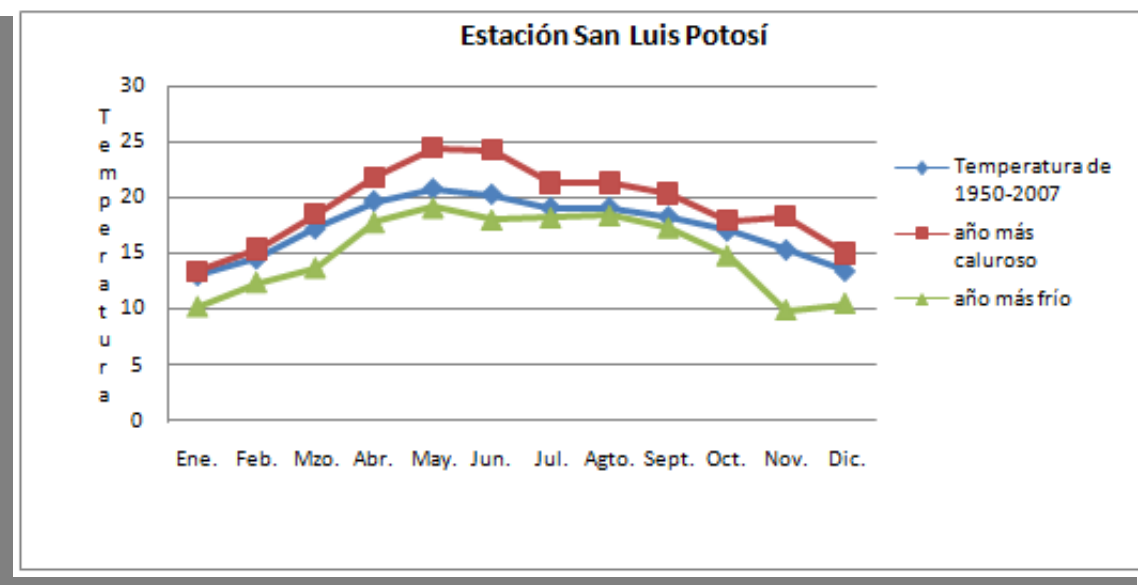


Figura 2. Valores de temperatura en la ciudad de San Luis Potosí (INEGI, 2009).

En esta zona, para el período de 1950-2007, se registró una precipitación media anual de 386 mm, siendo el mes más lluvioso, junio con 68 mm. El promedio de la precipitación del año más lluvioso (2004), ascendió a 550 mm y el promedio del año más seco (2000), a 169 mm, (Fig. 3). El escurrimiento de la ciudad varió entre los 0-100 mm anuales, para el año 2007. El escurrimiento promedio para los meses más húmedos (mayo-octubre) es menor a

50 mm. El escurrimiento medio en el periodo seco (noviembre-abril) es de 0 mm. El escurrimiento máximo mensual, reportado en julio-octubre es menor a 10 mm, mientras que el escurrimiento medio mínimo mensual para los meses de enero-junio es de 0 mm.

Los días con heladas que se reportan en el período de 1950-2007 son 177. En el año de 2005 no se reportó algún día con heladas y en 1979 se reportó el mayor número de días con heladas con 18 días en el año (Figura 4).

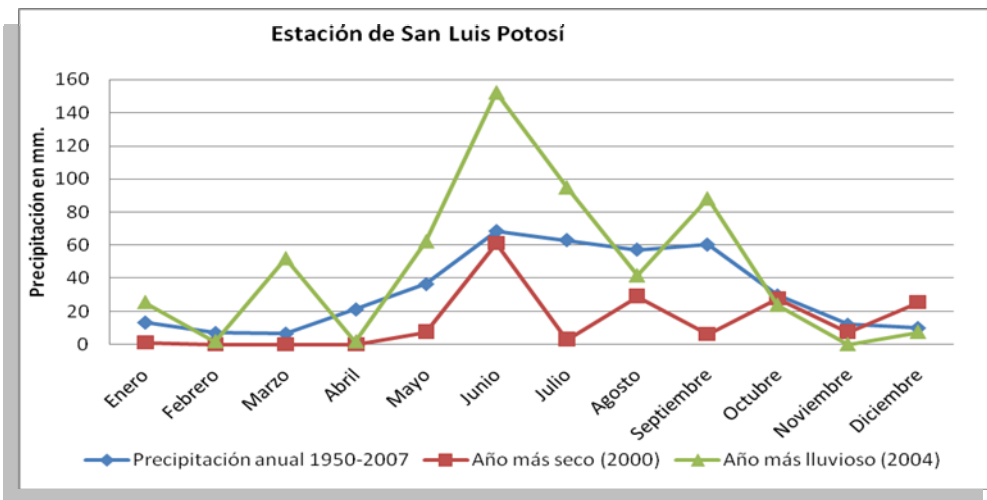


Figura 3. Valores de precipitación en la ciudad de San Luis Potosí (INEGI, 2009)

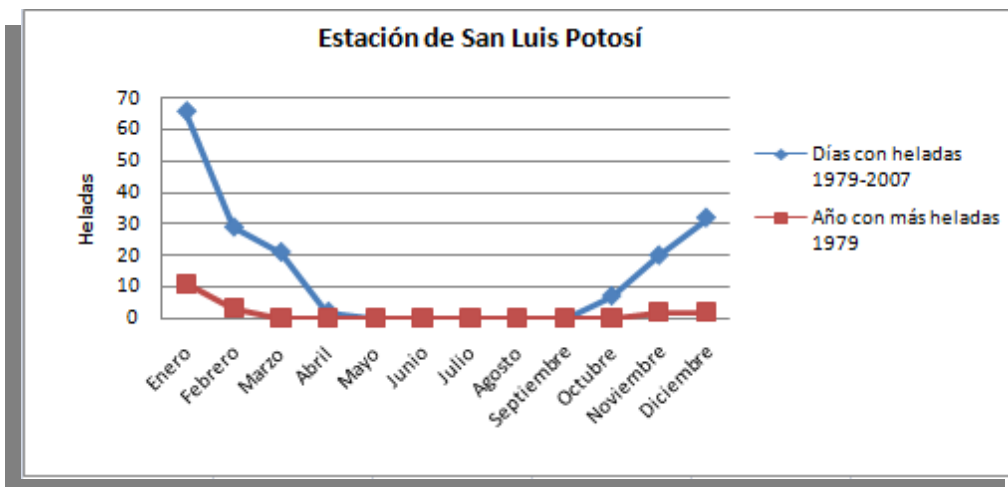


Figura 4. Valores de días con heladas (INEGI, 2009)

El Servicio Meteorológico Nacional, SMN reporta datos de la evaporación real y la precipitación que se han registrado en la estación meteorológica de San Luis Potosí, en el período de 1971-2000 (Figura 5).

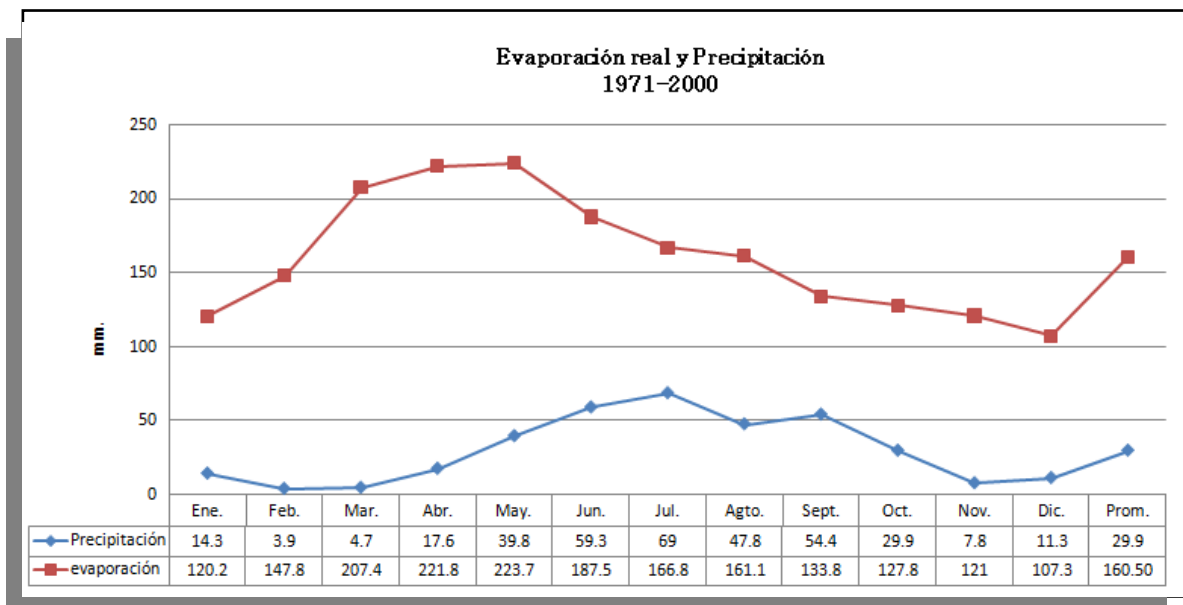


Figura 5. Valores de evaporación real y precipitación, SMN, 2009.

El comportamiento de la evaporación, gráficamente es muy similar a la temperatura (Figura 2 y 5), en donde los meses con mayor calor se presenta mayor evaporación. El mes de Junio presenta un declive en la temperatura, lo mismo sucede con la evaporación, la cual desciende en el mismo mes.

En comparación, los datos de precipitación muestran un ligero aumento cuando la temperatura disminuye, sin embargo, esto no es significativo cuando se muestran los valores de evaporación.

El promedio para las variables evaporación y precipitación en el periodo de 1971-2000 es de 160.5 mm para la evaporación y de 29.9 mm para la precipitación. Esto equivale a cinco veces más evaporación que precipitación en la zona.

1.3 Aspectos Geológicos Regionales.

1.3.1 Aspectos litológicos.

De acuerdo a diferentes autores (Labarthe y Tristán, 1978; Labarthe et al. 1982; Labarthe y Jiménez, 1994), la geología en el área de la Cuenca de San Luis Potosí se encuentra representada por rocas que van desde el Cretácico hasta el Cuaternario (Figura 6a y 6b).

La columna litológica de la Cuenca de SLP está conformada, en orden ascendente, por:

- i) La secuencia de rocas sedimentarias del Cretácico, que conforman las sierras San Pedro y Álvarez en la porción oriental de la Cuenca. Esta secuencia sedimentaria está conformada por rocas de las Formaciones La Peña, Cuesta del Cura e Indidura.
- ii) La secuencia de rocas volcánicas del Terciario que conforman las sierra San Miguelito en la parte oeste de la cuenca de SLP. Esta secuencia volcánica está conformada por las siguientes unidades litológicas: Pórfido Cuarzomonzonítico, Ignimbrita Santa María, Latita Portezuelo, Riolita San Miguelito, Ignimbrita Cantera y Riolita Panalillo.
- iii) Sedimentos del Cuaternario, que están rellenando el denominado Valle de San Luis Potosí.

a) Secuencia de rocas sedimentarias del Cretácico

Formación La Peña (Aptiano). Aflora en el anticlinal de la Sierra de San Pedro. Son calizas de textura criptocristalinas, con interestratificaciones arcillosas, lentes y nódulos de pedernal. Su espesor es de aproximadamente 225 m.

Formación Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano). Aflora en la Sierra de San Pedro (en el anticlinal). Son calizas de textura microcristalina, en estratos delgados a medianos con bandas y lentes de pedernal negro y en ocasiones se presentan interestratificaciones arcillosas. Se le estima un espesor de 200 m.

Formación Indidura (Turoniano). Aflora en la Sierra de San Pedro. Formada por calizas arcillosas, carbonosas y algunos estratos de arenisca. El espesor medido (Anticlinal de la Parada) es de 220 m.

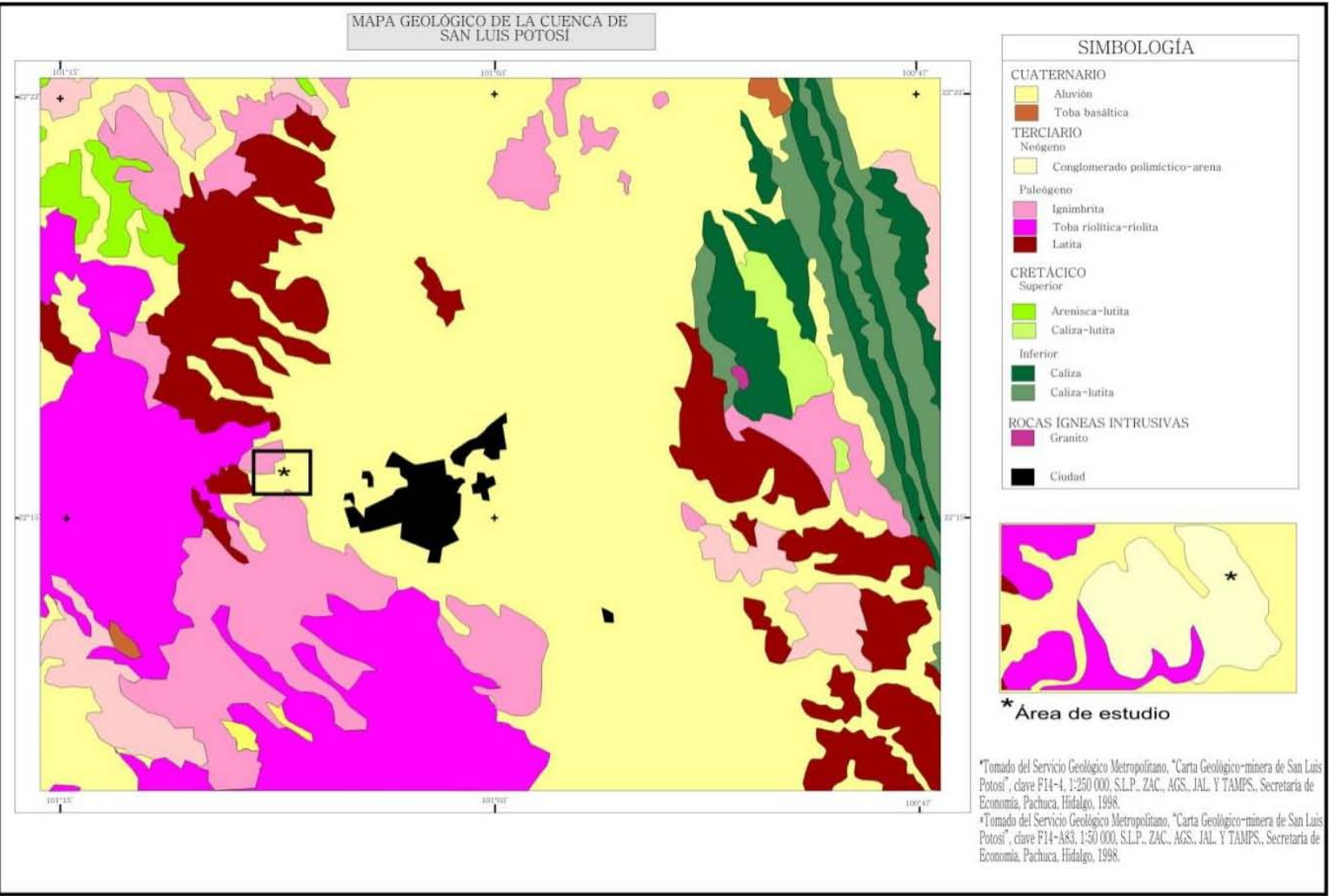


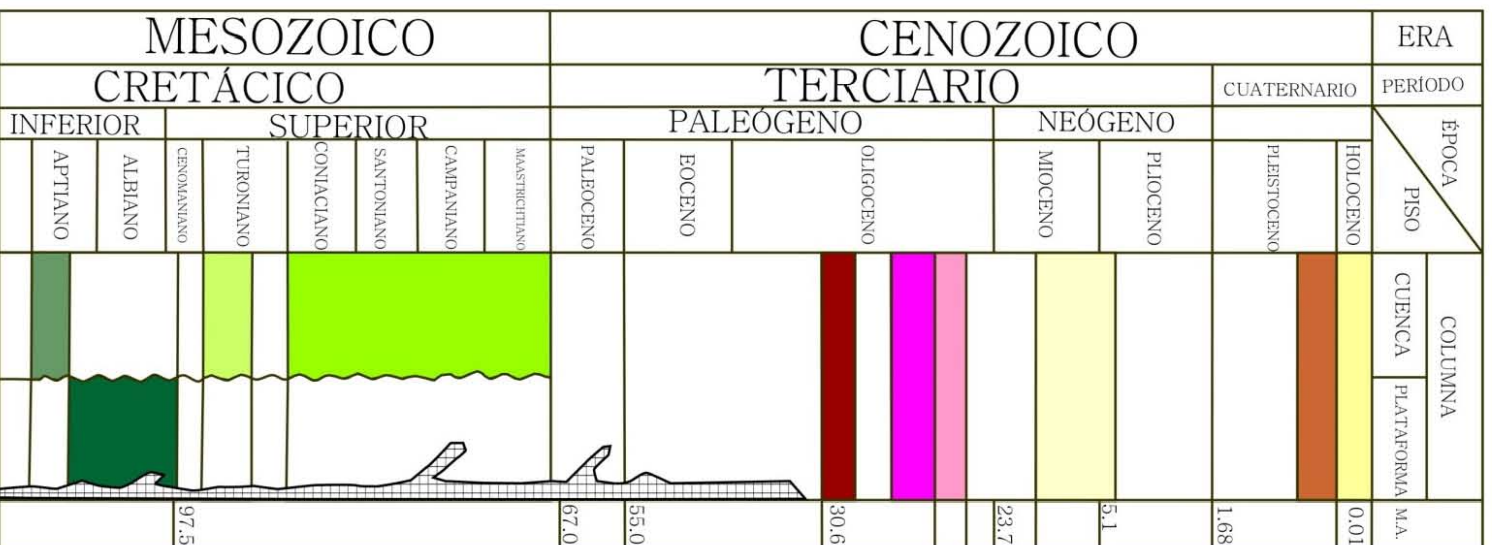
Figura 6a. Carta Geológica de la Cuenca de San Luis Potosí. Compilada de la carta geológica 1:250000 (SGM, 1998)

b) Secuencia de rocas volcánicas del Terciario

Pórfido Cuarzomonzónico. Aflora en la Sierra de San Pedro, tiene una textura porfirítica con fenocristales de ortoclasa, plagioclasas y cuarzo, en una matriz alterada de óxidos de fierro. Intrusiona a la Formación La Peña, Posiblemente esta intrusión esté asociada al conjunto de intrusiones que forman el granito Arperos, el granito del Fuerte, intrusivos de la Comanja Peñón Blanco y Estancia de Ánimas, que son apófisis del granito que compone el basamento principal de toda la región.

Ignimbrita Santa María. Aflora al sur de la Sierra de San Pedro. Son rocas de textura porfirítica, con fenocristales de cuarzo y sanidino, fragmentos de pómez bien colapsados en una matriz desvitrificada. Está bien soldada y en ocasiones se encuentra magnetita como mineral accesorio. Presenta una estructura columnar que alcanza 60 m. Su edad se reporta entre el Eoceno-Oligoceno.

COLUMNA GEOLOGICA DE LA CUENCA DE SAN LUIS POTOSÍ



SIMBOLOGÍA

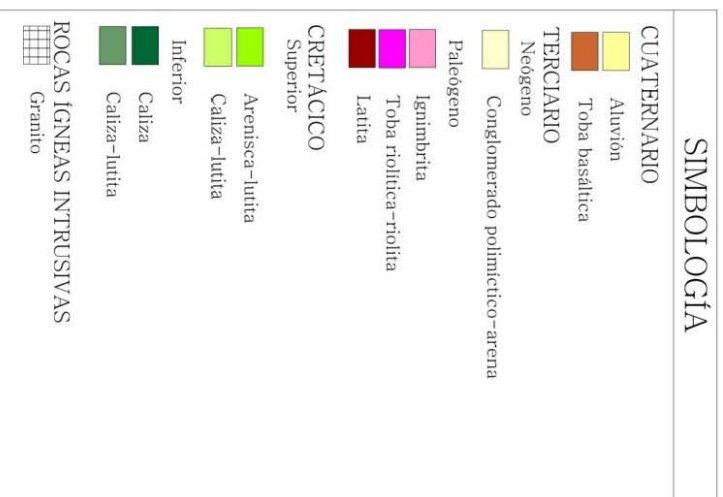


Figura 6b. Columna estratigráfica de la Cuenca de San Luis Potosí. Compilada de la carta geológica 1:250000 y 1:50000 (SGM, 1998)

Latita Portezuelo. Aflora al sur de la Sierra de San Pedro y al norte y noroeste de la cuenca. Es un derrame lávico de textura porfirítica, con fenocristales de sanidino y plagioclasa, cuarzo, aunque se presenta en una pequeña porción y magnetita en cantidades mayores. Tiene un espesor muy variable, aunque se estima un máximo de 300 m. hacia el sureste de la cuenca. Su edad se estima en 30.6 +/- 1.5 millones de años (Oligoceno Medio).

Riolita San Miguelito. Es un derrame lávico que aflora en la Sierra de San Miguelito, las rocas son de textura porfirítica con fenocristales de cuarzo y sanidino, tiene magnetita como mineral accesorio y son ricas en flúor. Su espesor es muy variable, llega a alcanzar 500m. en la zona del Cerro Grande. Su edad se estima en 30.0 +/- 1.5 millones de años (Oligoceno Medio).

Ignimbrita Cantera. Aflora en la sierra San Miguelito. Son secuencias volcánicas agrupadas en cuatro miembros. El primero tiene una base de toba depositada por aire, bien estratificada y graduada, sobre la que descansa una ignimbrita de textura porfirítica con fenocristales de sanidino y cuarzo. El siguiente miembro es una toba sin soldar con fenocristales de cuarzo, sanidino y algunos líticos. El tercer miembro es una ignimbrita con fenocristales de cuarzo y sanidino en una matriz desvitrificada bien soldada. El último miembro es una toba bien gradada y estratificada en capas de 5-40 cm, con interestratificación de horizontes de ceniza. El espesor total es muy variable. Su edad se estima en 29.0 +/- 1.5 millones de años (Oligoceno Medio).

Riolita Panalillo. Aflora de manera aislada al sur de la Sierra de San Pedro y al noroeste de la Cuenca. La forman dos miembros: El miembro inferior es una toba depositada por aire, bien estratificada a masiva, en capas que varían de grano muy fino a arenoso y conglomerático, con fenocristales de sanidino, cuarzo y en ocasiones líticos. El miembro superior está depositado sobre una ignimbrita con fenocristales de cuarzo y sanidino. Sobre ésta descansa otra ignimbrita de textura porfirítica, fenocristales de cuarzo y sanidino. Contiene numerosas esferolitas, parcialmente rellenas de calcedonia. Debido a que fue un material de relleno, su espesor es muy variable, por lo general no se encuentra cubierta por otras rocas. Su edad se estima en 26.8 +/- 1.3 millones de años (Oligoceno Superior).

El material geológico que se reporta en el área de estudio son depósitos de conglomerados polimíticos, pliocuaternarios, que se encuentran cubriendo a las unidades volcánicas. Estos depósitos están mal consolidados, con clasificación pobre y por lo general se encuentran rellenando depresiones intermontanas. Sus fragmentos varían de sub redondeados a redondeados y el tamaño varía de canto hasta el de arena, su espesor se encuentra entre los 2 a 20 m. en otras zonas son depósitos de arenas y limos. Cubre el valle en la zona del graben de villa de reyes y el valle de villa de Arriaga. Además del conglomerado, puede encontrarse coluvión, depositado sobre las pendientes de laderas de los cerros. Éstos son depósitos sin consolidar, con composición mayoritariamente de la roca que forma el cerro del cual derivaron.

c) Sedimentos del Cuaternario

Afloran en la planicie del Valle de San Luís Potosí y el piedemonte de las Sierras. Se agrupan dentro de estos sedimentos a los suelos residuales y material aluvial. Los suelos residuales tienen espesores que van de 1 a 15 m y aluviones de granos, arenas, limos y arcillas, estos rellenan los valles y vegas de ríos y arroyos.

1.3.2 Fallas y fracturas en la región de estudio

La región de estudio se caracteriza por la presencia de fallas normales (Buró Hidrológico, 2008). De acuerdo al estudio mencionado, las rocas volcánicas de la parte oeste de la región de estudio, en el flanco este de la Sierra San Miguelito se hallan afectadas por sistemas de fracturas y fallas de acuerdo a su orientación e importancia son: N 40° - 50° W, N 40° - 50° E, N 70° W, N 20° E, N y E

Las fallas son del tipo normal y afectan principalmente a las rocas volcánicas terciarias. En la zona urbana se ha detectado este patrón estructural por el desplazamiento causado por el reacomodamiento de los depósitos aluviales que sobreyacen a las rocas volcánicas afectadas por las fallas, debido a la sobreexplotación del acuífero.

1.4 Aspectos hidrogeológicos

De acuerdo a la CNA (2002) el acuífero de San Luis Potosí, ocupa la porción centro-occidental del estado del mismo nombre y tiene una extensión del orden de los 1980 km², y comprenden parcialmente los municipios de San Luis Potosí, Soledad Graciano Sánchez, Mexquitic de Carmona, Cerro de San Pedro y Zaragoza.

Las coordenadas geográficas que abarca el acuífero son, 21°54'54''- 22°28'15'' latitud norte y 101°13'44''- 100°37'08'' Longitud oeste, (CONAGUA, 2005), (Figura 7).

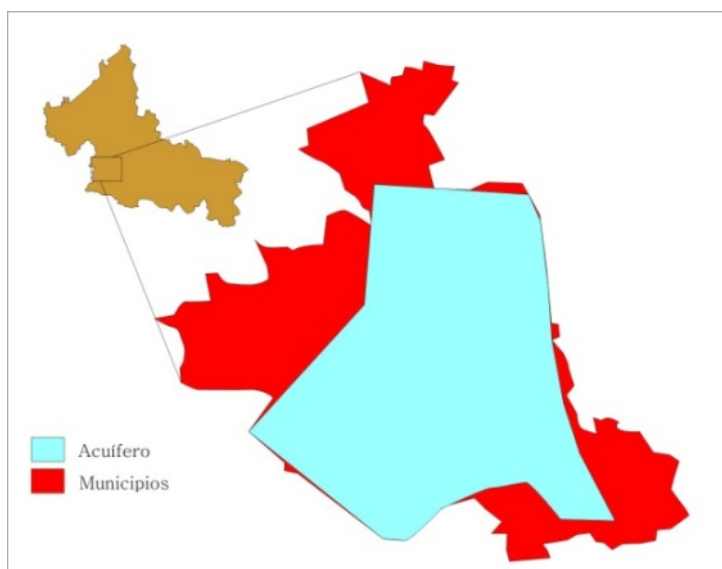


Figura 7. Localización del acuífero de San Luis Potosí.

Con base en la información hidrogeológica disponible y el contexto geológico-estructural, en la cuenca de SLP se ha identificado la presencia de dos acuíferos, separados por una capa de arenisca fina compacta: i) Acuífero somero y ii) Acuífero profundo (Cardona, 1998).

a) Acuífero somero

El acuífero somero es del tipo libre y la profundidad al nivel estático se ubica a 5-30 m bajo la superficie del terreno. Este acuífero está constituido por depósitos aluviales (CONAGUA, 2005) y su recarga proviene principalmente de la infiltración de agua de lluvia, aguas residuales y de riego, además de las fugas del sistema de abastecimiento

(Martínez et al., 2009). Sin embargo, la recarga natural por infiltración de agua de lluvia es muy limitada debido al desarrollo de una capa de caliche en la parte superior del valle de San Luís. Se ha reportado una dirección de flujo de este a noreste y una conductividad hidráulica del orden de 2×10^{-4} m/s (Cardona, 1998).

La química del agua que presenta el acuífero somero es de tipo cálcico-clorurada-bicarbonatada. El agua del acuífero somero está contaminado por las actividades antrópicas tanto de industrias, agricultura y vivienda (CONAGUA, 2005). Producto de la irrigación por uso de aguas negras hay elevadas concentraciones de nitratos NO_3^- (de 12 a 80 mg/l), se encuentra mayoritariamente en las zonas agrícolas, bicarbonatos HCO_3^- (de 100 a 414 mg/l) y cloruros Cl^- (concentración media de 100 mg/l y un máximo detectado de 183 mg/l) (Carrillo, 1989).

Cerca de la zona industrial (al suroeste de la ciudad) el acuífero somero presenta concentraciones de grasas y aceites mayores a 20 mg/l. En la misma zona se reportó una concentración de 2000 mg/l de nitratos y Pb con niveles mayores a 1.0 mg/l. De tal forma, que el agua del acuífero no puede ser utilizada para consumo humano (Cardona, 2008).

b) Acuífero profundo

El acuífero profundo es de tipo confinado y semiconfinado bajo la capa de arenisca fina compacta. El nivel estático está a una profundidad aproximada de 100 a 150 m.

El agua subterránea en este acuífero profundo circula en el material del relleno de fosa tectónica y en las rocas volcánicas fracturadas subyacentes. Algunos pozos (profundidad entre 350-450 m) que captan el acuífero profundo, atraviesan aproximadamente 100-200 m de rocas volcánicas (flujos lávicos, tobas e ignimbritas). Los pozos más productores se localizan en las inmediaciones de las zonas de fallas normales que limitan la fosa tectónica, (CONAGUA, 2005).

El flujo del agua subterránea en el acuífero profundo es en dirección a las principales zonas de extracción, ubicadas en el centro y sureste de la ciudad de SLP, donde se han identificado dos conos de abatimiento.

Cardona, 1990 recopila diversos artículos en donde se establece que la recarga del acuífero profundo se da por:

- i) Recarga natural indirecta, conocida como recarga de Fuente de Montaña, a partir de la precipitación, se infiltra en la zona saturada preferentemente en el cauce de los arroyos y las zonas fracturadas.
- ii) Recarga por flujos subterráneos, dada por el acuífero somero en pozos mal construidos y percolación a través del material geológico.
- iii) Recarga por flujo lateral horizontal, que se genera en las zonas fuera del área (norte y noroeste de la cuenca) incluidas en el balance. Se considera una recarga regular (120 lps).
- iv) Recarga por flujo vertical ascendente de las zonas profundas a las zonas de captación de los pozos, Se considera una recarga buena (<1300 lps).

En el acuífero profundo se han identificado dos tipos de agua:

- a) Agua del tipo sódico-bicarbonatado: fluye por las rocas volcánicas fracturadas, presenta temperaturas mayores a 33°C en la descarga del pozo y tienen las mayores concentraciones de Li , F^- y Na^+ .
- b) Agua del tipo cálcico-bicarbonatado, circula por el material granular, presenta temperatura a la descarga del pozo entre 23-27° C, además de baja concentración de Li , F^- y Na^+ y elevada concentración de Si .

De manera natural (mineralización y litología) el agua de este acuífero profundo presenta contaminación por flúor. Los valores de flúor reportados en diversos estudios revelan que las cantidades de este ion rebasan los límites permisibles para consumo humano, el cual, según la NOM-127-SSA1-1994, es de 1.5 mg/l.

En cuanto a metales pesados, en la década de los 90's se determinó la cantidad de Arsénico en el agua del acuífero de San Luis Potosí, el principal interés por este metaloide potencialmente tóxico es debido a las instalaciones del una planta de Arsénico que se encuentra al poniente de la ciudad. Los datos recopilados en el estudio revelaron cantidades del orden de 0.0047 mg/l a 0.014 mg/l, valores que se encuentran por debajo de los límites permisibles para consumo humano (0.025mg/l) (CONAGUA, 2005).

II. ANTECEDENTES.

2.1 Reseña del sitio de estudio.

En el área de estudio se encuentran tres plantas de procesamiento. La planta de Cobre (Cu), La planta de Zinc (Zn) y la planta de Arsénico (As).

La planta de Cu y la planta de As se construyeron en 1923, e inician operaciones en 1925 (procesos pirometalúrgico). La planta de Zinc se construyó en 1982; es una refinera electrolítica (proceso hidrometalúrgico) construida en 1982.

Más de un siglo de operaciones y el hecho de que las zonas aledañas hacia el este de la planta se han ido poblando (zona habitacional Morales de unas 105 hectáreas) ha causado preocupación a las autoridades y a la sociedad civil, pues se teme que los Elementos Potencialmente Tóxicos EPT dispersados por la actividad industrial representen un riesgo a la salud de los vecinos.

Estudios anteriores realizados en la zona habitacional Morales por personal de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Díaz-Barriga et al, 1993) señalan que el suelo, de esta zona habitacional, está contaminado con arsénico y plomo debido a las actividades de la planta de Cobre. En esta zona habitacional Morales se han identificado riesgos a la salud por la exposición al Plomo (Pb) y al Arsénico (As) generados por las plantas de Cu y As, (Mejía J., et. al, 1997, Medellín, M., 2001, Carrizales L., et. al., 2006).

Con base en las recomendaciones del estudio realizado por el LAFQA-UNAM (2003), la empresa llevó a cabo acciones de remediación, bajo convenio con las Autoridades, en la zona habitacional Morales, que se localiza al este del Complejo Metalúrgico (Fig. 1). Estas acciones de remediación se iniciaron a finales de julio de 2005 y se concluyeron en mayo de 2007 (Romero et al., 2007).

Otra de las medidas que se tomó para minimizar los riesgos al ambiente y a la salud es el cierre definitivo de la planta de Arsénico. Sin embargo, los materiales de la demolición de

la planta de As, así como los residuos y suelos afectados dentro de las instalaciones requieren una disposición final adecuada siguiendo los lineamientos en materia de gestión de residuos para evitar su dispersión hídrica y eólica, garantizando un aislamiento ambientalmente seguro.

2.2 Reseña histórica de la gestión de Manejo de residuos peligrosos a nivel internacional y nacional.

a) Nivel internacional

A nivel internacional, la gestión de los residuos peligrosos comenzó con los crecientes problemas ambientales que se presentaron en varios países del mundo, sobre todo en la década de los setenta y ochenta, como ejemplo se encuentra el Love Canal en las cataratas del Niágara, los envenenamientos de la población de Japón a causa de la ingesta de mercurio, o la muerte masiva de aves por los residuos de diclorodifeniltricloroetano (DDT).

Los países de la Unión Europea y Estados Unidos fueron los primeros en elaborar y promulgar leyes en materia de residuos peligrosos, siendo la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), el principal centro regulador de leyes para la gestión. En los últimos 20 años se han desarrollado planes específicos sobre este tipo de residuos en los países industrializados.

Estados Unidos de América

La legislación estadounidense más conocida en América latina, es la Resource Conservation and Recovery Act (RCRA), la cual define a los residuos peligrosos como: *“Un residuo sólido, o una combinación de residuos sólidos, que debido a su cantidad, concentración o a sus características físicas , químicas, o infecciosas pueden causar, o contribuir significativamente al incremento de la mortalidad o al incremento de enfermedades irreversibles y serias o reversibles e incapacitantes; ocasionar peligro sustancial, de inmediato o a largo plazo, a la salud humana o al ambiente cuando es tratado, almacenado, transportado, dispuesto o manejado de forma inadecuada”*.

De forma general los pasos que sigue Estados Unidos para hacer sus políticas en materia de gestión ambiental son, la información del problema, en donde se describen posibles escenarios de los sitios que han sido contaminados con el fin de identificar el problema y las características que presenta para poder buscar la forma de remediación.

Posteriormente se formulan las políticas. La gestión ambiental parte de la identificación de un problema con respecto a los residuos peligrosos, se formula una política capaz de controlar y remediar los daños causados en sitios contaminados. Posteriormente se le da un soporte jurídico a la política elaborada, se adopta como lineamiento, y se hacen los trabajos necesarios para la implementación de la política en los sitios contaminados. Finalmente se hace una política de evaluación que permita la valoración del sitio.

La ley más importante en materia de confinamientos y sitios de almacenamiento de residuos peligrosos es La Ley General de compensación y responsabilidades de reacción medioambiental (CERCLA), mejor conocida como “superfondo”, la cual, identifica los terrenos que fueron ocupados como centros de almacenamiento de sustancias peligrosas, y toma medidas recuperadoras para la protección de la salud y del medio ambiente. Sin embargo, la cantidad de sitios contaminados supera los planes de remediación, por lo que es necesario jerarquizar los sitios dependiendo su grado de peligrosidad. Este listado de sitios ha sido elaborado en 1990 por el Servicio de Información de la CERCLA, (CERCLIS) Siendo los productores, los principales responsables, desde su producción hasta su eliminación.

Europa.

En Europa, son varios los países que comenzaron a tener problemas por el manejo inadecuado de los residuos peligrosos.

Las primeras acciones para reducir la contaminación debido al manejo inadecuado de residuos peligrosos comienza en la década de los 70's, igual que en Estados Unidos. Gran Bretaña por ejemplo, aprobó La Ley sobre Residuos Venenosos, en 1972; y en la República Federal Alemana se realizaron enmiendas a las leyes sobre residuos sólidos, en 1976, con el fin de controlar los residuos industriales.

En España, la legislación española comienza con la Ley de Minas del 21 de Julio de 1973, en la cual, tiempo después, se incluyeron los residuos industriales y agrícolas; así mismo, establecía que determinadas categorías de residuos fueran objeto de disposiciones especiales.

La ley 20/86, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, tuvo el fin de establecer el régimen jurídico necesario para que en la generación y gestión de los residuos peligrosos se garantizara la protección a la salud humana, la defensa del medio ambiente y la preservación de los recursos naturales.

La ley 20/86 cita 29 categorías de residuos, y se van definiendo en el Real Decreto 833/88, del 20 de Julio, que establece los mecanismos para identificar y caracterizar los residuos tóxicos y peligrosos definidos en la ley básica. El proceso de identificación de residuos peligrosos se basa en los códigos desarrollados por la OCDE.

El 15 de julio de 1975, autoridades de Medio Ambiente adoptaron una directiva Marco Relativa a los Residuos, (Directiva 75/442), modificada el 18 de Marzo de 1991 (Directiva 91/156), en la cual se elaboró el Catálogo Europeo de Residuos, que posteriormente fue modificado a un Catálogo Europeo de Residuos Peligrosos establecido en 1994.

En Hungría, desde 1989 se ha implementado una política de prevención, promoviendo la eliminación segura de los residuos tóxicos en sitios que son destinados para este fin. En 1990 se puso en marcha la incineración de residuos peligrosos en Dorog, Hungría.

El enfoque de la Unión Europea es, remediar los sitios contaminados para re utilizarlos, debido a que los países son densamente poblados. Las empresas que utilicen estos sitios no serán responsables por los residuos tóxicos que no fueron removidos.

Estados Unidos y el Oeste de Europa tienen políticas exitosas en materia de sitios contaminados, además de ser los más avanzados en políticas y leyes que regulan la gestión de los residuos peligrosos. Por el contrario, en algunos países de Asia, América del Sur, y África, no existen leyes eficientes en materia de prevención y remediación de sitios contaminados.

En otros países también han tomado medidas y proyectos para cumplir con una adecuada gestión de desechos tóxicos. En Hong Kong el gobierno ha considerado implementar un impuesto para las plantas importadoras de químicos de esta región. Malasia, prevé la construcción de plantas de tratamiento, plantas incineradoras, tratamiento químico, estabilización con lodos y vertederos para la disposición final de los contaminantes tóxicos. Las islas filipinas tienen un programa riguroso para promover el reciclado en las industrias manufactureras del país. Egipto ha estimulado a las pequeñas industrias a trasladarse a otros sitios, que estén apartados de la población, así se logra la minimización de vulnerabilidad poblacional, y al mismo tiempo se ubican a los desechos tóxicos a un sólo sitio.

Los países altamente industrializados, se enfrentan a problemas en la salud de la población, y por el alto costo que representa la remediación de sitios contaminados. Aunado a esto, los países en vías de desarrollo enfrentan, a la generación de residuos peligrosos en el propio territorio y en ser captadores de otros desechos de países más avanzados.

b) Nivel Nacional

La industria minero-metalúrgica es una actividad que se caracteriza por la generación de grandes volúmenes de residuos peligrosos y no peligrosos.

En 1986, según el Informe sobre el Medio Ambiente, de la Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología, la distribución por tipos de desechos en México se separaba en cuatro grandes grupos (figura 2.1):

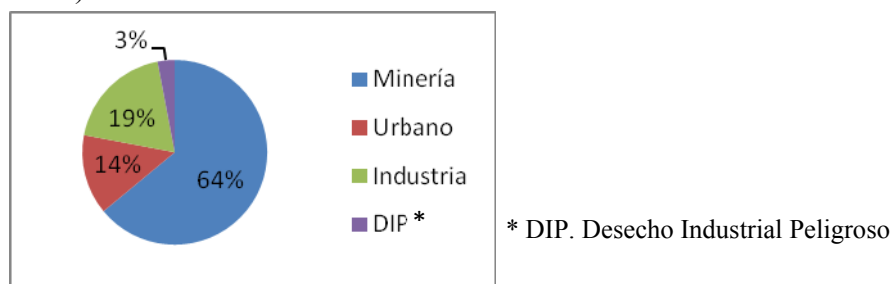


Figura 2.1. Distribución porcentual de los desechos peligrosos en México para 1986.

En México, la legislación en materia ambiental es relativamente reciente. Esta legislación incluye: Leyes, Reglamentos y Normas Oficiales Mexicanas.

A finales de décadas de 1980 – 1990 se publicó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y su respectivo Reglamento. La LGEEPA establece que los generadores de los contaminantes potencialmente peligrosos deben asumir los costos por la contaminación producida, además de prevenir la contaminación en el suelo, controlar los residuos y en la medida de lo posible, prevenir y reducir la generación de residuos peligrosos, así como de incorporar técnicas y procedimientos para su re-uso.

En 2003 fue publicada la Ley General para La Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), mientras que su Reglamento fue publicado en el 2006.

Esta ley clasifica a los residuos minero-metalúrgicos como un tipo de residuos específicos, los que adiciona y diferencia de los peligrosos, manejo especial y sólidos urbanos.

En el artículo 17 de la LGPGIR se indica que los residuos generados por la industria minero-metalúrgica pueden disponerse finalmente en el sitio de su generación.

Así mismo, en los Reglamentos de la LGEEPA y LGPGIR se dan las siguientes opciones para el manejo de residuos peligrosos: i) Confinamiento controlado y ii) Confinamiento en formación geológicamente estable.

En el Reglamento de la LGPGIR se definen estos dos conceptos de la siguiente manera:

1. Confinamiento controlado, obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos.

Los confinamientos controlados son utilizados para almacenar uno o varios tipos de residuos y por lo general se construyen para prestar servicio a terceros. Los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos están regulados en la Norma Oficial Mexicana NOM-055-ECOL-1993.

2. Confinamiento en formaciones geológicamente estables, obra de ingeniería para la disposición final en estructuras naturales o artificiales, impermeables, que garanticen el aislamiento ambientalmente seguro de los residuos peligrosos.

En estos confinamientos solamente se puede almacenar un solo tipo de residuos y se construyen, por lo general, en el sitio donde se generan los residuos que requieren ser almacenados. A diferencia de los confinamientos controlados no pueden prestar servicios a terceros.

Actualmente no existe ninguna Norma Oficial Mexicana que dicte los criterios para poder evaluar cuando un sitio cumple con las condiciones de “*formación geológicamente estable*”.

En la actualidad, se está trabajando con el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PNPGIRS). La política ambiental que plantea este programa está encaminada a la reorientación del manejo de los residuos primordialmente en su recolección y disposición final. La gestión integral debe incluir la recolección total de los residuos en el país; la instalación de Estaciones de Transferencia que amplíen la cobertura regional del servicio de recolección.

Otro punto importante del actual programa es aplicar tecnologías para la disposición final de los residuos que no puedan ser aprovechados, de tal forma que se logre su reducción en volumen o que se aproveche el potencial energético, como una estrategia complementaria a la regularización de los actuales sitios de disposición final y a la construcción de confinamientos, mismos que seguirán una política de regionalización en su construcción.

Finalmente el PNPGIRS, está integrado por líneas estratégicas para cada uno de los tipos de residuos que ha clasificado: Sólidos urbanos, de Manejo Especial y Peligrosos, así como para el sector Minero-Metalúrgico.

Una variable fundamental para la disminución del riesgo ambiental de la infraestructura que es ocupada para su manejo es atender a las condiciones de vulnerabilidad del sitio en donde se generan y disponen los residuos.

III.METODOLOGÍA.

Se realizaron estudios relacionados con los aspectos climáticos, geológicos e hidrogeológicos a nivel local. Esta información permitió valorar la vulnerabilidad del acuífero en la zona de estudio.

Los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad se validaron con los resultados de pruebas de permeabilidad “in situ” y la evaluación de la migración vertical de contaminantes, por la zona vadosa, a través de la caracterización geoquímica en perfiles hasta 32 m de profundidad.

3.1 Aspectos climáticos locales

Se recopilaron y analizaron los datos tomados en la estación meteorológica localizada en el sitio de estudio (dentro del terreno del complejo metalúrgico). Dicha estación tiene registros de 1992 a 2008. Los datos obtenidos de la estación fueron: temperatura, precipitación, evaporación, frecuencia y velocidad del viento. Se hizo un promedio con los datos meteorológicos de forma mensual y anual.

Asimismo, se compararon los datos publicados por INEGI de la estación meteorológica regional ubicada en la capital de San Luis Potosí que cuenta con registros desde el año 1941 hasta el 2004.

Se analizaron los datos de lluvias extraordinarias en el sitio de estudio, se graficaron los datos obtenidos de manera mensual. Los resultados se compararon con los datos de evaporación promedio.

3.2 Aspectos geológicos locales

Se realizó el levantamiento geológico a detalle con el fin de elaborar el mapa geológico local y generar información detallada acerca de litología, relación de contactos, fallas y fracturas. Se documentaron las condiciones de las fracturas, orientación, amplitud,

separación y profundidad. De acuerdo a las características del sitio, se clasificó el suelo del predio del complejo metalúrgico.

Para el levantamiento geológico local, fue necesario revisar las cartas topográficas F14 A73 (Ahualulco del Sonido Trece), y F14 A83 (Tepetate) de INEGI, escala 1:50 000, la unión de ambas cartas fue la base para la digitalización del mapa temático.

Las cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano fueron útiles para establecer las unidades geológicas reportadas en el sitio de estudio, además de ubicar los límites geológicos entre dichas unidades.

De forma más detallada, se revisaron los resúmenes de los folletos técnicos elaborados por Labarthé y Tristán en diferentes años, y artículos publicados por diversos autores: Aguillón et. al., 1994, Martínez y Aguirre, 1984, Cardona, 2009.

3.3 Aspectos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos

Se realizó el inventario de pozos de agua en el área de estudio y en los alrededores hasta una distancia de 1 - 2 km al este, sur y norte del complejo metalúrgico. Se recopiló la información sobre la hidrogeología e hidrogeoquímica de la región. Se revisaron los cortes litológicos de los pozos y sondeos eléctricos verticales en la zona donde se ubica el área de estudio con el fin de identificar la profundidad de las aguas subterráneas y describir las características de la zona vadosa.

Se realizó el muestreo de aguas subterráneas en un total de 11 pozos (Figura 3.1), de acuerdo a los lineamientos descritos en el manual de muestreo de aguas subterráneas de la (CNA, 1999). En campo se determinó la temperatura, pH, conductividad eléctrica, ORP, (Figura 3.2).

En las muestras de agua subterránea se determinaron las concentraciones de elementos mayores y de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) en los laboratorios de los

institutos de Geofísica y Geografía de la UNAM. Las concentraciones de HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} se determinaron por volumetría, las de SO_4^{2-} por turbidimetría, las de Cl^- y F^- por potenciometría, las de Na^- y K^+ por espectrofotometría de emisión. Las concentraciones de EPT (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Sb, Se, V, Zn, Ag, Ba, Be y Bi) se determinaron por Espectroscopía de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP- AES). Las concentraciones de As también se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros.

La calidad de los resultados químicos se comprobó mediante el cálculo del balance de cargas y para la interpretación de los datos se utilizaron los diagramas de hidrogeoquímica de Piper y Stiff.

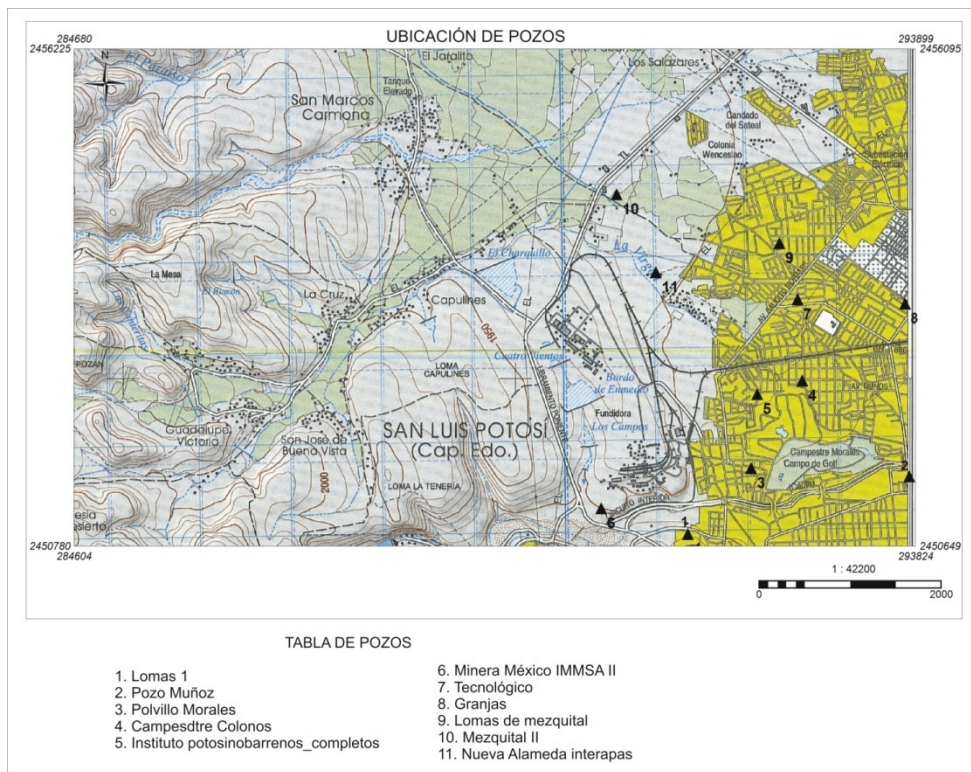


Figura 3.1. Localización geográfica de los pozos muestreados, cercanos al área de estudio.



Figura 3.2. Muestreo de aguas subterráneas en el área de estudio y determinación de algunas variables “in situ”.

3.4 Vulnerabilidad del acuífero

El término “vulnerabilidad” es utilizado para representar las características que determinan la susceptibilidad de un receptor a ser adversamente afectado por una carga contaminante.

En el caso del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, la vulnerabilidad del acuífero está condicionada a:

1. Inaccessibilidad de la zona saturada
 - Tipo de acuífero: libre, semiconfinado, confinado
 - Profundidad del nivel estático de aguas subterráneas (NEA)
 - Permeabilidad de la zona No saturada que está encima del NEA
 - Clima (precipitación vs. evapotranspiración)
2. Capacidad de atenuación de la zona no saturada
 - Precipitación/disolución
 - Sorción/desorción

La vulnerabilidad del acuífero en el área de estudio se valoró utilizando el método “GOD” que es el indicado en las Normas Oficiales Mexicanas para la disposición de residuos mineros (jales¹ y terreros de lixiviación²).

Este método es utilizado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) para la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos.

El método GOD (Groundwater hydraulic confinement, Overlaying strata, Depth to groundwater table) considera la susceptibilidad del acuífero ante una entrada de contaminantes sobre la superficie topográfica. El método considera dos factores básicos:

- El grado de inaccesibilidad hidráulica de la zona saturada
- La capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada del acuífero.

Los parámetros en los que se basa este método son tres:

1. **Grado de confinamiento hidráulico (Tipo de acuífero)**
2. **Ocurrencia del sustrato suprayacente (Características litológicas, granulométricas y grado de compactación de los estratos que están encima del nivel del agua subterránea)**
3. **Distancia al nivel del agua subterránea (Profundidad del nivel del agua subterránea)**

Este método consiste en determinar el índice de vulnerabilidad de acuíferos (VAq) a través de los tres parámetros arriba descritos; para lo cual se asigna un valor a estas variables (Figura 3.3).

1 Norma Oficial Mexicana que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y pos-operación de presas de jales.

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

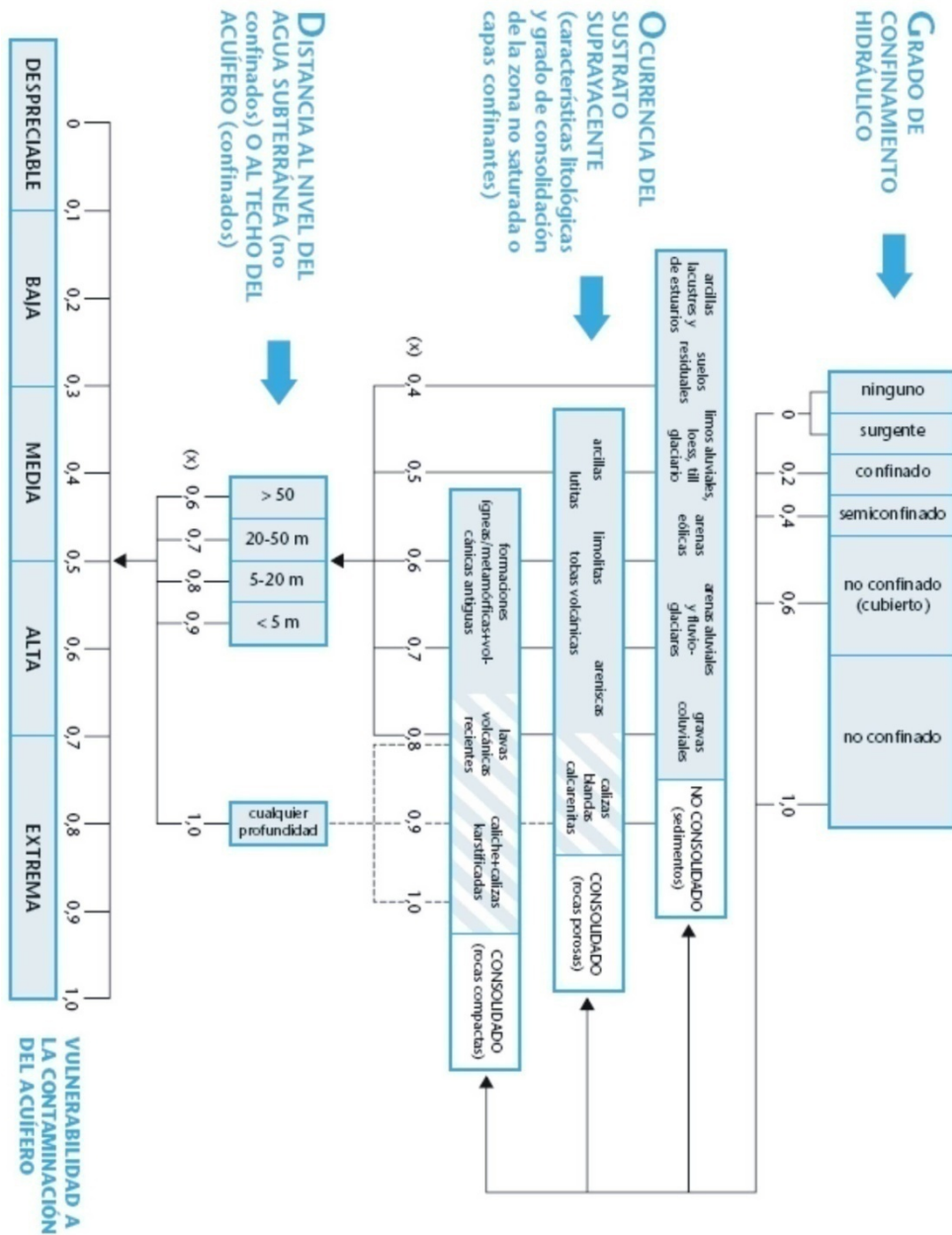


Figura 3.3. Esquema del método GOD para valorar la vulnerabilidad de acuíferos.

3.5 Validación de los resultados del cálculo de la vulnerabilidad del acuífero en el área de estudio

3.5.1 Pruebas de permeabilidad *in situ*

Para realizar las pruebas de permeabilidad “in situ” se seleccionó la denominada “prueba Lugeón”, que fue diseñada para rocas compactas como es el caso de la capa litológica del sitio de estudio (González de Vallejo et al, 2002).

Esta prueba se realizó en 10 pozos de 32 m de profundidad que se perforaron³ y cuya ubicación se muestra en la Figura 3.4. La parte superior del terreno que presentó signos visibles de alteración se excavó manualmente y se tomaron muestras de este material intemperizado cada 20 cm para análisis posteriores. La cavidad excavada fue rellenada con cemento, con el objeto de estabilizar la zona alterada, y una vez que fraguó se procedió a la perforación con diámetro NQ hasta los 32 m de profundidad y recuperación continua de núcleo para análisis posteriores (Figura 3.5).

La prueba Lugeón consiste en inyectar agua a presión en un tramo perforado y aislado de los otros tramos de la perforación con el fin de obtener curvas de gastos de absorción de agua en función de la presión de inyección. La realización de la prueba Lugeón, en la zona de estudio, se realizó mediante la inyección de agua a presión en tramos de 5m en las perforaciones realizadas, aislando el tramo de prueba del resto de la perforación utilizando para ello obturadores en la parte inferior del tramo de prueba (Figura 3.6A,B). Para controlar la presión se instaló un manómetro y con un medidor de caudal se midió la cantidad de agua inyectada (Figura 3.6C).

³ Las perforaciones fueron realizadas por una empresa especializada.

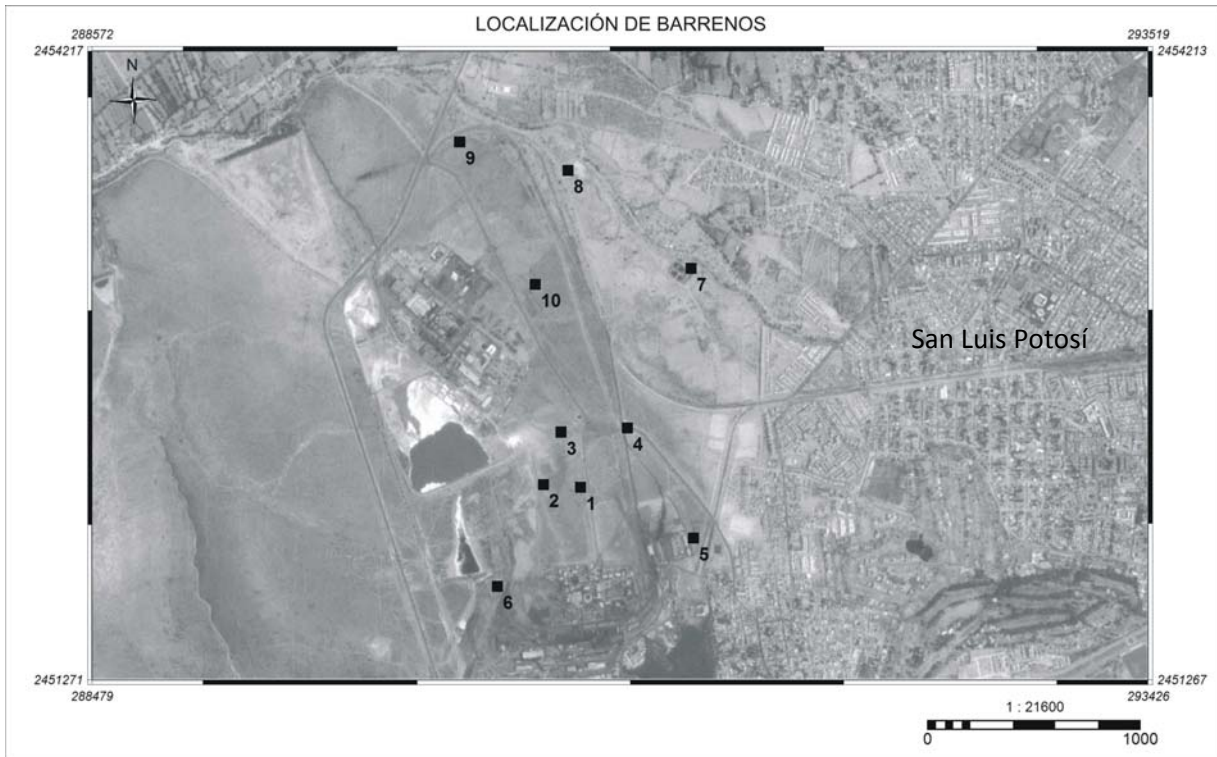


Figura 3.4. Ubicación de los barrenos perforados en el área de estudio.



Figura 3.5. Perforación de pozos para la realización de pruebas de permeabilidad y toma de muestras para análisis químicos.

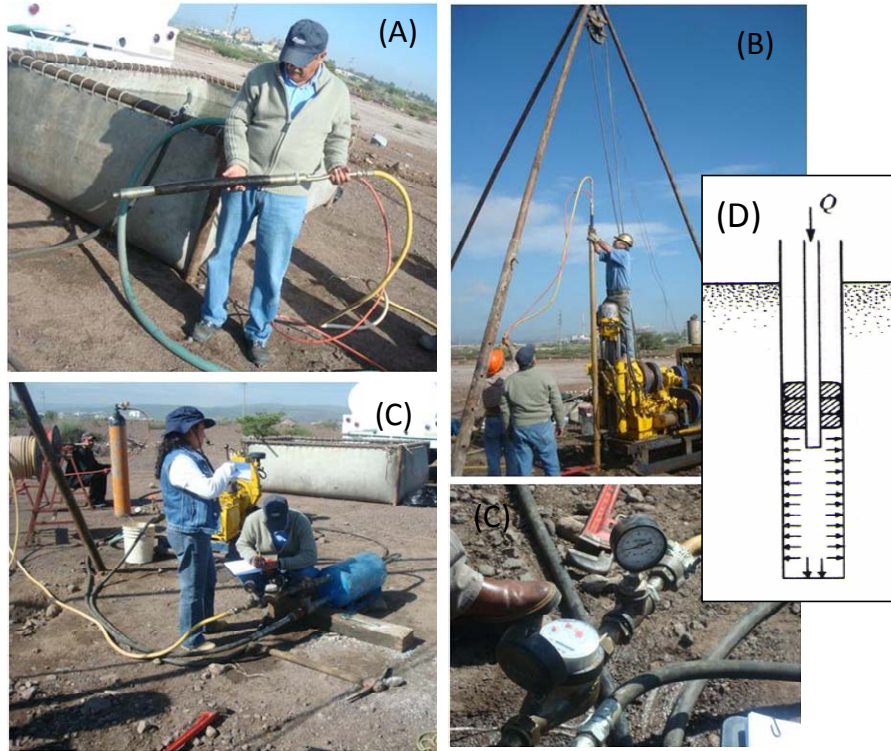


Figura 3.6. (A y B) Preparación e introducción del obturador en el pozo. (C) Inyección del agua a presión constante controlada con manómetro y medición de la cantidad de agua inyectada y D) Esquema de la prueba Lugeón.

Las pruebas se hicieron en cada tramo de manera escalonada elevando progresivamente la presión y luego disminuyendo. Se utilizaron presiones de inyección desde un mínimo de 1.5 kg/cm^2 la cual se fue incrementando hasta 5.0 y 7.9 kg/cm^2 . Para cada presión de inyección se midió el gasto de agua correspondiente en un tiempo igual a 10 minutos.

El método indica que la permeabilidad en Unidades Lugeón (UL); se calcula dividiendo el gasto correspondiente del agua inyectada (l/min) a una presión de 10 kg/cm^2 , entre la longitud del tramo de prueba de la zona probada, expresada en metros; por lo tanto en la zona de estudio, los cálculos de las Unidades Lugeón se hicieron por extrapolación del gasto de agua a 10 kg/cm^2 de presión, ya que ésta no se alcanzó para no crear fracturas artificiales en la capa litológica.

La unidad de medida para este ensayo (el Lugeón) equivale a un coeficiente de permeabilidad de $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ (González de Vallejo et al, 2002).

La clasificación de las rocas de acuerdo a su valor de permeabilidad, expresada en UL, se muestra en la Tabla 3.1, (Modificado de González de Vallejo et al, 2002).

Tipo de roca	Unidades Lugeón UL
Muy impermeable	0.0 – 1.0
Prácticamente impermeable	1.0 – 2.5
Poco permeable	2.5 – 3.5
Permeable	3.5 – 6.0
Muy permeable	> 6.0

Tabla 3.1.

3.5.2 Perfiles geoquímicos para valorar la migración vertical de elementos potencialmente tóxicos a través de la zona vadosa

a) Análisis químicos de arsénico y plomo

El arsénico y plomo han sido los únicos elementos potencialmente tóxicos asociados con problemas ambientales en la zona de estudio y relacionados con las actividades del complejo metalúrgico.

Con el fin de valorar la migración vertical de los EPT se determinaron las concentraciones totales de As y Pb, en el suelo y en los núcleos del conglomerado (matriz y clastos) de las 10 perforaciones donde se realizaron las pruebas de permeabilidad (figura 3.7). Los análisis químicos se realizaron “in situ” sobre el material intemperizado y los núcleos de cada uno de los barrenos de perforación con el equipo Portátil de Fluorescencia de Rayos X de tercera generación NITON XL3t, de acuerdo al método estandarizado US-EPA 6200⁴ (figura 3.7).

⁴ 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. <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/6200.pdf>

El desempeño del analizador NITON XL3t en la determinación de la composición elemental de residuos mineros fue previamente evaluada. Zamora et al. (2008) realizó la validación de los análisis realizados con el NITON XL3t en muestras de residuos mineros mediante la comparación con los resultados de análisis realizados, en las mismas muestras, con técnicas convencionales (análisis por ICP-AES en las mismas muestras, previa digestión ácida en horno de microonda). Los coeficientes de correlación (r^2) obtenidos por Zamora et al. (2008) entre los resultados con el equipo NITON XL3t y por ICP-AES fue de 0.98.

Se analizaron un total de 827 muestras en los 320 metros perforados (figura 3.9). También se identificaron las características de la migración vertical del As y Pb, utilizando la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido acoplada con espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS).

La calidad de los análisis químicos, obtenidos por la técnica de análisis empleada, se valoró a través la precisión y exactitud.

- La precisión se controló en muestras analizadas por triplicado. Los resultados del coeficiente de variabilidad (%CV) resultaron entre 0.8 y 20%. Estos valores indican la excelente calidad de los resultados en cuanto a precisión.
- La exactitud se controló a través de análisis de estándares certificados. La recuperación de la concentración de plomo en los estándares certificados varió entre 81% y 118%; mientras que la recuperación de arsénico varió entre 80 y 111%. Estos valores indican la excelente calidad de los resultados en cuanto a exactitud.

b) Características del As y Pb. en la parte superior de conglomerado (suelo).

La identificación de fases sólidas se hizo mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido acoplada con espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS) en las

muestras del conglomerado intemperizado tomadas a los primeros 60 cm de cada perforación.



Figura 3.7. Preparación del equipo antes de tomar las lecturas de As y Pb que presentaron los núcleos de los barrenos perforados.



Figura 3.8. Organización de los núcleos antes de su análisis geoquímico.

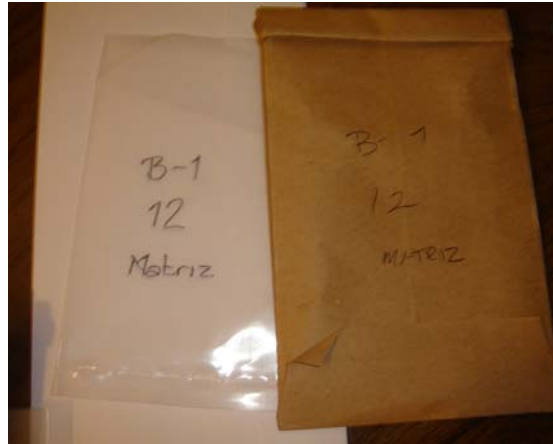


Figura 3.9. La selección de las muestras fue determinada en función de la cantidad de matriz dentro de un núcleo. Si los resultados obtenidos no se encontraban dentro de los parámetros normales (altas concentraciones en los primeros 60 cm y poca o nula concentración después de los 60 cm), la muestra era molida para ser nuevamente analizada.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Datos climáticos locales

A nivel regional el clima del área de estudio se puede clasificar como árido. De los reportes establecidos por la estación meteorológica regional, se observó una evaporación de cinco órdenes mayor en comparación con la precipitación, esta misma observación se encuentra a nivel local en la estación meteorológica ubicada en el sitio de estudio y que a continuación se detalla.

Temperatura

Los datos de temperatura de acuerdo a la información de la estación meteorológica son los siguientes, y se pueden observar en la Figura 4.1.

Los datos recopilados de temperatura se pueden dividir los meses del año, en los que se presenta una temperatura que oscila entre los 18°-20° (abril-septiembre), y los meses (octubre-marzo) en los que se presentan temperaturas más bajas (promedio = 14°).

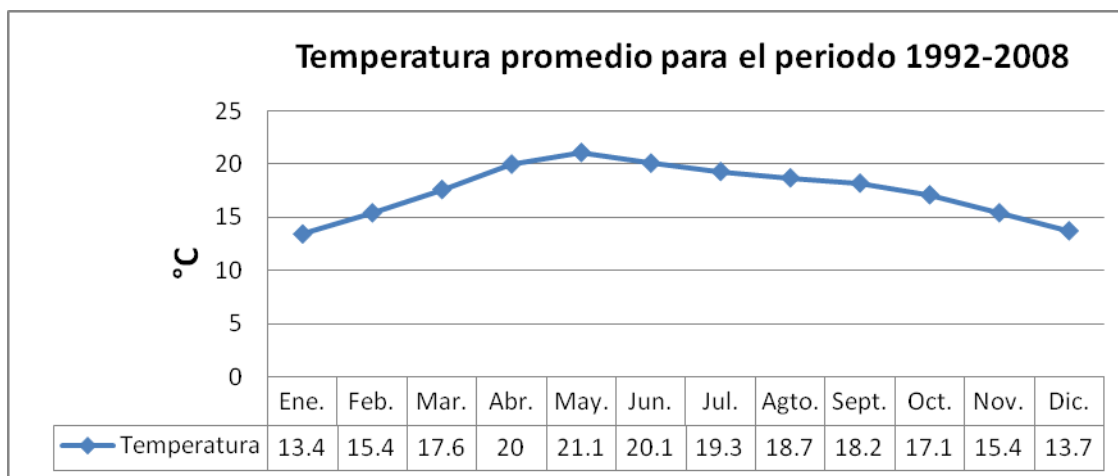


Figura 4.1. Promedios mensuales de la temperatura registrados en la estación meteorológica del sitio de estudio.

Precipitación pluvial y evaporación

Los datos anuales que se reportan en la estación meteorológica para el periodo 1993-2008 se presentan en la figura 4.2.

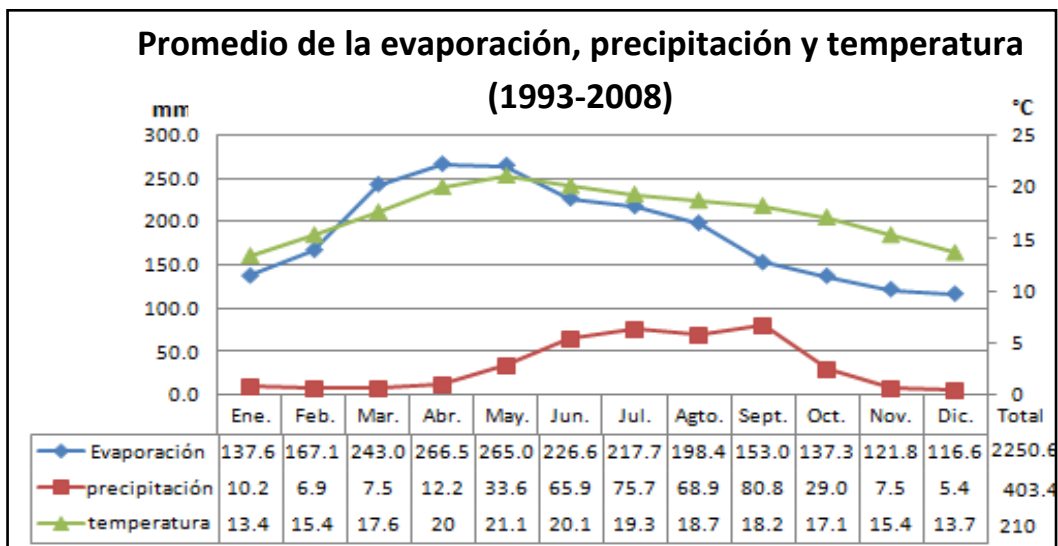


Figura 4.2. Comparación de valores anuales de evaporación, precipitación y temperatura.

Los resultados graficados en la figura 4.2 indican que anualmente, la evaporación es superior en al menos tres veces más con relación a la precipitación. Las variables de temperatura y evaporación muestran una tendencia muy similar. Los meses de abril y mayo son los meses con máxima temperatura (20-21°) y máxima evaporación (267-265 mm).

Mensualmente, el promedio de la precipitación oscila entre los 7 y los 80 mm. Los valores en promedio para la evaporación se encuentran entre los 117 a 267 mm. En los meses más cálidos (abril, mayo y junio) la precipitación aumenta gradualmente sin que ésta sea significativa, ya que los valores de evaporación siguen siendo superiores, y se encuentran por arriba de los 200 mm mientras que la precipitación oscila entre los 12 y los 67 mm.

La máxima precipitación ocurre en el mes de septiembre con un promedio superior a los 80.8 mm Sin embargo, la evaporación para este mes alcanza los 153 mm, dos veces más con respecto a la precipitación (Figura 4.2).

La comparación de valores reportados en promedio mensual, para un mayor periodo se encuentran graficados en la figura 4.3.

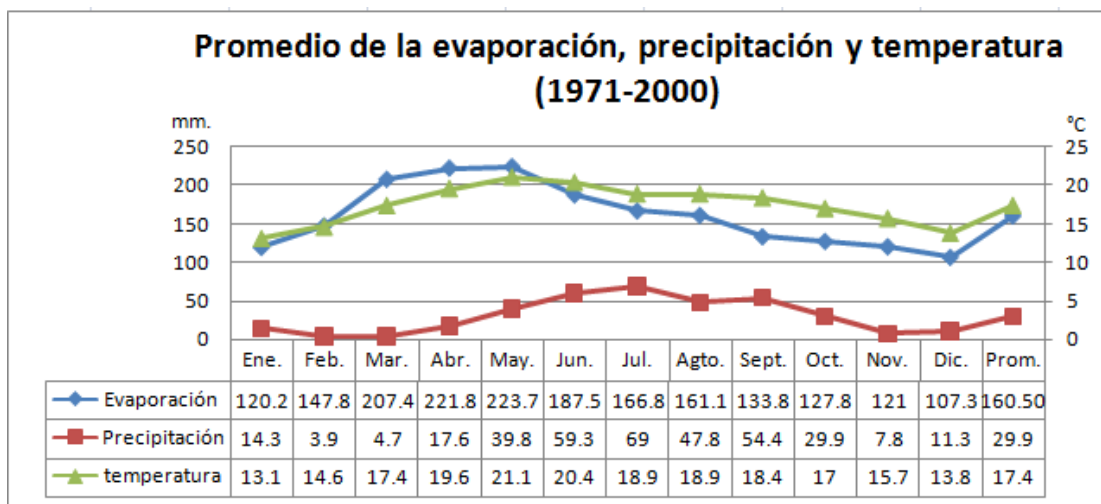


Figura 4.3. Comparación entre valores mensuales de evaporación, precipitación y temperatura.

El comportamiento de la evaporación es nuevamente de al menos tres veces mayor que la precipitación. La precipitación para este periodo (1971-2000) oscila entre los 5 y 59 mm. La evaporación se encuentra entre los 107 y 221 mm. El mes con mayor evaporación se registra en febrero con 37 veces menos precipitación. El mes con mayor precipitación es en julio y septiembre, en estos meses la evaporación es el doble de la precipitación.

La temperatura se mantiene entre los 13-21° y su comportamiento es muy similar al de la evaporación. Los meses con mayor temperatura y evaporación se registran en abril y mayo. Los meses con menor temperatura y menor evaporación son noviembre, diciembre y enero.

Análisis de la intensidad y frecuencia de lluvias extraordinarias.

Las lluvias extraordinarias son aquellas que superan la cantidad de milímetros de evaporación. El análisis de este evento se realizó dentro del período 1994-2008 con los datos de la estación meteorológica ubicada en el sitio de estudio.

La frecuencia de lluvias extraordinarias se graficó mensualmente. Los resultados obtenidos destacan frecuencia anual de lluvias extraordinarias de junio-octubre, septiembre destaca

como el mes que más lluvias extraordinarias presenta. Todos los años se presentó la misma frecuencia excepto el año 2000 que registró tres lluvias extraordinarias en agosto y cuatro en octubre. (Figura 4.4).

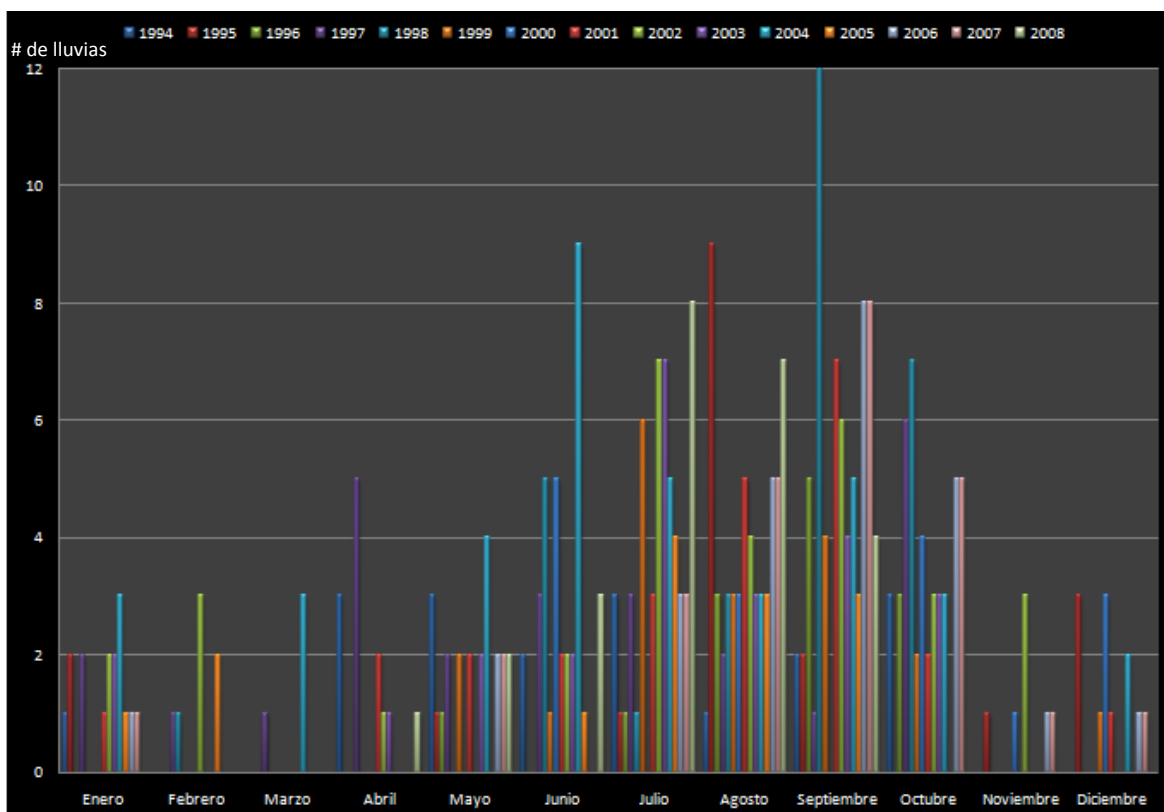


Figura 4.4. Gráfica de frecuencias en lluvias extraordinarias dentro del área de estudio.

La intensidad de las lluvias extraordinarias se graficó mensualmente con los milímetros (mm) de la lluvia extraordinaria que no fueron evaporados. Los meses con mayor cantidad de mm de precipitación son junio-septiembre con valores de 5 a 22 mm. Los meses que registran una máxima cantidad de mm de lluvia son mayo con 23.9 mm de lluvia en el año de 1997 y marzo con 23.8 mm de lluvia para el año 2003 (Figura 4.5.).

Considerando que del total de precipitación pluvial que cae sobre una superficie dada, una parte se evapora y regresa a la atmósfera, y la restante se reparte entre infiltración y escorrentía superficial (Figura 4.6), en la zona de estudio, al ser la evaporación muy superior a la precipitación (de al menos tres veces más), las probabilidades de infiltración

hacia las aguas subterráneas son mínimas. Asimismo, la poca vegetación que se encuentra en el sitio de estudio no es suficiente para que haya una retención del agua para su posterior infiltración (Figura 4.7).

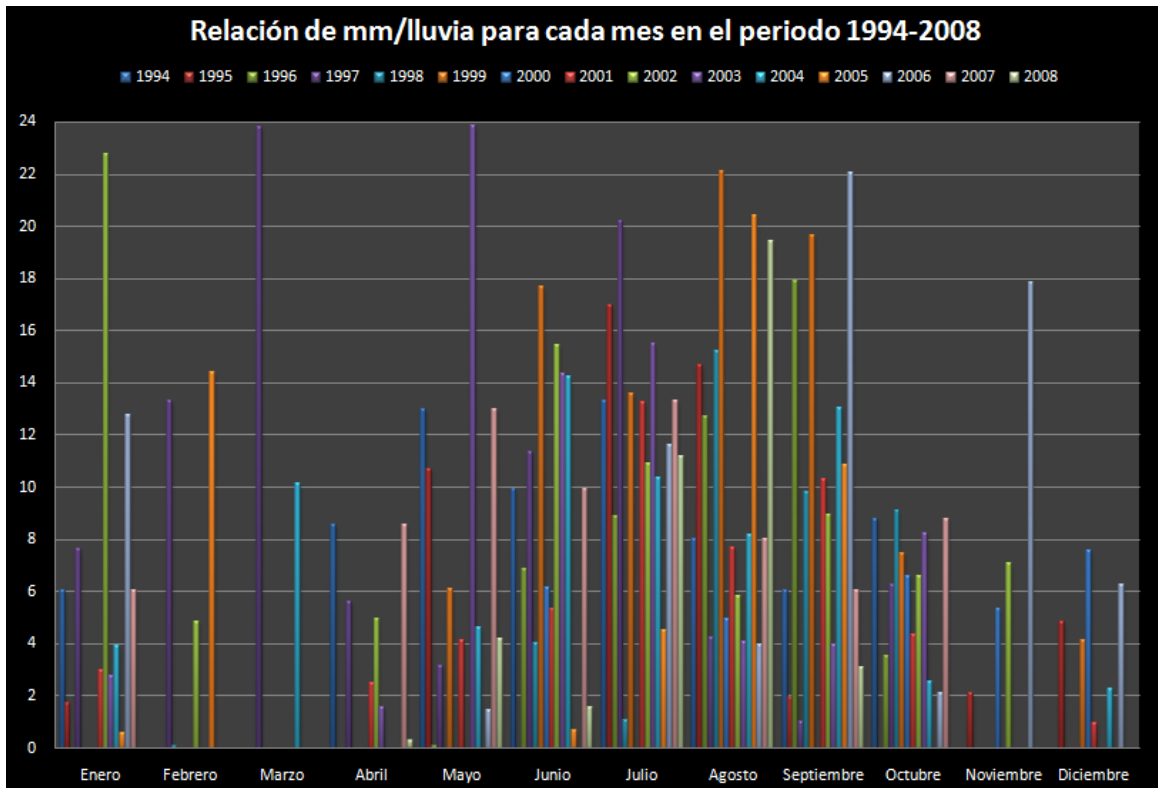


Figura 4.5. Cantidad de milímetros de lluvia que se reportan en superficie durante las lluvias extraordinarias.

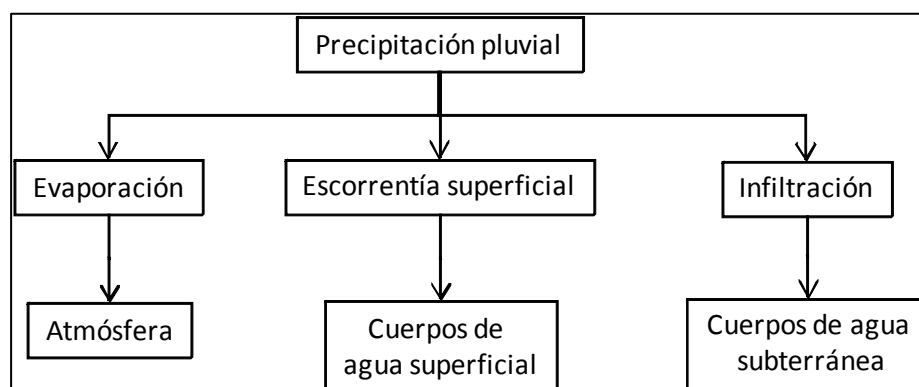


Figura 4.6. Diagrama general de la distribución de la precipitación pluvial



Figura 4.7. Vista de la zona de estudio hacia el poniente y oriente respectivamente. La vegetación es escasa, principalmente se encuentran matorrales y pequeños árboles.

Vientos

La distribución del viento en horas de exposición y en velocidad según datos reportados de la estación meteorológica del sitio de estudio para el periodo 1993-2008 están reportados en la tabla 4.1.

Orientación del viento 1993-2008		
Dirección	Total, horas	m/s
N	157	2.0
NNE	203	2.6
NE	493	2.9
ENE	1276	3.3
E	1603	3.5
ESE	783	3.3
SE	323	2.8
SSE	148	2.4
S	132	2.5
SSW	221	2.9
SW	832	3.5
WSW	739	3.3
W	256	2.6
WNW	163	2.4
NW	190	2.4
NNW	209	2.3

Tabla 4.1 muestra de manera general la distribución del viento en el total de horas de exposición y la velocidad para el periodo 1993-2008.

Las orientaciones con una mayor cantidad de horas en la exposición del viento son ENE, E, SW, WSW. En cuanto a los promedios de velocidad del viento, los mayores son del orden de 3.3 a 3.5 y se registraron en las orientaciones ENE, E, ESE, SW y WSW (Figura 4.8).

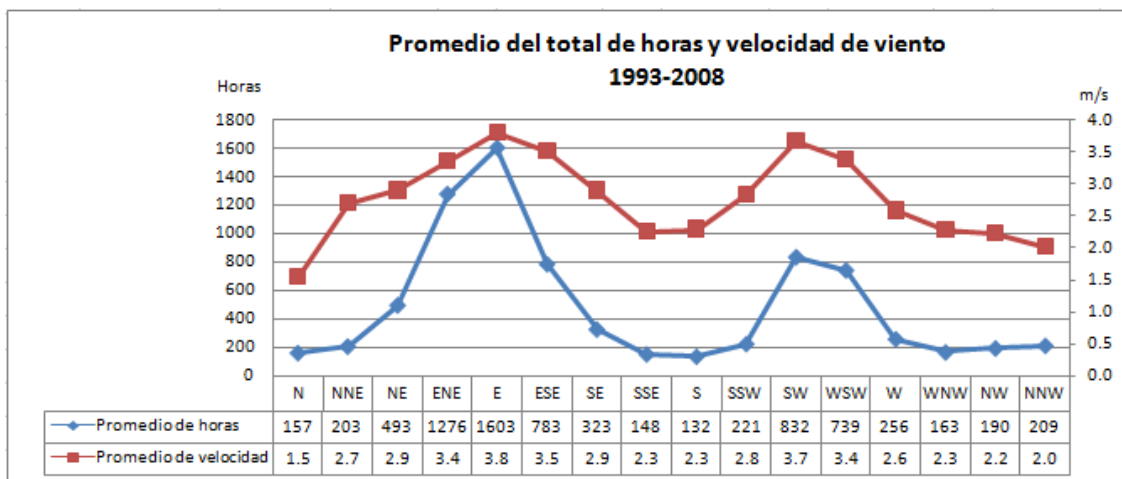


Figura 4.8. Gráfica con los promedios registrados de 1993-2008 en la estación meteorológica del sitio de estudio.

El comportamiento de la exposición de horas y la velocidad del viento es similar; en ambas se presenta una tendencia hacia el E y SW. La exposición del viento hacia las orientaciones ENE, E y SW es hasta ocho veces mayor que en otras orientaciones. La velocidad del viento en promedio, es de 2 a 3.5 m/s. Sin embargo, de forma particular, hay registros con velocidades superiores a 5.5 m/s.

De acuerdo a la escala de Beaufort, cuando la velocidad del viento es superior a 5.5 m/s comienzan a levantarse las partículas de polvo, esto es importante graficarlo debido a que una de las direcciones preferenciales de los vientos es hacia donde está la población.

La tabla 4.2 muestra el acumulado mensual de la dirección preferencial del viento tomando en cuenta únicamente la dirección con la mayor velocidad registrada diariamente para cada mes, por un período de 16 años (1993-2008). En algunos meses no se reportan los 16 datos obtenidos del periodo de estudio, debido a que la estación meteorológica no generó información completa.

La tabla 4.2 muestra el promedio de las velocidades máximas ocurridas en el periodo de 1993-2008. El número indica la cantidad de veces que el mes (columna izquierda), registró una velocidad máxima en la orientación que se encuentra en la primer fila.

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
ENERO	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	11	2	0	0	0	0
FEBRERO	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	9	3	0	0	0	1
MARZO	0	2	0	0	1	0	0	0	0	1	10	2	0	0	0	0
ABRIL	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	8	4	0	0	0	0
MAYO	0	1	1	2	6	2	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0
JUNIO	0	0	0	3	11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
JULIO	0	0	0	3	9	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
AGOSTO	0	0	1	2	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEPTIEMBRE	1	0	1	1	8	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OCTUBRE	0	0	0	0	6	3	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0
NOVIEMBRE	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	6	2	0	0	0	0
DICIEMBRE	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	10	1	0	0	0	0

Tabla 4.2.

Los resultados muestran una dirección preferencial en la máxima velocidad del viento hacia diferentes direcciones dentro de los cuadrantes N-E y S-W. Las direcciones señaladas con color anaranjado permiten identificar que la orientación preferencial hacia el E, se da en los meses de mayo a octubre y la orientación preferencial hacia el SW se da en los meses de noviembre-abril. Las velocidades que superan los 5.5 m/s se muestran en la figura 4.9.

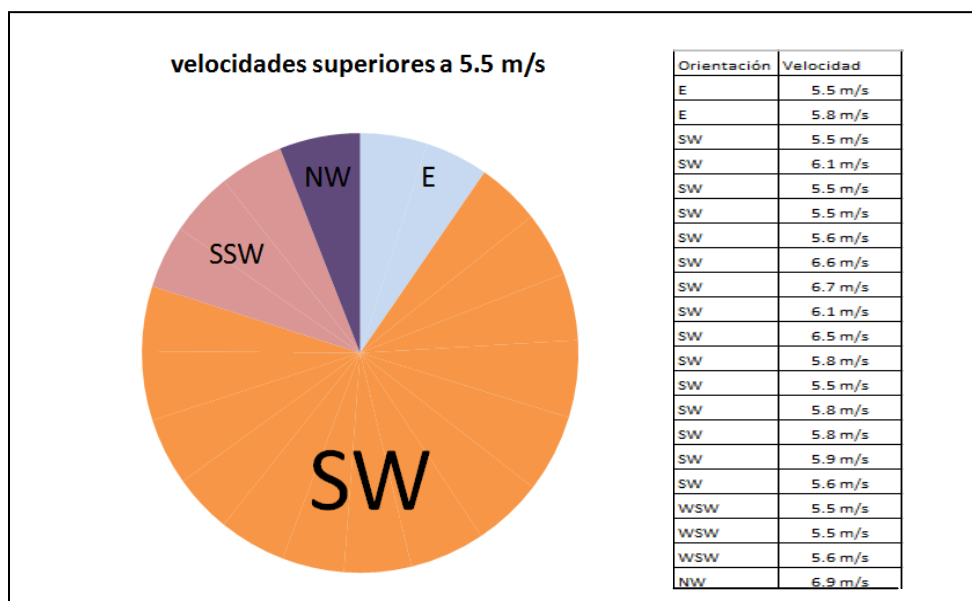


Figura 4.9. Representación gráfica de las velocidades que pueden arrastrar partículas suelo y sedimento en el área de estudio.

De los resultados obtenidos se encontró una correlación en la distribución de las orientaciones del viento y la tendencia en la precipitación a nivel mensual (figura 4.10). Para los meses de mayo-octubre, en donde preferentemente se da la mayor precipitación, la orientación del viento se inclina hacia el E, <http://www.inegi.org.mx> (figura 4.11 a,b).

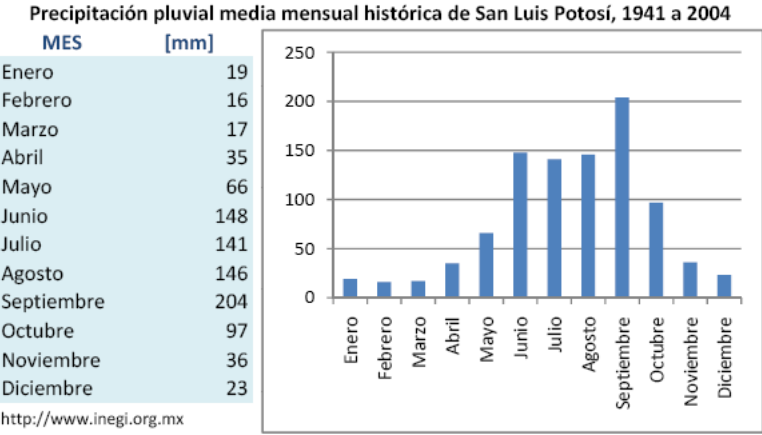


Figura 4.10. Los datos reportados por INEGI, muestran seis meses con mayores precipitaciones, mismos que reportan una orientación preferencial hacia el E.

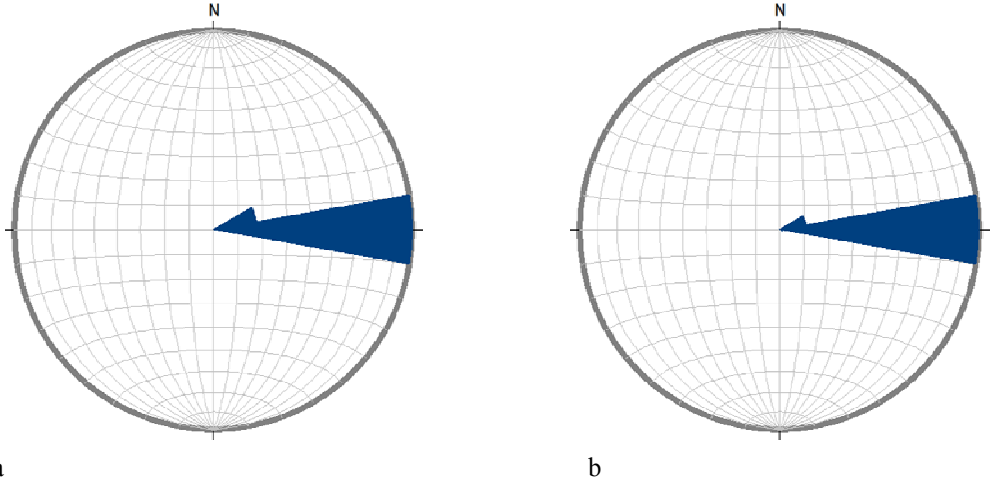


Figura 4.11.a.La gráfica de la máxima velocidad de viento y b. La gráfica con la máxima cantidad de horas para los seis meses con mayores precipitaciones están dirigidas hacia el E.

En los seis meses restantes noviembre-abril, se presentan las precipitaciones que oscilan entre los 15 y 40 mm. Estos meses son los meses más fríos y más secos además de tener una orientación del viento preferentemente hacia el SW, figura 4.12a,b.

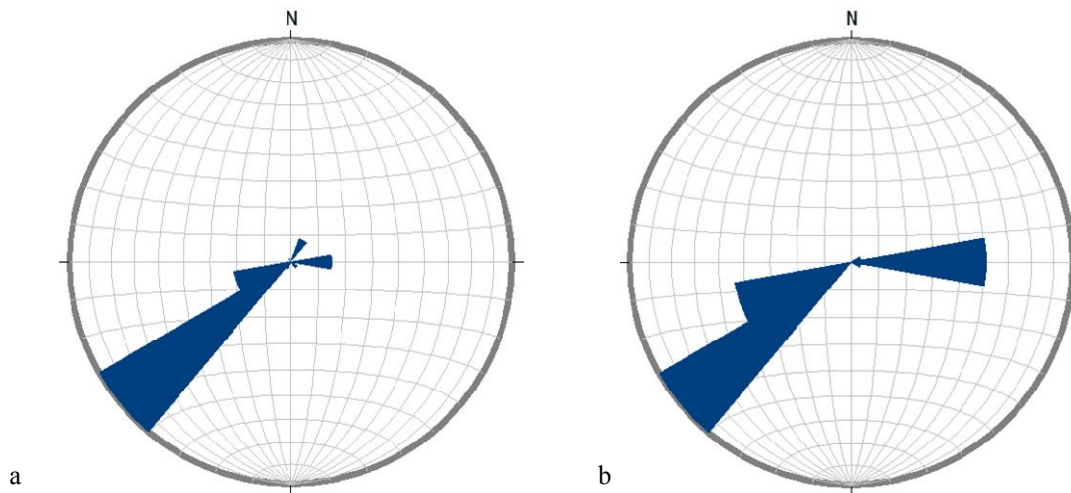


Figura 4.12. a.Gráfica de la máxima velocidad del viento y b. Máxima exposición de horas con dirección preferencial hacia el SW en los meses con una precipitación media mensual de 15-40 mm. Son los meses más fríos y secos.

La correlación entre la precipitación y la orientación preferencial de los vientos es debida a la situación geográfica de la región, la cual tiene influencia tanto de la circulación del Océano Pacífico como del Golfo de México y de la faja subtropical de alta presión que se sitúa en las proximidades del paralelo 30°N.

Durante la mitad caliente del año, la faja de alta presión se desplaza hacia el norte, por ello la dirección del viento en la estación meteorológica señala el SW. Posteriormente, en los meses de mayo-octubre la circulación monzónica del Océano Pacífico, Golfo de California y Golfo de México crean una circulación del viento del noreste, por ello, la tendencia en la orientación de los vientos en estos meses son registrados hacia el E, (Vidal Z., 2000).

4.2 Aspectos geológicos locales

Los cuerpos de roca reconocidos en el área cartografiada se presentan en el mapa geológico del Figura 4.13 y se dividen en rocas volcánicas del Terciario (riolita), rocas sedimentarias clásticas del Terciario (conglomerado) y depósitos aluviales del Cuaternario

Mapa geológico local

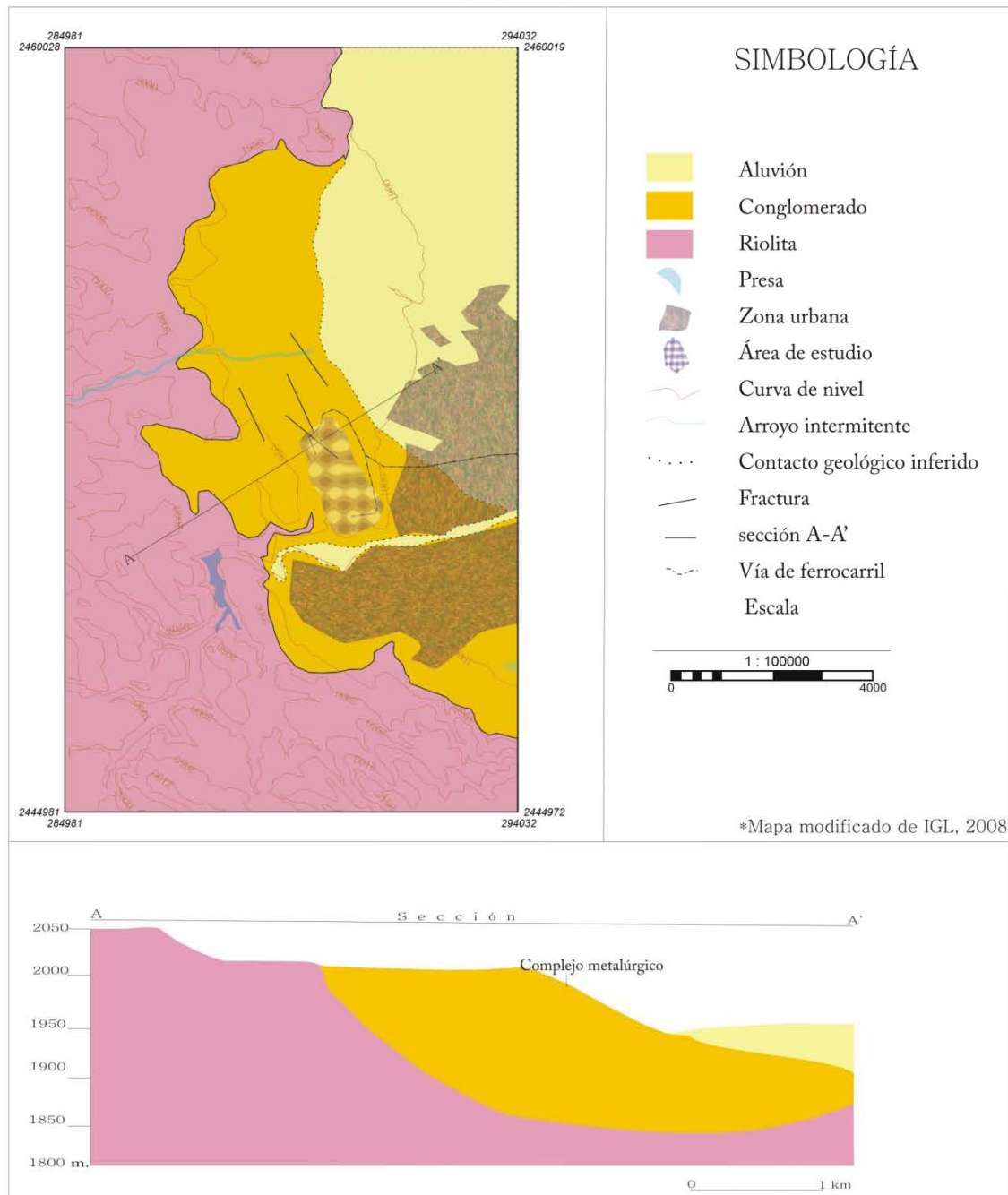


Figura 4.13. Mapa geológico del área de estudio

Rocas volcánicas del Terciario

Estas rocas forman parte del Cinturón Volcánico de San Luis Potosí e incluyen lavas que van de lutita a riolita, las cuales representan actividad efusiva (derrames y domos) con rocas piroclásticas intercaladas. Datos isotópicos en rocas riolíticas localizadas al sur oriente del área de estudio, indican que el magmatismo ocurrió entre los 32 y 29 Ma (Nieto-Samaniego et al., 1996). También se observa una cubierta ignimbrítica y depósitos de caída de composición riolítica que cubre a los derrames de lava, que pudieran corresponder a la parte superior del CVSLP, cuyas edades reportadas varían entre los 29 y 27 Ma (Labarthé et al., 1979).

Las rocas volcánicas de la base del área cartografiada se caracterizan por su color rosa y afloran en la parte W del área de estudio en las estribaciones de la Sierra San Miguelito, particularmente se ubican en las inmediaciones del Poblado de San Marcos Carmona y en Agua Señora. Petrográficamente tienen una textura holocristalina compuesta de microlitos de plagioclasa, algunos cristales de hematita y apatita como minerales accesorios. Los fenocristales son de plagioclasa-andesina y sanidino en proporciones similares y constituyen el 15% de la roca (Instituto de Geología, 2008).

Este cuerpo de roca es cubierto por derrames de lava de color pardo amarillento de textura porfirítica donde sobresalen cristales de plagioclasa y cuarzo de unos 0.5 cm de tamaño. Petrográficamente tiene una matriz afanítica devitrificada y fenocristales de cuarzo y sanidino. En algunos casos se observa una textura fluidal, que incluyen pliegues de flujo. Afloran en las partes altas de la sierra al poniente de San Marcos Carmona y al oriente de Colonia Insurgentes. Su fracturamiento es más intenso que la roca que sobreyace y a su vez está cubierta por una ignimbrita de color rosa o café rosado con pómez y fragmentos líticos esporádicos. Petrográficamente tiene textura porfirítica con fenocristales de sanidino y cuarzo que varían de subhedral a euhedral en proporciones del 20 al 40 % (Figura 4.14). También se observan afloramientos aislados de estas rocas en los poblados de los Capulines al oriente de Guadalupe Victoria (Instituto de Geología, 2008).



Figura 4.13. Afloramiento de riolita de color rosa en la parte oeste del área de estudio

Rocas sedimentarias clásticas del Terciario

Las rocas sedimentarias terciarias que se encuentran en el área de estudio están representadas por el conglomerado Halcones, que cubre discordantemente a las rocas volcánicas.

En el mapa geológico de la Hoja Tepetate F14-A83El del Servicio Geológico Mexicano, este Conglomerado es del Terciario (Neogeno).

Es importante resaltar que la planta metalúrgica que constituye el objetivo de este estudio yace sobre el conglomerado Halcones.

Este conglomerado Halcones, que aflora en el área, corresponde a conglomerados con intercalaciones de areniscas que varían desde grano fino a grueso y lodolitas arenosas. El conglomerado está constituido por clastos de tamaño variable (de 50 cm hasta 2 mm), bien redondeados de composición variable abarcando todas las rocas volcánicas que se encuentran en el área de estudio (cantos de derrames de lava, ignimbritas, tobas, en menor medida cantos de andesita basáltica). En cuanto a la matriz, su composición está integrada por fragmentos líticos de rocas volcánicas compuestas por granos de cuarzo y plagioclasas.

El espesor del conglomerado es variable, sin embargo a partir de la sección geológica construida, en la zona de la planta metalúrgica llega a alcanzar hasta 150 m de espesor.

Descripción del perfil del suelo

El suelo dentro del conglomerado Halcones se inicia en superficie y se profundiza hasta aproximadamente 50-60cm. A partir de 50-60 cm de profundidad el material es muy compacto y lo constituyen particularmente rocas.

De acuerdo a la clasificación de la WRB, el tipo de suelo que se encuentra en el área de estudio corresponde a un leptosol hiperesquelético (hk). Este tipo de suelos es muy somero, contienen roca continua y grava a 50 cm. en profundidad, se encuentra en zonas áridas, templadas y montañosas. Una característica particular del suelo en el área de estudio es que contiene menos del 20% de material fino en una profundidad de 75 cm. de la superficie (hiperesquelético, hk) (Figura 4.15).

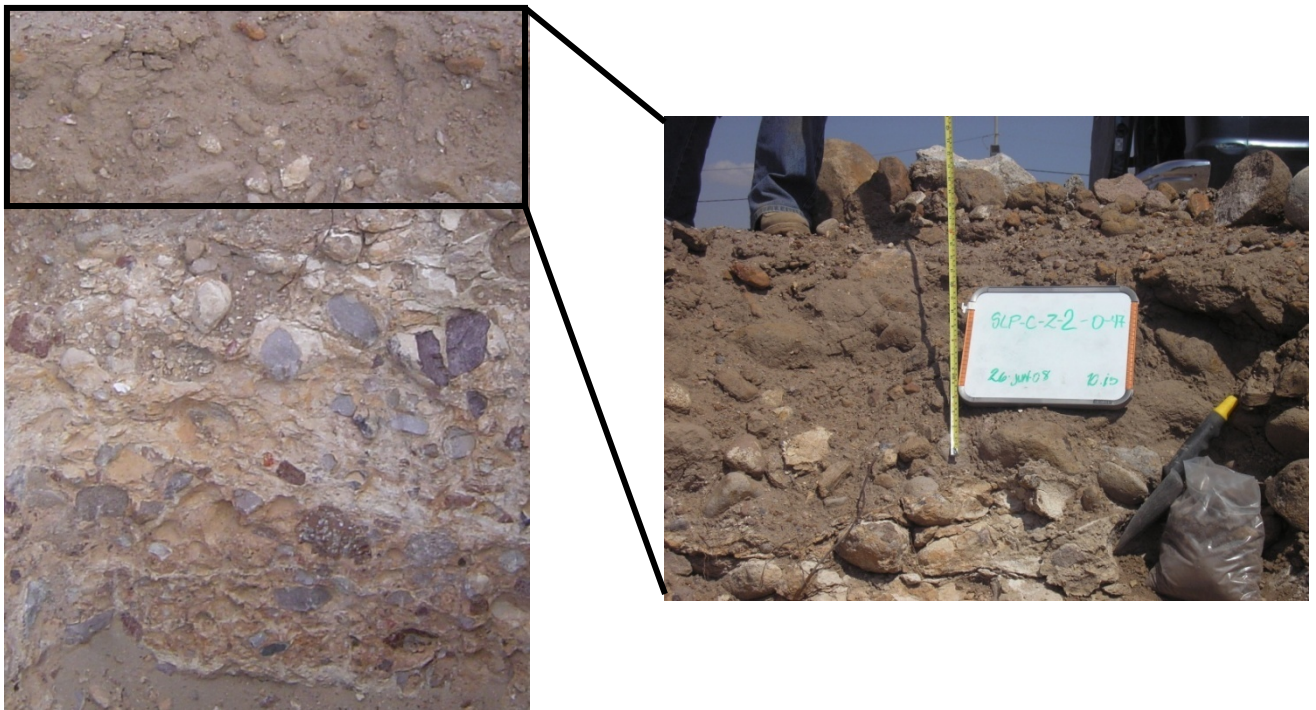


Figura 4.14. El conglomerado Halcones dentro del área de estudio muestra una capa de suelo en los primeros 50-60 cm, posteriormente se encuentra un conglomerado muy bien cementado. En el acercamiento de la foto podemos observar que el material fino está intercalado con gravas y clastos.

Desde el punto de vista físico químico, los leptosoles presentan una capacidad de intercambio catiónico muy baja por su escaso contenido de arcilla. Por análisis granulométricos, se comprobó la baja disposición de arcillas, clasificando el suelo como franco-arenoso con porcentajes de arcilla entre 5 y 19% (Tabla 4.3).

Muestra	Arcillas	Limo	Arena	Clasificación
	%	%	%	
1	19	24	57	franco arenosa
2	5	12	83	arena franca
3	5	8	87	arenosa
4	9	28	63	franco arenosa
5	13	32	55	franco arenosa
6	5	26	69	franco arenosa
7	11	34	55	franco arenosa
8	17	32	51	franco
9	7	30	63	franco arenosa
10	9	26	65	franco arenosa

Tabla 4.3. Clasificación granulométrica de la matriz del suelo en el conglomerado Halcones

Fracturas en el conglomerado Halcones en el área de estudio

Las fracturas identificadas muestran una orientación NW-SE cuyo espesor es de unos milímetros hasta 15 cm, aún cuando la mayoría no rebasa los 10 cm y en general se presentan rellenas (Figura 4.16). Las variaciones en el espesor de las fracturas son muy diversas y en la mayoría de los casos se desarrollan solo en algunos niveles del conglomerado, desapareciendo en los cuerpos de roca que los infra y sobreyacen. Por lo general, las fracturas solamente afectan la matriz del conglomerado y en raras ocasiones a los clastos.

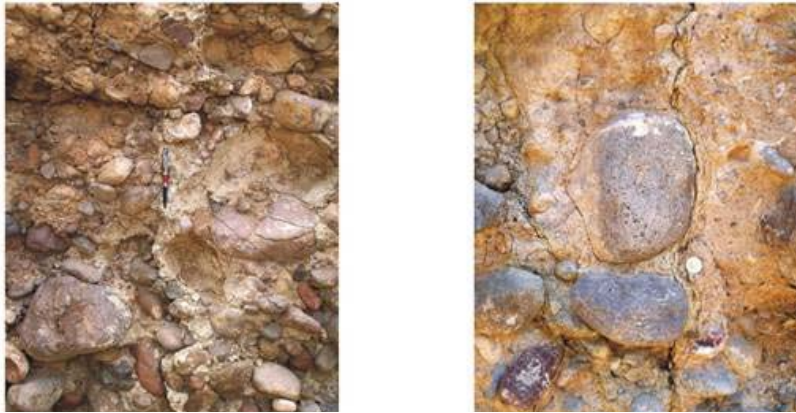


Figura 4.16. Fracturas en el conglomerado Halcones

Depósitos aluviales del Cuaternario

Los depósitos aluviales del Cuaternario incluyen todo aquel material transportado y sin consolidar de granulometría variada. Aflora en los márgenes de los arroyos y ríos y se extiende a toda porción oriental del área cartografiada. Sus límites no pudieron establecerse debido al crecimiento de la mancha urbana. Sobreyacen al Conglomerado Halcones y son horizontes interdigitados sin compactar, tanto de gravas como arenas y arcillas.

4.3 Aspectos hidrogeológicos locales

Se analizó la información hidrogeológica y geofísica de carácter local y se valoró la calidad química de las aguas subterráneas de la zona de estudio en 11 pozos localizados dentro del terreno que ocupa la planta metalúrgica y en los alrededores hasta una distancia de 1-2 km al este y sur.

4.3.1 Profundidad del acuífero en el área de estudio

En el área de estudio solamente se identificó la presencia del denominado acuífero profundo, que de acuerdo con lo reportado es del tipo confinado y semiconfinado.

A continuación se detallan los argumentos que permiten concluir que en el área de la planta metalúrgica solamente existe el acuífero profundo cuyo nivel estático está a más de 100m de profundidad y cuya zona vadosa está constituida por el conglomerado Halcones.

1. La información del corte litológico del pozo que existe dentro del terreno de la planta metalúrgica indica que la profundidad del nivel piezométrico de las aguas subterráneas, está a 147m (Tabla 4.4).
2. Datos de sondeos eléctricos verticales realizados en el área de estudio (Buró Hidrológico, 2008) indican que en el área de la planta metalúrgica hay una capa superficial de poco espesor (0.3 – 0.9 m) y altos valores de resistividad (281 – 983 Ω -m) que se asocia al suelo.

Profundidad (m)		Clasificación
0.00	2.00	Suelo
2.00	6.00	Arena
6.00	76.00	Conglomerado de rocas volcánicas
76.00	87.00	Basalto negro afanítico
87.00	98.00	Conglomerado de rocas volcánicas
98.00	124.00	Grava, gravilla y arena
124.00	134.00	Sedimentos lacustres limo-arenoso, semiconsolidados
134.00	164.00	Arena, gravilla y gravilla. Nivel del agua subterránea = 147 m
164.00	298.00	Toba arenosa blanca
298.00	306.00	Conglomerado de rocas volcánicas
306.00	406.00	Toba arenosa-limosa blanca
406.00	528.00	Latita Portezuelo

Tabla 4.4. Descripción litológica de la zona vadosa del pozo IMMSA II (Fuente: Buró Hidrológico, 2008)

Subyaciendo al material intemperizado, y hasta la profundidad estudiada se distinguen dos capas: 1) Depósitos de conglomerados antiguos y 2) Rocas volcánicas riolíticas.

Los depósitos de conglomerados se componen de 3 unidades geoelectricas debido a su resistencia a la corriente eléctrica, lo que se debe probablemente a la diferencias de granulometría tanto de los clastos como de la matriz del conglomerado:

- a) Capa de conglomerado 1 con resistividades entre 30-64 Ω -m, y espesores alrededor de 50 m.

- b) Capa de conglomerado 2 con resistividades entre 75-131 Ω -m y espesor entre 10 y 30 m.
- c) Capa de conglomerado 3 con resistividades entre 7-23 Ω -m y espesores mayores a 90 m.

De acuerdo a estos datos geofísicos reportados, se puede considerar que el espesor de la capa de conglomerado es del orden de los 150 - 170 m y sobreyacen a las rocas volcánicas riolíticas.

- 3. En los 10 pozos perforados (hasta 32 m de profundidad), para la realización de pruebas de permeabilidad, dentro del terreno de la planta metalúrgica no se encontró ningún cuerpo de agua subterránea hasta la profundidad estudiada (32 m), lo que permite confirmar, con datos duros, que en el predio del Complejo Metalúrgico no existe el acuífero somero.
- 4. Los datos reportados de profundidad de los niveles de agua subterránea de pozos muestreados en este estudio varían entre 85.5m y 169.5m
- 5. Los datos de la hidrogeoquímica de las muestras de agua subterránea, indican en los pozos del área de estudio se está extrayendo aguas termales (altas temperaturas y naturalmente ricas en F- y As) de la familia geoquímica bicarbonatada sódica, lo que indica que la zona de estudio solamente existe el acuífero relacionado con flujos profundos y regionales, cuya recarga deberá darse en la sierra de San Miguelito, que está a más de 5.0 km hacia el W de los terrenos del Complejo Metalúrgico.

4.3.2 Hidrogeoquímica

A) parámetros generales determinados en campo

En la tabla 4.5 se muestran los parámetros generales determinados en campo.

Clave	Temp.	pH	ORP	CE*
	°C		mV	μS/cm
1. Lomas I	33.8	7.38	-34	446
2. Pozo Muñoz	38.6	7.65	-49	374
3. Polvillo Morales	28.4	7.42	-35	263
4. Campestre Colonos	33.1	7.45	-37	273
5. Instituto Potosino	32.3	7.31	-29	173
6. Minera México IMMSA II	41.1	7.96	-67	384
7. Tecnológico	35.2	7.54	-42	363
8. Granjas	28.8	7.37	-33	283
9. Lomas de mezquital	35.6	7.54	42.5	363
10. Mezquital II	33.5	7.51	-40	346
11. Nueva Alameda Interapas	34.1	7.55	-43	384

Tabla 4.5. Determinación de variables in situ en el muestreo de pozos cercanos al área.

Los valores de temperatura son relativamente altos (28°C – 41°C) e indican que se trata de aguas del acuífero profundo de San Luis Potosí.

Los valores de pH de las muestras de agua varían de de 7.31 a 7.96, lo que indica que son prácticamente neutras. Los valores de conductividad eléctrica varían entre 173 a 446 μS/cm que son valores que responden a las relativamente altas temperaturas de las muestras de aguas. El ORP (Potencial Oxidation-Reduction) medido con un electrodo selectivo (ISE) muestra conducciones reductoras.

B) Componente mayores

En la tabla 4.6 se muestran los resultados de las concentraciones de los componentes mayores y fluoruros. El balance de cargas varía entre 0.8 y 4.7, lo que indica la excelente calidad de los resultados.

Los resultados indican altas concentraciones de bicarbonatos (HCO_3^-) y sodio. Sobresalen las altas concentraciones de fluoruros (0.79 – 4.45 mg/L) que son superiores al límite permisible (LP = 1.5 mg/L) para agua de consumo humano según las normatividad mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

Pozo	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Balance
	mg/L								cargas
1. Lomas I	162.23	54.24	17.5	3.22	66.3	7.2	27.25	2.92	2.4
2. Pozo Muñoz	166.13	27.67	16.3	4.45	72.8	3.92	20.04	1.46	4.7
3. Polvillo Morales	98.64	26.71	11.5	1.87	37	7.9	15.23	2.43	3.3
4. Campestre Colonos	116.81	20.38	10.1	2.38	40.7	6.3	14.43	1.94	1.1
5. Instituto Potosino	70.09	15.65	7	1.1	19.8	7.85	11.22	1.94	1.5
6. Minera México IMMSA II	170.02	26.01	16.1	4.22	65.3	4.2	22.44	nd	0.8
7. Tecnológico	157.04	28.54	16.2	4.17	62.83	4.45	21.24	1	1.8
8. Granjas	110.32	20.05	14	0.79	26.7	15.5	19.23	2.92	1.8
9. Lomas de mezquital	160.94	24.21	15.2	3.94	63.2	4.7	20.84	1.46	3.2
10. Mezquital II	153.15	23.57	15.3	3.91	58.7	4.65	19.24	1.22	1.3
11. Nueva Alameda Interapas	166.13	29.6	16.6	3.76	64.6	4.6	20.84	1.94	1.5

Tabla 4.6. Resultados de los componentes mayores.

De acuerdo a la ubicación de las muestras de agua en el Diagrama de Piper (Figura 4.17) se puede concluir que son del tipo bicarbonatadas sódicas, lo que junto a las altas concentraciones de fluoruros y elevadas temperaturas (28°C – 41°C) indican que se trata del acuífero profundo perteneciente a un sistema de flujo regional con un patrón de circulación de mucho tiempo influenciado por procesos de intercambio iónico (calcio por sodio), cuya recarga debe darse a una distancia muy grande de la zona donde se ubica el complejo metalúrgico en SLP, (Buró hidrogeológico, 2008).

Diagrama de Piper

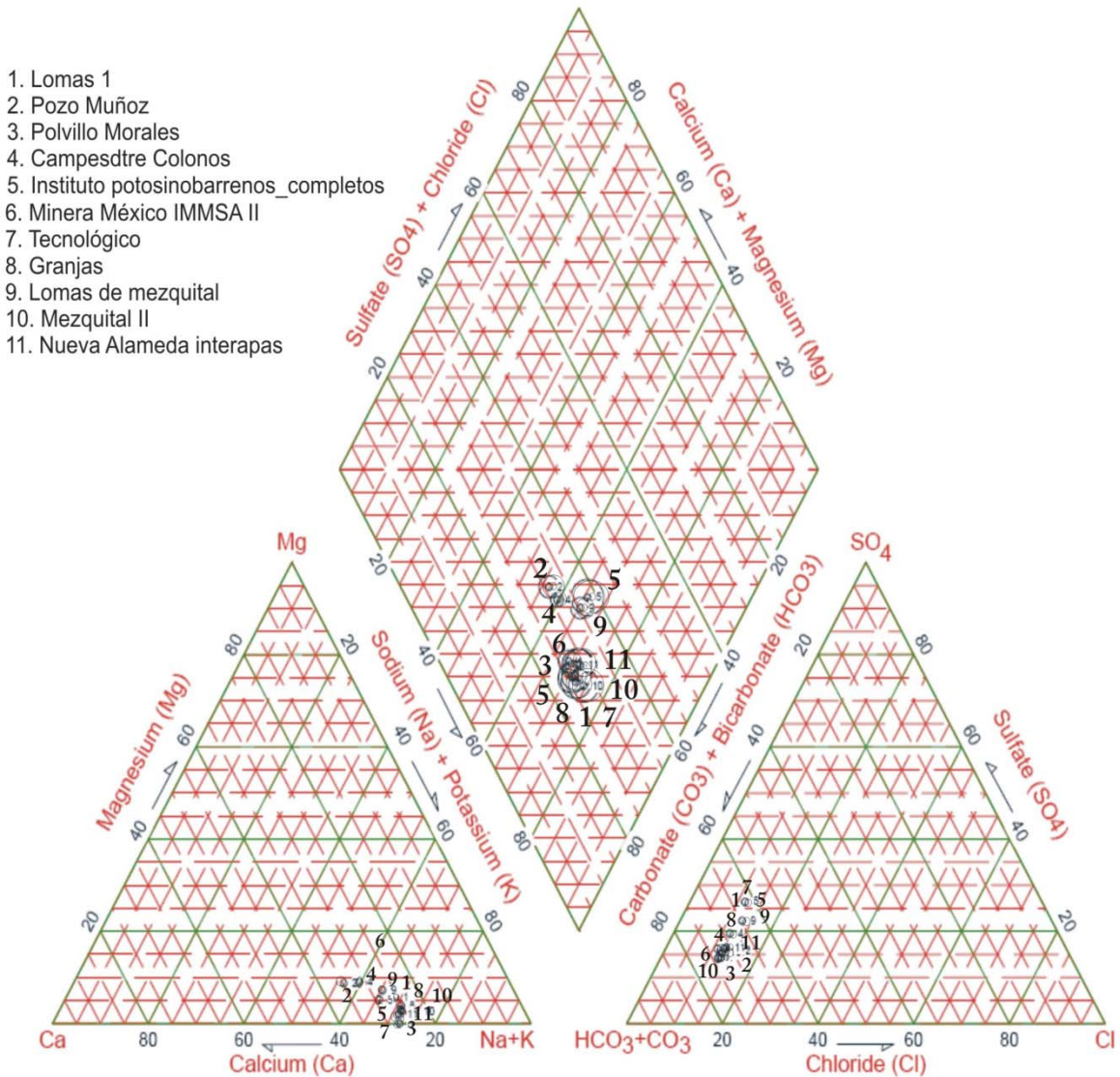


Figura 4.16. Diagrama de Piper o triángulos para determinar la clasificación del agua muestreada.

De acuerdo a la distribución espacial mostrando el tipo hidrogeoquímico de las muestras de agua, utilizando los diagramas de Stiff (Figura 4.18), se puede observar que el carácter sódico-potásico es más acentuado en las muestras de agua de los pozos que están más cercanas al complejo metalúrgico (al oeste de la zona de estudio, hacia las sierra), y es menos acentuado en los pozos que están más hacia el este del mismo, hacia la ciudad de

San Luis Potosí (hacia el centro del Valle), lo que podría indicar, que en estos últimos puede existir la mezcla de aguas profundas con aguas más someras.

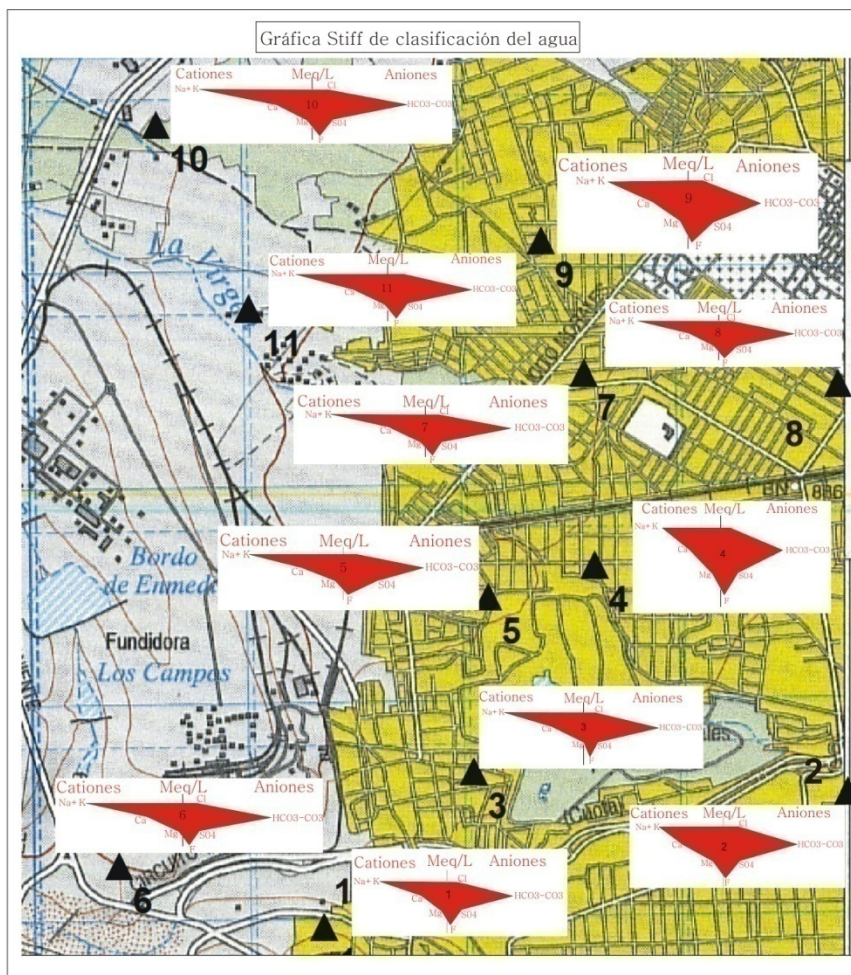


Figura 4.17. Diagrama hidroegeoquímico de Stiff que muestra la clasificación del agua.

C) Componentes menores

Las concentraciones de los componentes menores se presentan en la Tabla 4.7. Las concentraciones de estos componentes menores son inferiores a los límites permisibles especificados en la NOM-127-SSA1-1994. La lectura de los componentes se determinó por Espectroscopía de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP- AES).

Los límites no detectados se encuentran reportados en la tabla 4.8. Los límites de cuantificación se establecieron de acuerdo al laboratorio en 10 veces el valor de fondo.

Clave Lab.	Pozo	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb
		mg/L						
UNAM-1	Campestre colonos	0.0124	0.0019	0.00001	0.00002	0.0004	0.0025	0.0022
UNAM-2	Granjas	0.0109	0.002	0.00003	0.00005	0.00039	0.0003	0.0034
UNAM-3	IMMSA II	0.0002	0.0006	0.00001	0.0001	0.00005	0.0006	0.0052
UNAM-4	Instituto Potosino	0.0021	0.0013	0.00004	0.0002	0.00516	0.0008	0.0059
UNAM-5	Lomas I	0.0107	0.0007	0.00003	0.00012	0.00176	0.0013	0.0038
UNAM-6	Lomas de Mezquital	0.0092	0.0013	0.00003	0.00011	<LD	0.0009	0.0027
UNAM-7	Mezquital II	0.0045	0.001	0.00002	0.0001	0.0004	0.0003	0.004
UNAM-8	Nueva Alameda	0.0045	0.0017	0.00005	0.00003	0.00228	0.001	0.0035
UNAM-9	Polvillo Morales	0.0076	0.0026	0.00002	0.0004	0.00003	0.001	0.0039
UNAM-10	Pozo Muñoz	0.00102	0.0009	0.0011	0.0005	0.00664	<LD	0.0088
UNAM-11	Tecnológico	0.0086	0.0018	0.00003	0.0003	0.00009	0.001	0.0046
Mínimo		0.0002	0.0006	0.00001	0.00002	<LD	<LD	0.0022
Máximo		0.0124	0.0026	0.0011	0.0005	0.00664	0.0025	0.0088
Límite NOM-127-SSA1-1994		0.025	0.005	0.05	2.00	0.3	ND	0.01
Clave Lab.	Pozo	Sb	Se	V	Zn	Ag	Ba	Be
		mg/L						
UNAM-1	Campestre Colonos	0.0003	0.0021	0.0042	0.0008	0.00001	0.0011	0.00144
UNAM-2	Granjas	<LD	0.0015	0.0038	0.0009	0.00001	0.0087	0.00002
UNAM-3	IMMSA II	0.0029	<LD	0.0072	0.00113	0.00004	0.00979	0.00003
UNAM-4	Instituto potosino	0.0001	0.0047	0.0086	0.00113	0.00003	0.02237	0.00004
UNAM-5	Lomas I	0.0019	0.011	0.0044	0.00105	0.00004	0.00918	0.00093
UNAM-6	Lomas de mezquital	0.00002	0.0023	0.0047	0.00073	0.00004	0.00118	0.00153
UNAM-7	Mezquital II	0.00005	0.0028	0.0084	0.00079	0.00003	0.01487	0.00203
UNAM-8	Nueva alameda	0.00001	0.0033	0.0047	0.00092	0.00004	0.00799	0.00173
UNAM-9	Polvillo morales	<LD	0.0011	<LD	0.00074	0.00004	0.00822	0.00239
UNAM-10	Pozo Muñoz	<LD	0.0021	0.0102	0.0009	0.00003	0.02707	0.0007
UNAM-11	Tecnológico	<LD	0.0012	0.0056	0.00051	0.00003	0.00252	0.00115
Mínimo		<LD	<LD	<LD	0.00051	0.00001	0.0011	0.00002
Máximo		0.0029	0.011	0.0102	0.00113	0.00004	0.02707	0.00239
Límite NOM-127-SSA1-1994		ND	ND	ND	5.00	ND	0.7	ND

Tabla 4.7 Concentración de componentes menores de las muestras de agua en los pozos de la zona de estudio.

Elemento	Longitud de onda nm.	ppm (mg/L)
As	188.98	0.000500
Cd	228.80	0.000500
Cr	267.72	0.000005
Cu	327.39	0.000005
Fe	239.56	0.000005
Ni	231.60	0.000100
Pb	405.78	0.000500
Sb	206.84	0.000005
Se	196.03	0.000500
V	290.88	0.001000
Zn	206.20	0.000500
Ag	328.07	0.000005
Ba	233.53	0.001000
Be	265.05	0.000010
Bi	190.17	0.000005

Tabla 4.8. Límites no detectados de los componentes menores de las muestras de agua en los pozos de la zona de estudio.

5 Valoración de la vulnerabilidad del acuífero de la zona de estudio utilizando el método “GOD” indicado en la NOM-141-SEMARNAT-2004

5.1 Generalidades

La valoración de la vulnerabilidad de un acuífero, utilizando el método “GOD”, se hace a través del cálculo del Índice de vulnerabilidad “ V_{Aq} ”, mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$V_{Aq} = (G) * (O) * (D)$$

Donde:

G = Grado de confinamiento hidráulico (Tipo de acuífero)

O = Ocurrencia del sustrato suprayacente (Características litológicas, granulométricas y grado de compactación de los estratos que están encima del nivel del agua subterránea)

D = Distancia al nivel del agua subterránea (Profundidad del nivel del agua subterránea)

En función del valor del Índice de vulnerabilidad “ V_{Aq} ”, la vulnerabilidad de un acuífero puede ser: despreciable, baja, media, alta o extrema (Tabla 4.9).

La tabla 4.9 muestra la valoración de la vulnerabilidad de un acuífero en función del índice de vulnerabilidad “ V_{Aq} ” (Fuente: NOM-141-SEMARNAT-2004)

Índice de Vulnerabilidad “ V_{Aq} ”	Vulnerabilidad
0.0 – 0.1	Despreciable
0.1 – 0.3	Baja
0.3 – 0.5	Media
0.5 – 0.7	Alta
0.7 – 1.0	Extrema

Tabla 4.9.

5.2 Determinación de los valores de “G”, “O” y “D” en la zona de estudio

a) Grado de confinamiento hidráulico (Tipo de acuífero)

En la zona de estudio solamente se identificó al acuífero profundo, que de acuerdo a los estudios hidrogeológicos consultados, es del tipo confinado y semiconfinado.

Para acuíferos confinados y semiconfinados el valor de “G” es de 0.2 y 0.4 respectivamente (Figura 4.19).

b) Ocurrencia del sustrato suprayacente (Características litológicas, granulométricas y grado de compactación de los estratos que están encima del nivel del agua subterránea).

Los barrenos perforados en el área, así como los estudios geológicos, muestran que el denominado conglomerado Halcones conforma la zona vadosa del sitio de estudio. El conglomerado está compuesto principalmente por clastos volcánicos cementados en una

matriz de arenas finas – medias y arcillas con intercalaciones de arenisca y lodolitas. Los primeros 0.6 m de este conglomerado están alterados; pero a partir de los 0.65 m y hasta más de 100 m de profundidad el conglomerado es sano y está muy cementado.

De acuerdo a la litología de la zona vadosa del sitio de estudio, el valor de “O” es de 0.6 y 0.7 (Figura 4.19).

c) **Distancia al nivel del agua subterránea (Profundidad del nivel del agua)**

El nivel del agua subterránea en la zona de estudio es mayor a 100m (ver capítulo 4.3 de este trabajo)

Para acuíferos cuyo nivel del agua esté a profundidades mayores a 50 m, se obtiene un valor de “D” igual a 0.6 (Figura 4.19)

5.2.1. Cálculo de la valoración de la vulnerabilidad

Sustituyendo en la ecuación $V_{Aq} = (G) (O) (D)$, los valores seleccionados de las respectivas variables de acuerdo a las condiciones de la zona de estudio, se obtiene un “ V_{Aq} ” que varía entre 0.168 a 0.072 (Tabla 4.10), lo que significa la vulnerabilidad del acuífero en la zona de estudio va desde despreciable a baja, lo que implica que este acuífero no es vulnerable a la contaminación por infiltración a través de la zona vadosa.

G	O	D	Vulnerabilidad
0.2	0.6	0.6	0.072
0.4	0.7	0.6	0.168

Tabla 4.10 Valores de Índice de Vulnerabilidad “ V_{Aq} ” para las condiciones del acuífero de la zona de estudio

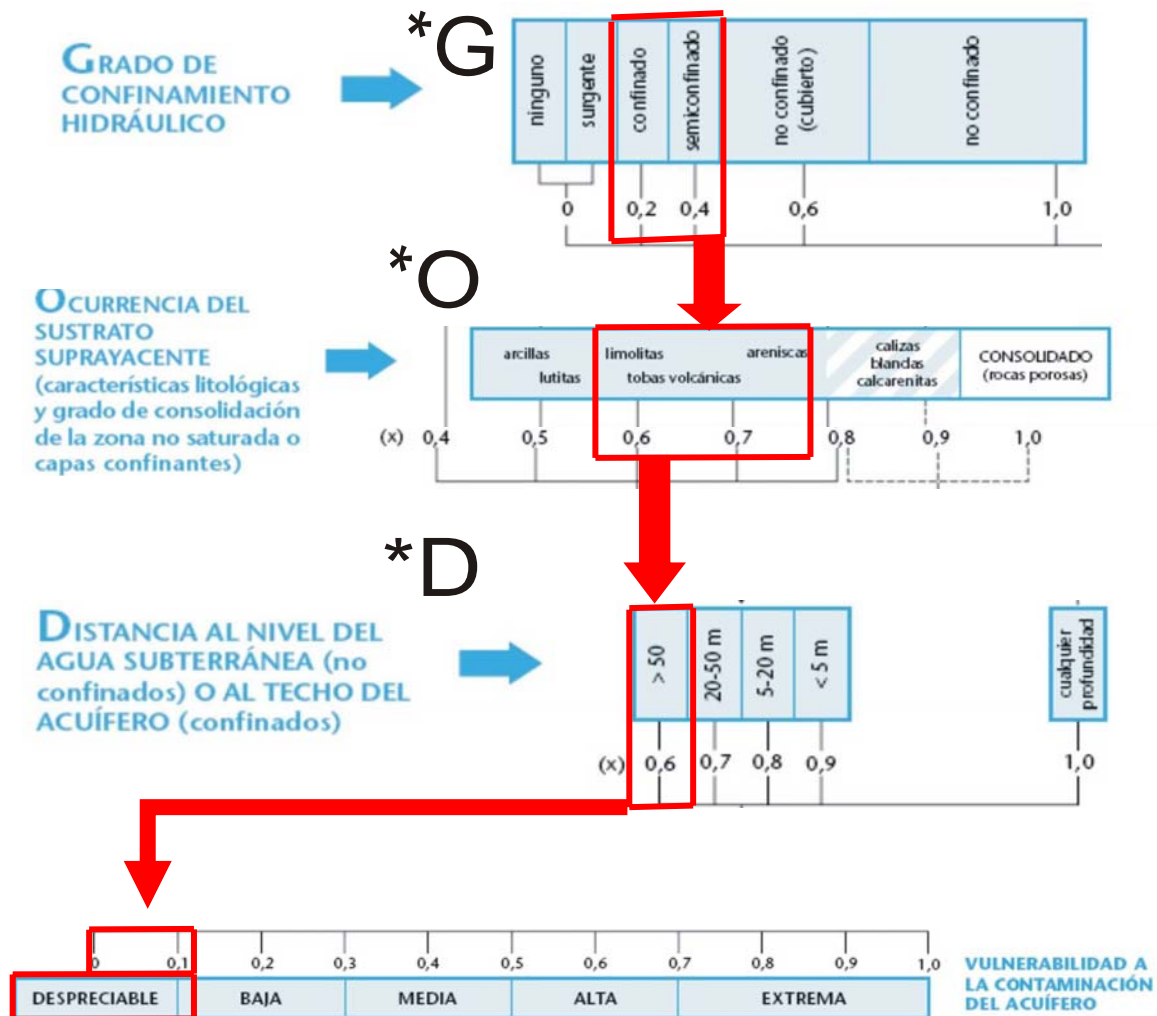


Figura 4.19. Diagrama esquemático los valores de “G”, “O” y “D” obtenidos de acuerdo a las condiciones del sitio de estudio, para el cálculo de la vulnerabilidad del acuífero.

6. Validación de los resultados del cálculo de la vulnerabilidad del acuífero en el área de estudio

6.1 Pruebas de permeabilidad *in situ*

a) Descripción del corte litológico

Con el fin de valorar la posibilidad de infiltración de agua de lluvia en la zona de estudio se determinó la permeabilidad “in situ” del material geológico de la zona vadosa (zona no saturada) en 10 perforaciones de 32 m de profundidad (Fig. 4.19).

Durante la perforación no se encontró ningún cuerpo de agua subterránea hasta la profundidad estudiada (32 m), lo que permite confirmar, que en el predio del complejo metalúrgico, objeto de estudio, no existe el acuífero somero cuyo nivel estático ha sido reportado entre 5.0 y 30.0 m.

Asimismo, es importante destacar que durante la perforación no se registraron pérdidas de agua y la presión del sistema hidráulico de la máquina perforadora se mantuvo constante, lo que indica que no se encontraron fracturas abiertas o fallas en el sitio.

En todos los barrenos perforados (barrenos 1 a 10) se encontró una capa superficial de material intemperizado de poco espesor (0.65 – 1.0 m) (Tabla 4.11); y después de esta delgada capa, la litología está constituida por el conglomerado Halcones compacto hasta la profundidad perforada de 32 m.

Solamente en la perforación del barreno 7, la litología es diferente a las otras 9 perforaciones. De 0 hasta 1.70 m se encontró material arenoso; de 1.70 m 3.80 m el material perforado se clasifica como “tepetate”; de 3.8 a 7.25 m aparece el conglomerado pero poco compacto; y de 7.25 a 10 m se volvió a cortar “tepetate”. Después de los 10.0 m y hasta la profundidad perforada de 33 m se encontró el conglomerado Halcones compacto.

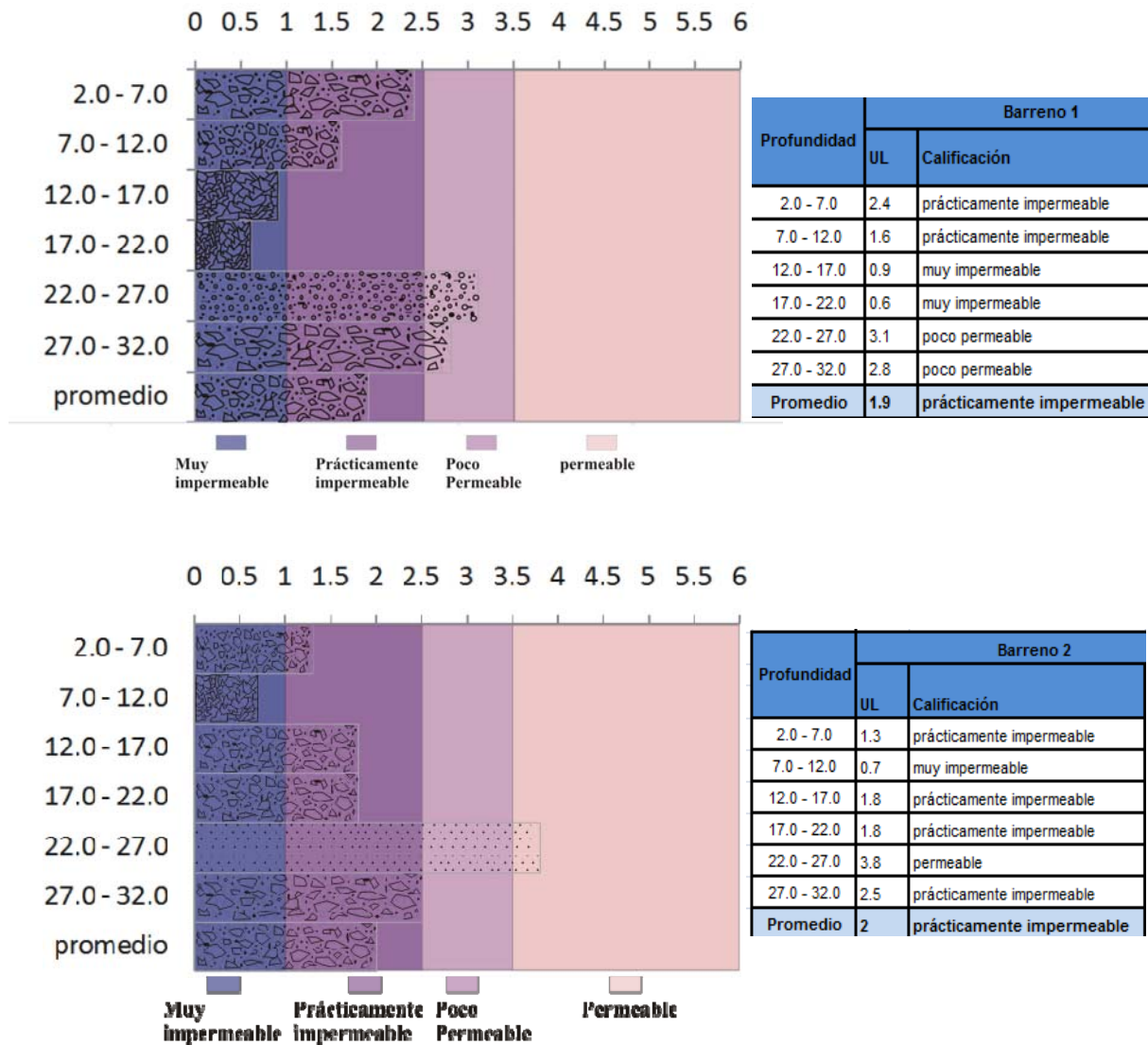
Perforación	Espesor de capa superficial intemperizada y deleznable, m
Barreno 1	0.60
Barreno 2	0.75
Barreno 3	0.7
Barreno 4	0.6
Barreno 5	0.65
Barreno 6	0.7
Barreno 7	10.0
Barreno 8	1
Barreno 9	0.8
Barreno 10	0.7

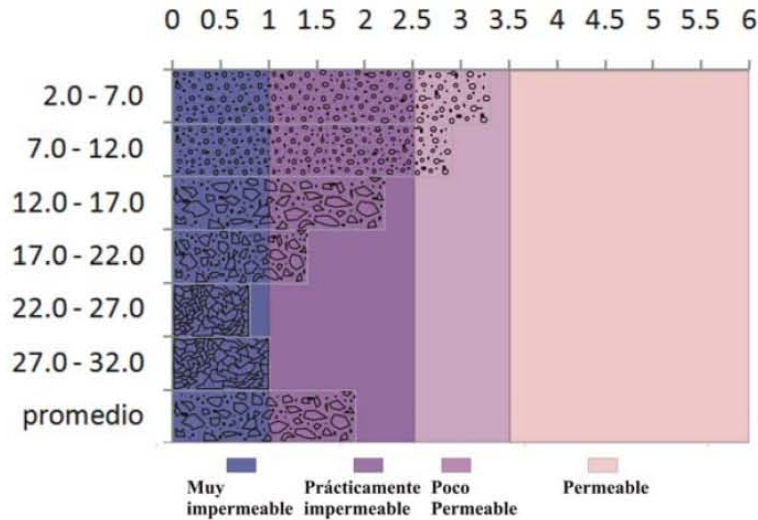
Tabla 4.11 Espesor de la capa superficial intemperizada y deleznable en las perforaciones realizadas para pruebas de permeabilidad

Resultados de las pruebas de permeabilidad

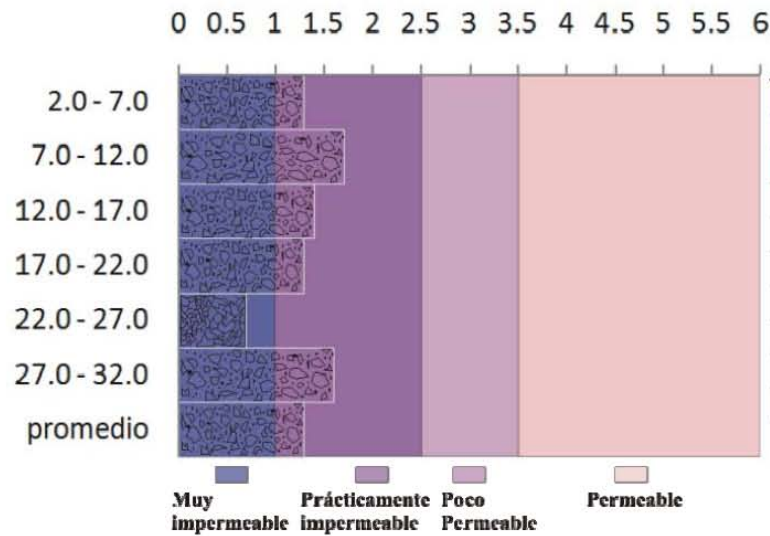
Para valorar la permeabilidad de la zona vadosa en el sitio de estudio se utilizaron las denominadas “pruebas Lugeón”.

Los resultados de permeabilidad se pueden observar en la Figura 4.20

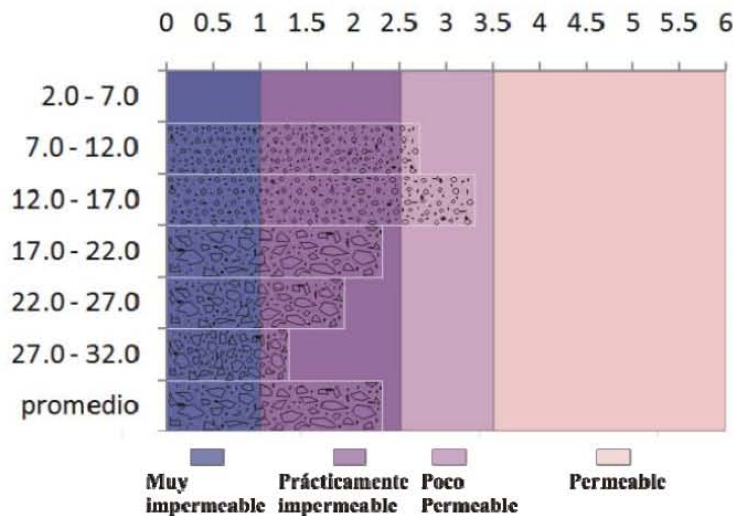




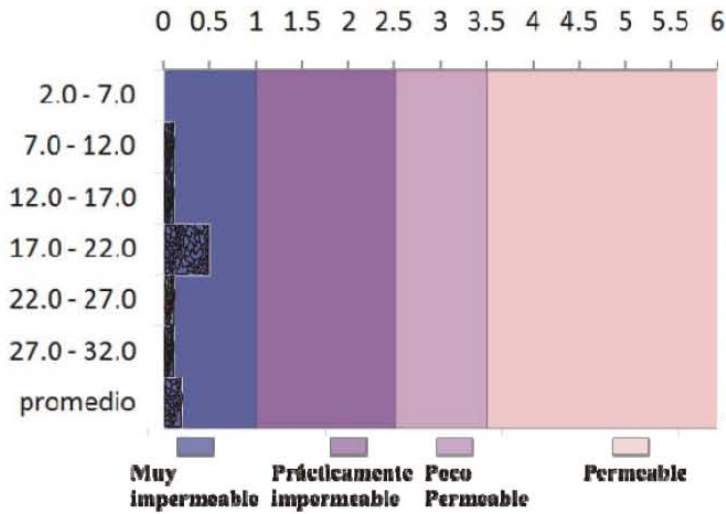
Barreno 3		
Profundidad	UL	Calificación
2.0 - 7.0	3.3	poco permeable
7.0 - 12.0	2.9	poco impermeable
12.0 - 17.0	2.2	prácticamente impermeable
17.0 - 22.0	1.4	prácticamente impermeable
22.0 - 27.0	0.8	muy impermeable
27.0 - 32.0	1	muy impermeable
Promedio	1.9	prácticamente impermeable



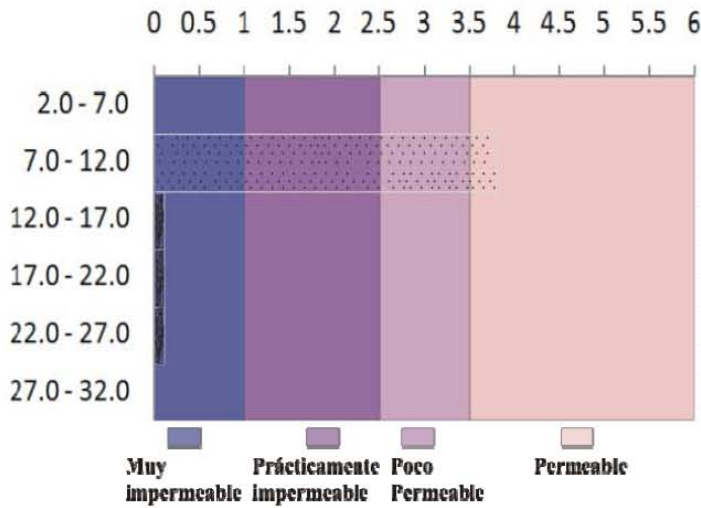
Barreno 4		
Profundidad	UL	Calificación
2.0 - 7.0	1.3	prácticamente impermeable
7.0 - 12.0	1.7	prácticamente impermeable
12.0 - 17.0	1.4	prácticamente impermeable
17.0 - 22.0	1.3	prácticamente impermeable
22.0 - 27.0	0.7	muy impermeable
27.0 - 32.0	1.6	prácticamente impermeable
Promedio	1.3	prácticamente impermeable



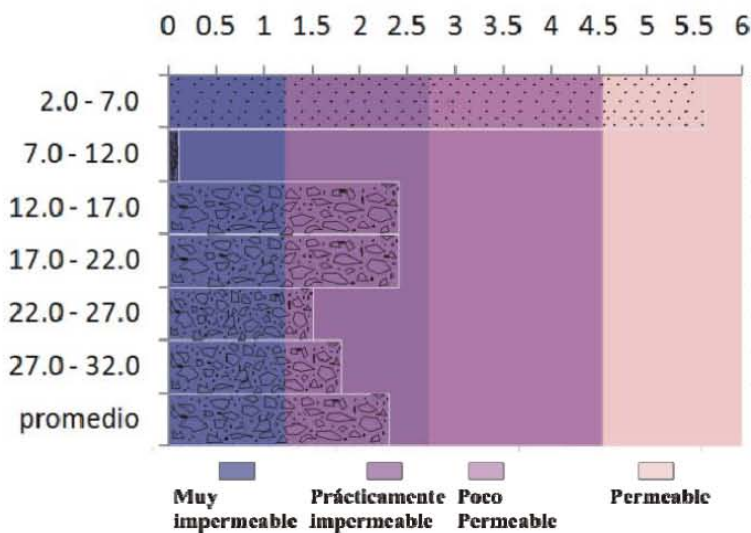
Barreno 5		
Profundidad	UL	Calificación
2.0 - 7.0	No se hizo la prueba por problemas	
7.0 - 12.0	2.7	poco permeable
12.0 - 17.0	3.3	poco permeable
17.0 - 22.0	2.3	prácticamente impermeable
22.0 - 27.0	1.9	prácticamente impermeable
27.0 - 32.0	1.3	prácticamente impermeable
Promedio	2.3	prácticamente impermeable



Barreno 6		
Profundidad	UL	Calificación
2.0 - 7.0		No se hizo la prueba por problemas t
7.0 - 12.0	0.1	muy impermeable
12.0 - 17.0	0.1	muy impermeable
17.0 - 22.0	0.5	muy impermeable
22.0 - 27.0	0.1	muy impermeable
27.0 - 32.0	0.1	muy impermeable
Promedio	0.2	muy impermeable



Barreno 7		
Profundidad	UL	Calificación
2.0 - 7.0		
7.0 - 13.0		Material granular permeable
13.0 - 18.0	3.8	permeable
18.0 - 23.0	0.1	muy impermeable
23.0 - 28.0	0.1	muy impermeable
28.0 - 33.0	0.1	muy impermeable
Promedio		



Barreno 8		
Profundidad	UL	Calificación
2.0 - 7.0	5.6	permeable
7.0 - 13.0	0.1	muy impermeable
13.0 - 18.0	2.4	prácticamente impermeable
18.0 - 23.0	2.4	prácticamente impermeable
23.0 - 28.0	1.5	prácticamente impermeable
28.0 - 33.0	1.8	prácticamente impermeable
Promedio	2.3	prácticamente impermeable

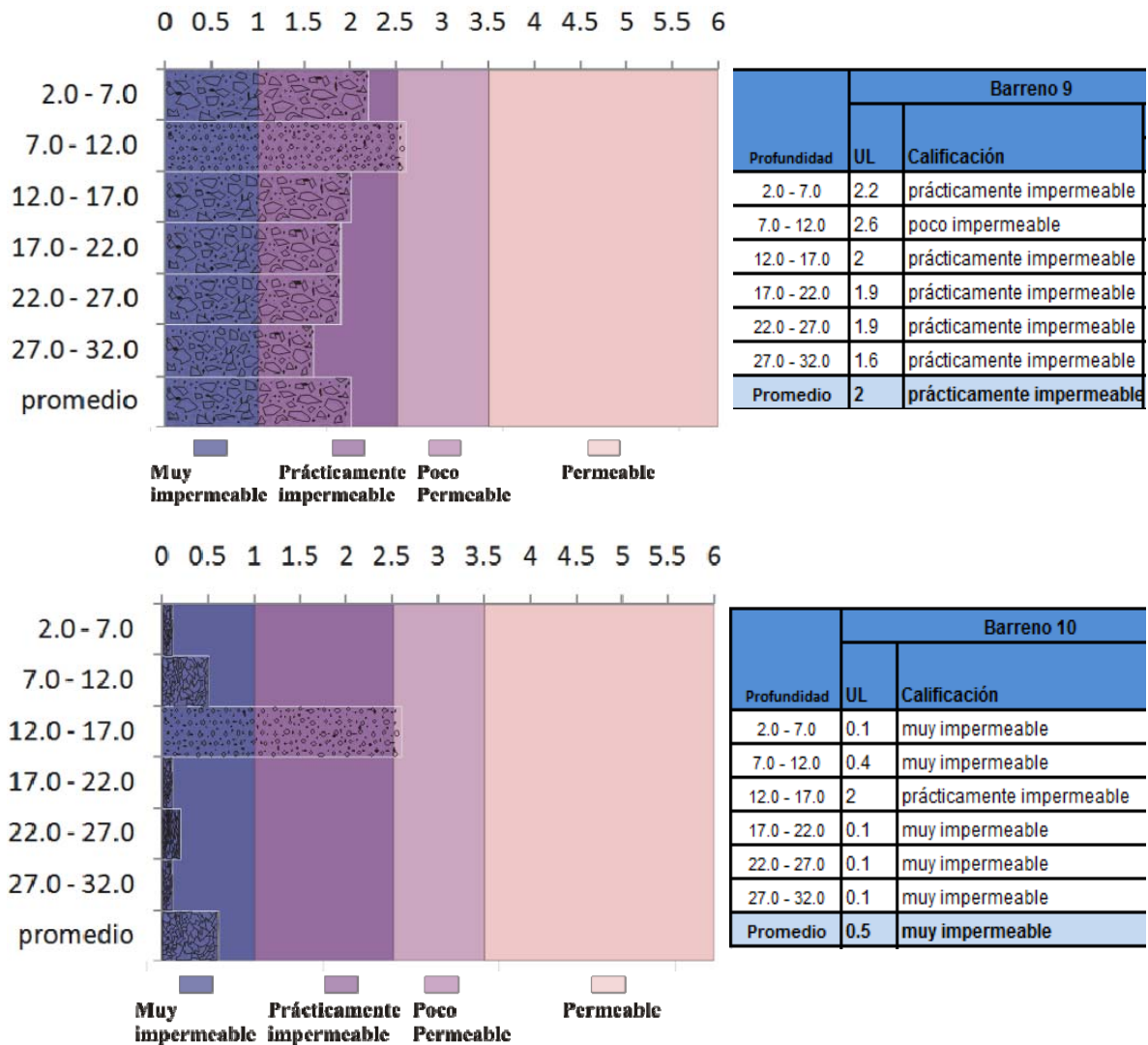


Figura 4.20. Valores de permeabilidad y su comportamiento en diferentes profundidades en las perforaciones de la zona de estudio.

Los valores promedio de la permeabilidad en unidades Lugeón (UL) indican que el conglomerado Halcones en la zona de estudio se caracteriza por ser desde “muy impermeable” hasta “prácticamente impermeable”, por lo tanto es prácticamente improbable que ocurra la contaminación del agua subterránea del acuífero de la zona de estudio por medio de la infiltración a través de la zona vadosa, lo que corrobora el hecho de que la vulnerabilidad del acuífero se valoró desde despreciable a baja.

Sin embargo, la parte superior de los perfiles de los barrenos 7 y 8, se compone de material permeable. En el barreno 7 en particular, desde la superficie hasta los 13.0 m el material es granular o deleznable y no fue posible realizar la prueba Lugeón, por lo que se asumió que este tramo (0.0 – 13.0 m) es permeable. En cuanto al barreno 8, la prueba indica que desde la superficie hasta los 7.0 m de profundidad el material es permeable.

Es importante recalcar que estos dos barrenos están ubicados en sitios al oriente de los terrenos del complejo metalúrgico, muy cerca del contacto litológico superficial entre el conglomerado Halcones y el depósito aluvial del Valle de San Luis Potosí.

Por el contrario, en los otros barrenos, en el conglomerado evaluado se obtuvieron valores de UL que permiten valorarlo como “impermeable” y “prácticamente impermeable” en todo el espesor estudiado (2.0 – 32.0 m).

En cuanto al carácter impermeable de la zona vadosa del sitio de estudio se observó que los barrenos 6 y 10 son los más impermeables, los barrenos 5 y 9 se califican como prácticamente impermeables al igual que los barrenos 1,2,3,4, que se localizan en la porción central del área de estudio (figura 4.21).

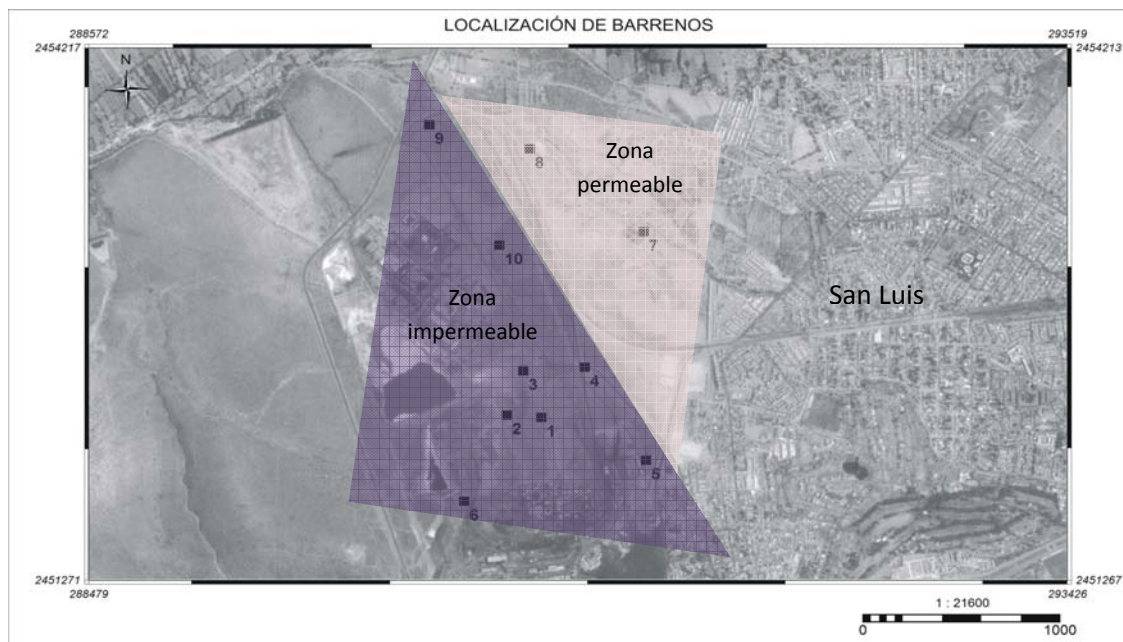


Figura 4.21. Localización de los barrenos y representación cualitativa de la permeabilidad.

Perfiles geoquímicos para valorar la migración vertical de elementos potencialmente tóxicos EPT a través de la zona vadosa

6.2.1 Concentración total de arsénico y plomo

Los resultados de las concentraciones totales de arsénico y plomo en las 827 muestras analizadas “in situ” en los núcleos de los 320 metros de perforación se presentan en el anexo 1 del presente trabajo.

Con el fin de determinar la afectación asociada a las actividades metalúrgicas y valorar la migración vertical de estos EPT, las concentraciones totales de arsénico y plomo, determinadas en los núcleos de estas perforaciones, se compararon con los valores de fondo reportados para la zona de estudio.

En la zona de estudio Aguirre R., 2007 obtuvo valores de fondo con muestras de suelo ubicados aproximadamente a 20 km. Al este y norte de la zona cercana al complejo metalúrgico. Las muestras se tomaron de acuerdo a la NOM 147.

Los valores reportados en las concentraciones naturales de fondo (valores de fondo) para el As entre 0.04 y 75.6 mg/kg y para el plomo entre 18.9 y 253 mg/kg de plomo (Aguirre-Rodríguez, 2007). Estos valores de fondo naturales para el As y Pb, en los suelos de la zona cercana al complejo metalúrgico se encuentran dentro del intervalo de concentraciones reportadas en la literatura internacional para suelos no contaminados.

A continuación en la se detalla el comportamiento de estos elementos potencialmente tóxicos en cada uno de los barrenos, figura 4.22. Para ilustrar este comportamiento gráficamente, se seleccionó al arsénico por ser un elemento tóxico de mayor movilidad que el plomo en estos ambientes (LAFQA, 2000).

Comportamiento de la concentración de As y Pb en cada uno de los barrenos perforados en el sitio de estudio

Barrenos 1 y 2

En la capa intemperizada, que comprende los primeros 0.6 m, en ambos barrenos, las concentraciones de As y Pb superaron el nivel de fondo reportado para el área. En el caso del barreno 1, las concentraciones totales de arsénico (As = 248 – 2887 mg/kg) y plomo (Pb = 137 – 3398 mg/kg), en la capa intemperizada del conglomerado son mayores que los valores de fondo de la zona de estudio. En el caso del barreno 2, en el conglomerado intemperizado, las concentraciones totales de arsénico varían entre 810 y 128 mg/kg, mientras que las de plomo varían entre 409 y 28 mg/kg. Para el plomo, solamente en la muestra superficial (0 - 0.2 m) la concentración total de plomo (409 mg/kg) es mayor que la de fondo.

Sin embargo, las concentraciones de estos contaminantes a partir de los 0.6 cm y hasta los 32 m de profundidad son menores a los valores de fondo (Cuadros insertos en la Figura 4.20).

Estos resultados indican que la afectación del conglomerado en el sitio de los barrenos 1 y 2 es producida por las actividades industriales y se restringe a los primeros 0.6 m a partir de la superficie y que los contaminantes no migran verticalmente a través del conglomerado compacto debido a que la baja permeabilidad de éste, que fue determinada “in situ” no permite la infiltración hacia los estratos inferiores del perfil.

Barrenos 3 y 4

Los resultados obtenidos en el barreno 3 indican que solamente en las dos primeras muestra (0 – 0.2 m y 0.2 – 0.4 m) las concentraciones totales de arsénico (815 y 189 mg/kg, respectivamente) son mayores que los valores de fondo. En el caso del plomo, solamente en la muestra superficial (0 - 0.2) la concentración total de plomo (766 mg/kg) es mayor que la de fondo (Pb = 253 mg/kg). A partir de estas profundidades y hasta el final

de la perforación (32 m), las concentraciones totales de arsénico y plomo son inferiores a los valores de fondo.

Los resultados obtenidos en el barreno 4 indican que solamente en las muestras del conglomerado intemperizado (0 – 0.60) las concentraciones totales de arsénico (1290 – 115 mg/kg) son mayores que los valores de fondo. En el caso del plomo, solamente en la muestra más superficial (0 - 0.2) la concentración total de plomo (871 mg/kg) es mayor que la de fondo. A partir de estas profundidades y hasta el final de la perforación (32 m), las concentraciones totales de arsénico y plomo son inferiores a los valores de fondo.

Estos resultados indican que la afectación del conglomerado en el B 3 y B4 se limita a los primeros 0.4 m y 0.6, respectivamente, a partir de la superficie y que los contaminantes no migran verticalmente. Es importante señalar que las concentraciones de arsénico y plomo son inferiores a los valores de fondo incluso dentro de la capa intemperizada del conglomerado, que se considera permeable. Por lo tanto el hecho de que los EPT tengan una movilidad limitada dentro de la capa intemperizada indica que pueden estar ocurriendo fenómenos químicos de atenuación que impiden la liberación EPT y la subsecuente movilidad hacia estratos inferiores.

Barrenos 5 y 6

En la parte superficial los barrenos 5 y 6, se superan los valores de fondo para arsénico y plomo. Sin embargo, esta tendencia se presenta sólo en los primeros 0.50 y 0.60 cm respectivamente, ya que a partir de estas profundidades y hasta el final de la perforación (32 m), las concentraciones totales de los contaminantes son inferiores a los valores de fondo.

En el caso del barreno 5, en el tramo de 0 – 0.65 m, las concentraciones totales de arsénico (855 – 526 mg/kg) son mayores que los valores de fondo. Sin embargo, para el plomo, en ninguna de las muestras se supera el valor de fondo (Pb = 253 mg/kg). En el caso del barreno 6, solamente en las muestras del conglomerado intemperizado (0 – 0.70 m) las concentraciones totales de arsénico (1107 – 563 mg/kg) son mayores que los valores de fondo. Sin embargo, para el plomo, con excepción de dos muestras (0.1 – 0.3 m y 0.3 – 0.5

m) las concentraciones totales en la capa de conglomerado intemperizado (1268 - 613) fueron mayores que el valor de fondo (Pb = 253 mg/kg).

Estos resultados indican que el conglomerado superficial e intemperizado en los barrenos 5 y 6 solamente está afectado con arsénico y parcialmente con plomo; pero se limita a los primeros 0.5 y 0.6 m a partir de la superficie y que este elemento no migra verticalmente a través del conglomerado compacto debido a la baja permeabilidad de éste, que fue determinada “in situ”, no permite la infiltración hacia los estratos inferiores del perfil.

Barrenos 7 y 8

En el barreno 7, desde la superficie hasta los 10 m de profundidad se encontró material arenoso, tepetate y conglomerado poco compacto, que se asume es material muy permeable. Las concentraciones de plomo en este material varían entre 186 y 30 mg/kg que son menores que los valores de fondo (Pb= 253 mg/kg), lo que indica que no hay afectación por plomo. Las mayores concentraciones (153 – 186 mg/kg) se determinaron en el tramo 0.9 – 1.3 m.

En el caso del arsénico, desde la superficie hasta los 0.9m, las concentraciones varían entre 54 y 12 mg/kg, que son menores que los valores de fondo. Sin embargo, de 0.9 m hasta 1.3 m las concentraciones de arsénico (100 – 113 mg/kg) son mayores que los valores de fondo, lo que parece indicar migración vertical del arsénico hasta los 0.9 – 1.3 m de profundidad, donde se ha retenido. La retención en este intervalo se demuestra porque en el tramo siguiente (1.4 - 1.7 m), las concentraciones de arsénico (As = 17 mg/kg) son menores a los valores de fondo.

Desde los 1.7 m y hasta la profundidad perforada (33 m) las concentraciones de arsénico y plomo son menores a los valores de fondo respectivos

A pesar de que desde la superficie y hasta 17.0 m el material encontrado en el barreno 7 es permeable (ver figura 4.19), la aparente migración del arsénico se restringe a un intervalo muy pequeño que se localiza entre 0.9 y 1.3 m de profundidad, lo que parece indicar la ocurrencia de procesos geoquímicos que impiden la movilidad del arsénico hacia estratos inferiores.

En el barreno B8, solamente en la muestra más superficial (0.0 – 0.2 m) del conglomerado intemperizado las concentraciones totales de arsénico (87 mg/kg) son ligeramente mayores que los valores de fondo (As= 75.6 mg/kg), mientras que, en el caso del plomo, en ninguna de las muestras del conglomerado intemperizado se supera el valor de fondo (Pb= 253 mg/kg).

Asimismo, en el conglomerado compacto, a partir de 1.0 m y hasta el final de la perforación (32 m), las concentraciones totales de arsénico y plomo son inferiores a los valores de fondo.

Estos resultados indican que, prácticamente, en el sitio del barreno 8 no hay afectación por la presencia de arsénico y plomo.

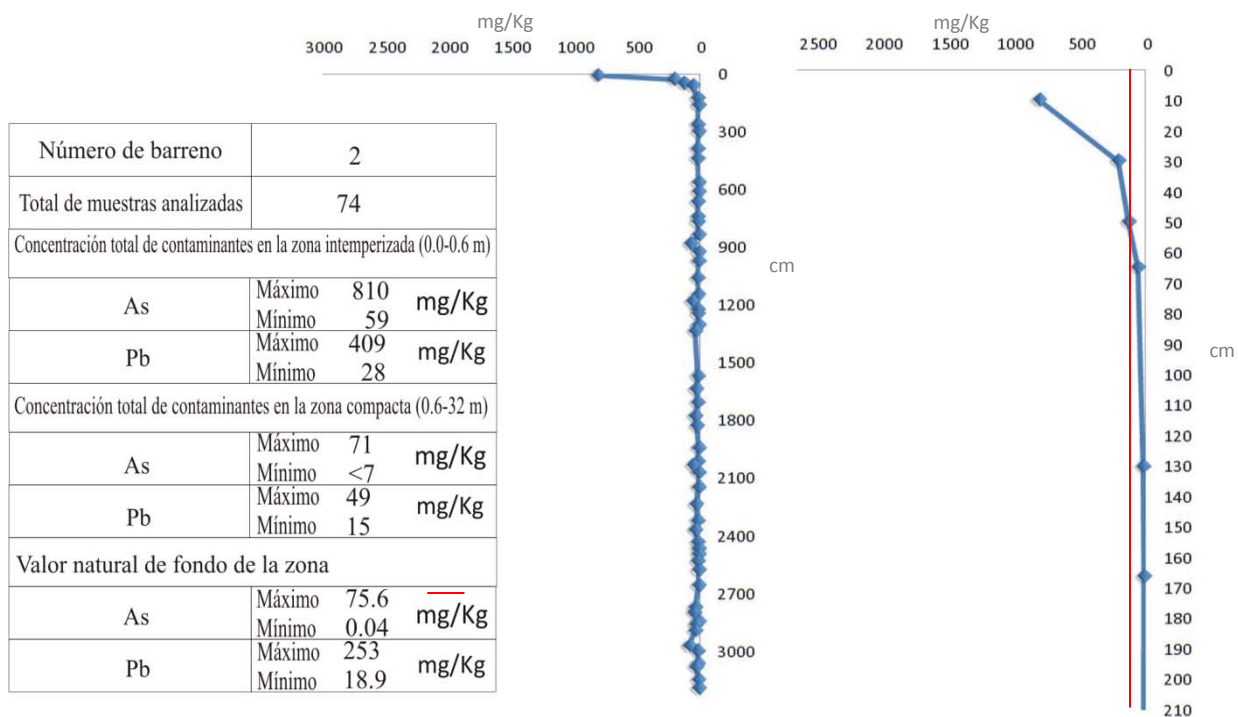
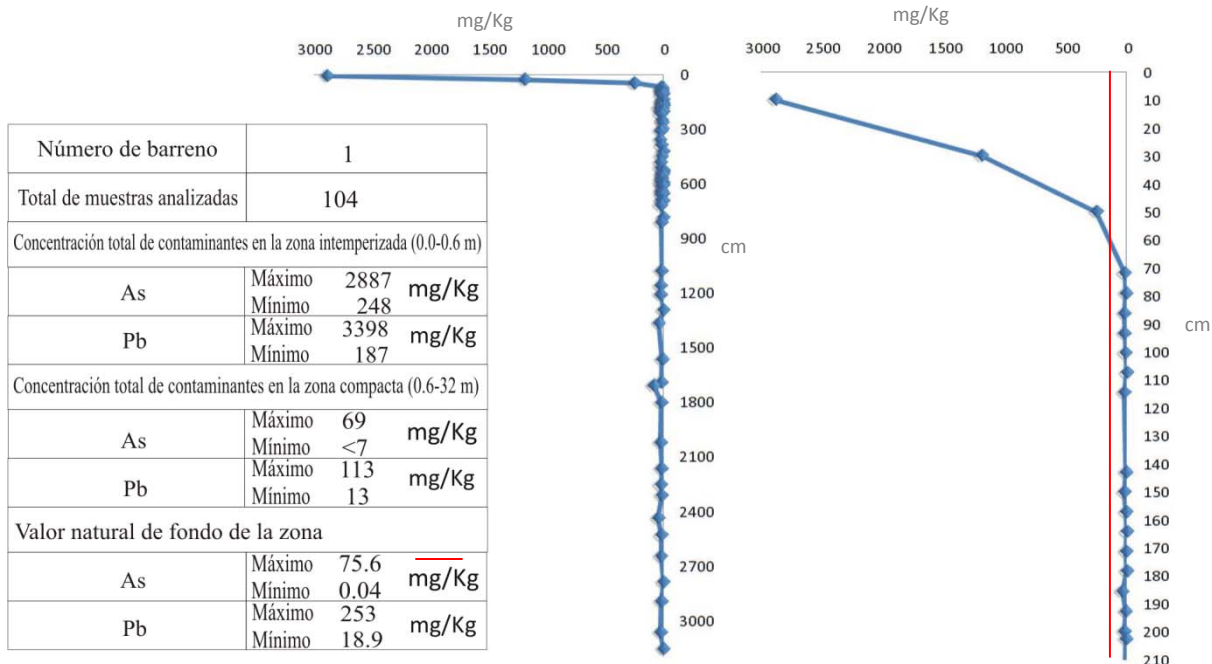
Barrenos 9 y 10

En el barreno 9, solamente en la muestra más superficial (0.0 – 0.1 m) del conglomerado intemperizado las concentraciones totales de arsénico (100 mg/kg) son ligeramente mayores que los valores de fondo (As= 75.6 mg/kg); mientras que, en el caso del plomo, en ninguna de las muestras del conglomerado intemperizado se supera el valor de fondo (Pb= 253 mg/kg).

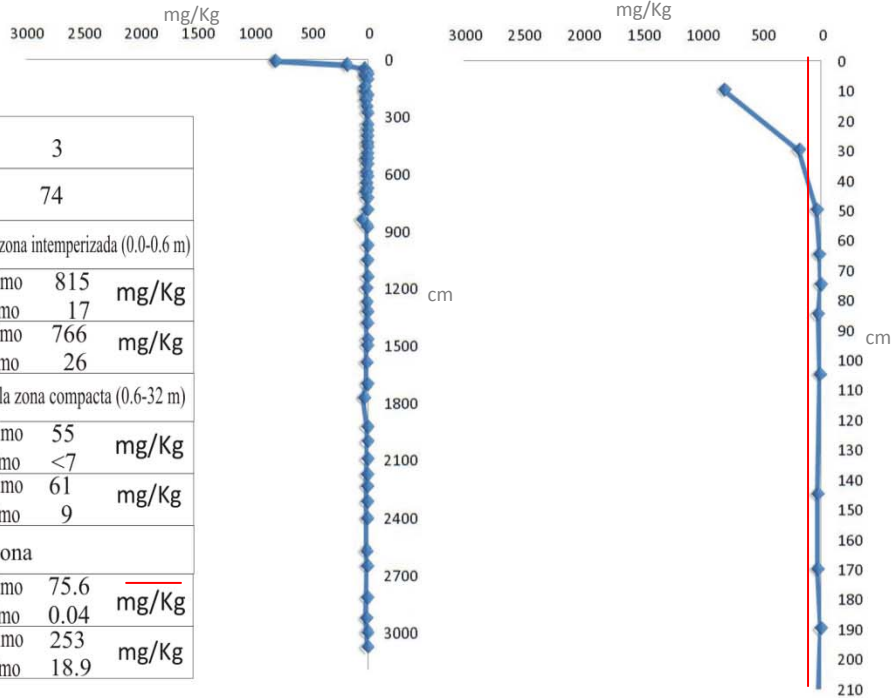
Asimismo, en el conglomerado compacto, a partir de 0.8 m y hasta el final de la perforación (32 m), las concentraciones totales de arsénico y plomo son inferiores a los valores de fondo.

En el barreno 10, en ninguna de las muestras del conglomerado intemperizado y compacto se supera el valor de fondo de arsénico y plomo.

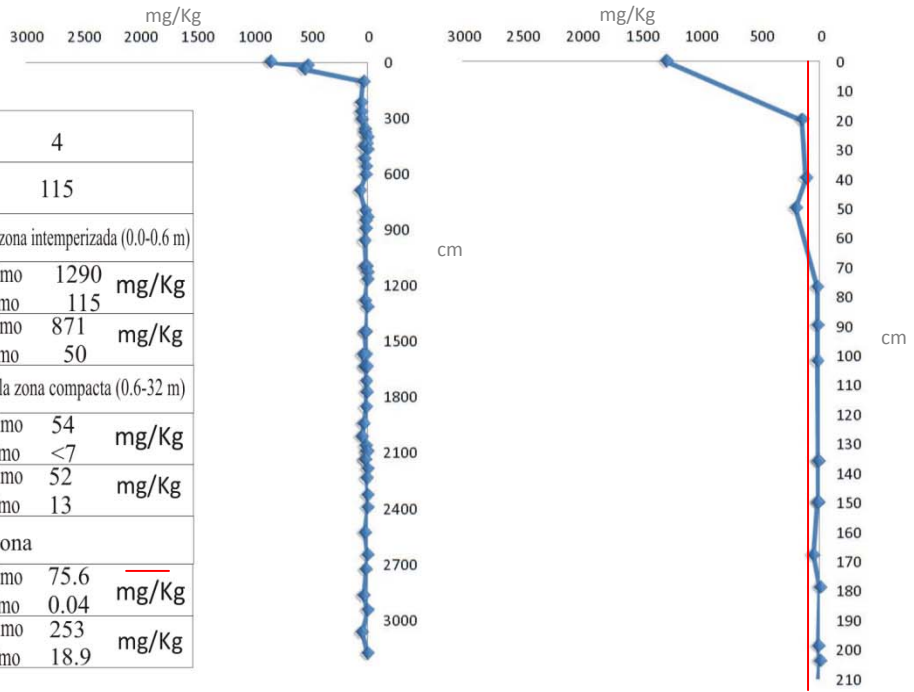
Estos resultados indican que, prácticamente, en el sitio del barreno 9 y 10, al igual que en el sitio de barreno 8, no hay afectación por la presencia de arsénico y plomo.



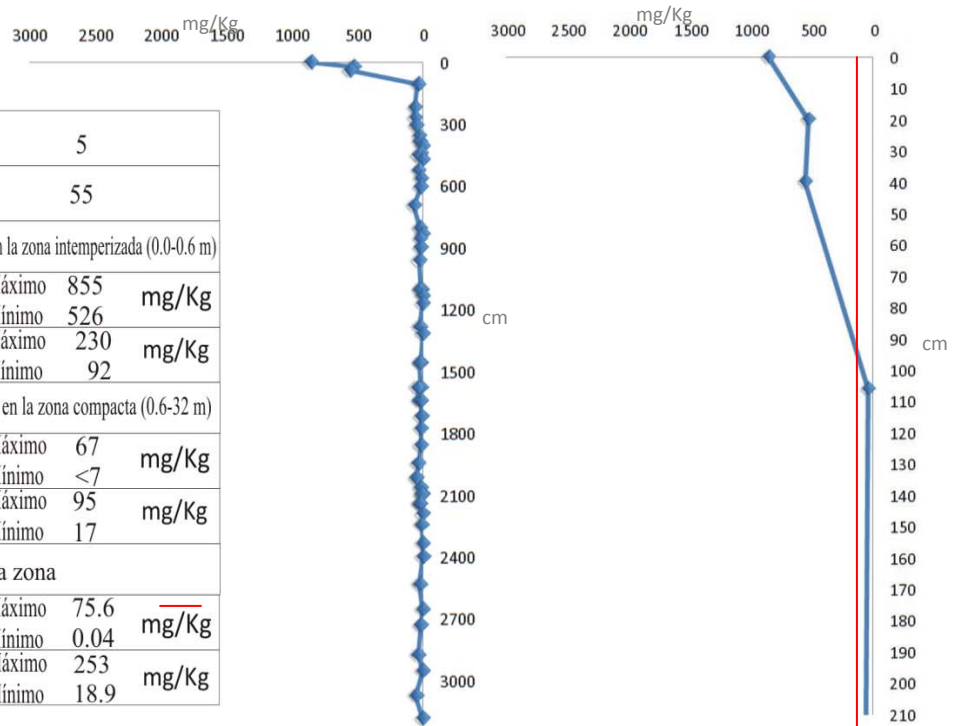
Número de barreno	3	
Total de muestras analizadas	74	
Concentración total de contaminantes en la zona intemperizada (0,0-0,6 m)		
As	Máximo 815 Mínimo 17	mg/Kg
Pb	Máximo 766 Mínimo 26	mg/Kg
Concentración total de contaminantes en la zona compacta (0,6-32 m)		
As	Máximo 55 Mínimo <7	mg/Kg
Pb	Máximo 61 Mínimo 9	mg/Kg
Valor natural de fondo de la zona		
As	Máximo 75.6 Mínimo 0.04	mg/Kg
Pb	Máximo 253 Mínimo 18.9	mg/Kg



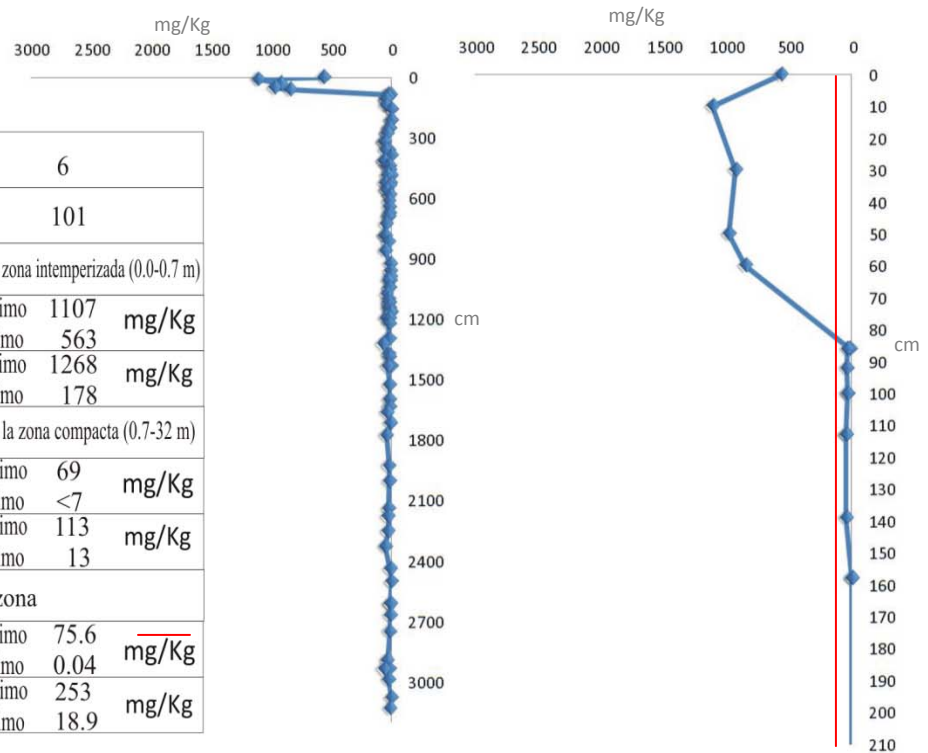
Número de barreno	4	
Total de muestras analizadas	115	
Concentración total de contaminantes en la zona intemperizada (0,0-0,6 m)		
As	Máximo 1290 Mínimo 115	mg/Kg
Pb	Máximo 871 Mínimo 50	mg/Kg
Concentración total de contaminantes en la zona compacta (0,6-32 m)		
As	Máximo 54 Mínimo <7	mg/Kg
Pb	Máximo 52 Mínimo 13	mg/Kg
Valor natural de fondo de la zona		
As	Máximo 75.6 Mínimo 0.04	mg/Kg
Pb	Máximo 253 Mínimo 18.9	mg/Kg

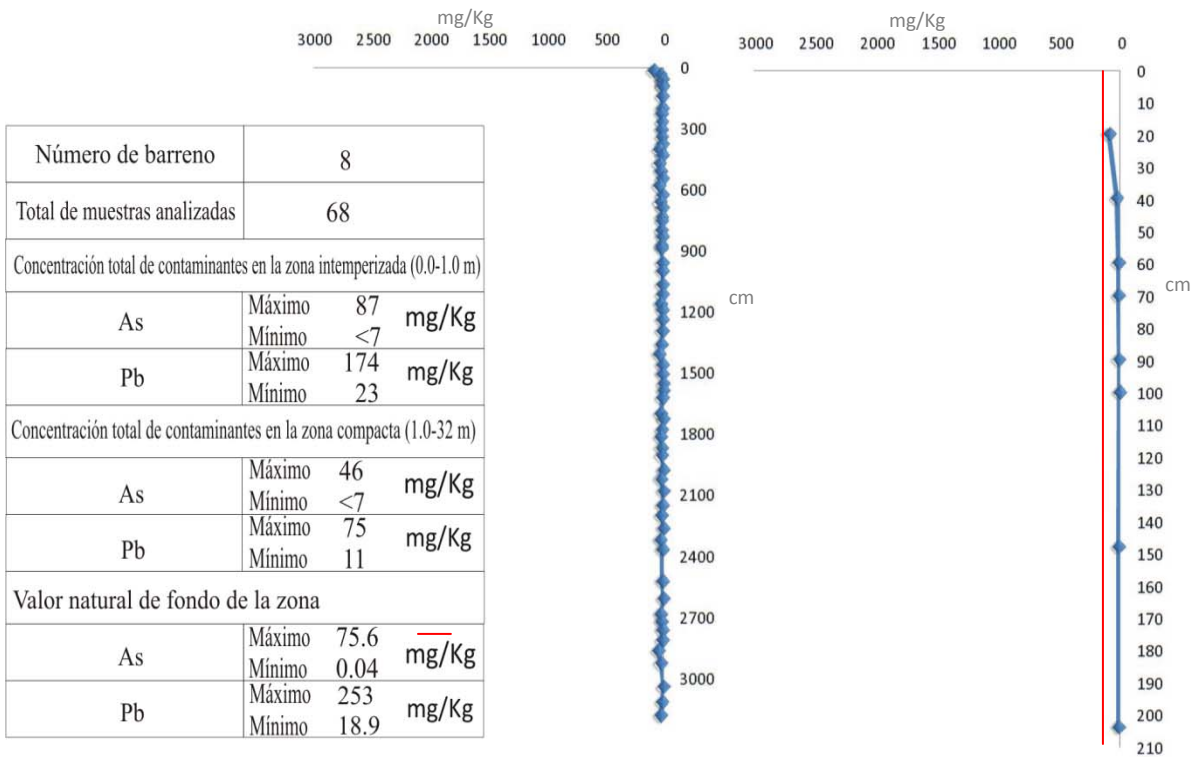
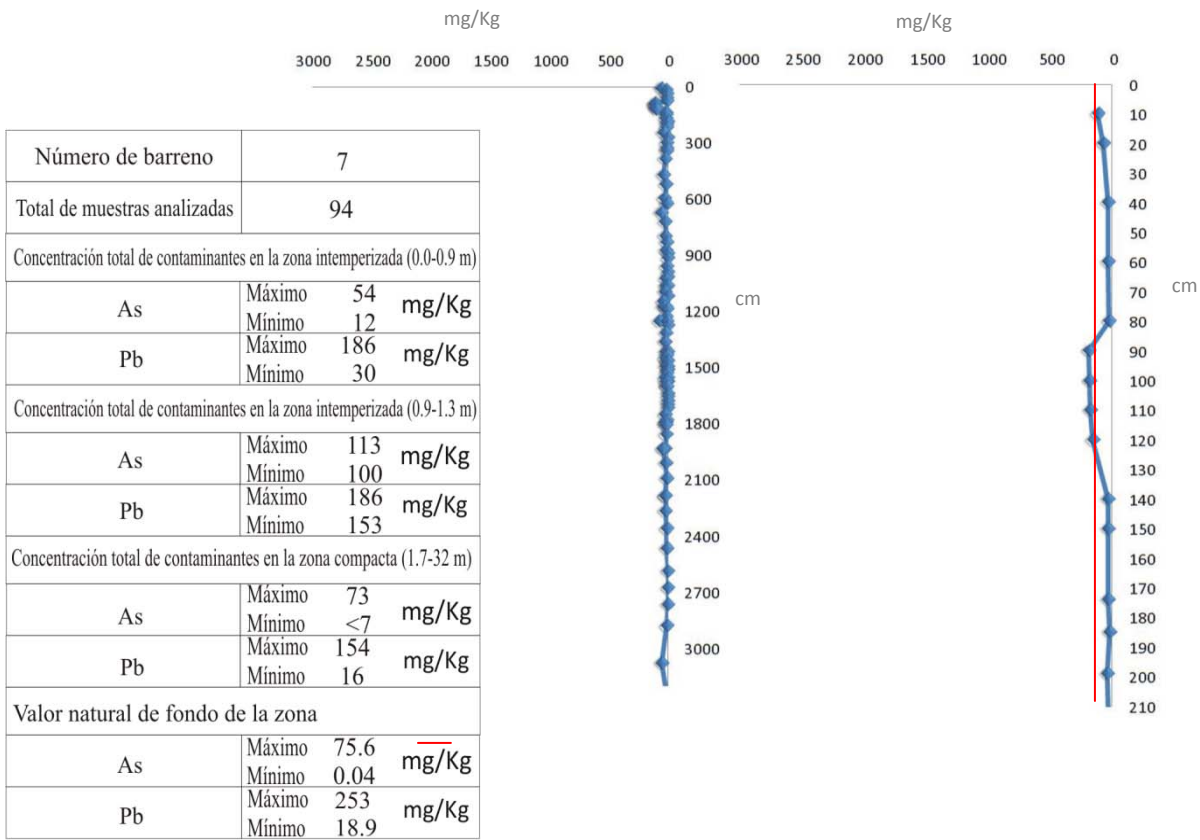


Número de barreno	5		
Total de muestras analizadas	55		
Concentración total de contaminantes en la zona intemperizada (0.0-0.6 m)			
As	Máximo	855	mg/Kg
	Mínimo	526	
Pb	Máximo	230	mg/Kg
	Mínimo	92	
Concentración total de contaminantes en la zona compacta (0.6-32 m)			
As	Máximo	67	mg/Kg
	Mínimo	<7	
Pb	Máximo	95	mg/Kg
	Mínimo	17	
Valor natural de fondo de la zona			
As	Máximo	75.6	mg/Kg
	Mínimo	0.04	
Pb	Máximo	253	mg/Kg
	Mínimo	18.9	



Número de barreno	6		
Total de muestras analizadas	101		
Concentración total de contaminantes en la zona intemperizada (0.0-0.7 m)			
As	Máximo	1107	mg/Kg
	Mínimo	563	
Pb	Máximo	1268	mg/Kg
	Mínimo	178	
Concentración total de contaminantes en la zona compacta (0.7-32 m)			
As	Máximo	69	mg/Kg
	Mínimo	<7	
Pb	Máximo	113	mg/Kg
	Mínimo	13	
Valor natural de fondo de la zona			
As	Máximo	75.6	mg/Kg
	Mínimo	0.04	
Pb	Máximo	253	mg/Kg
	Mínimo	18.9	





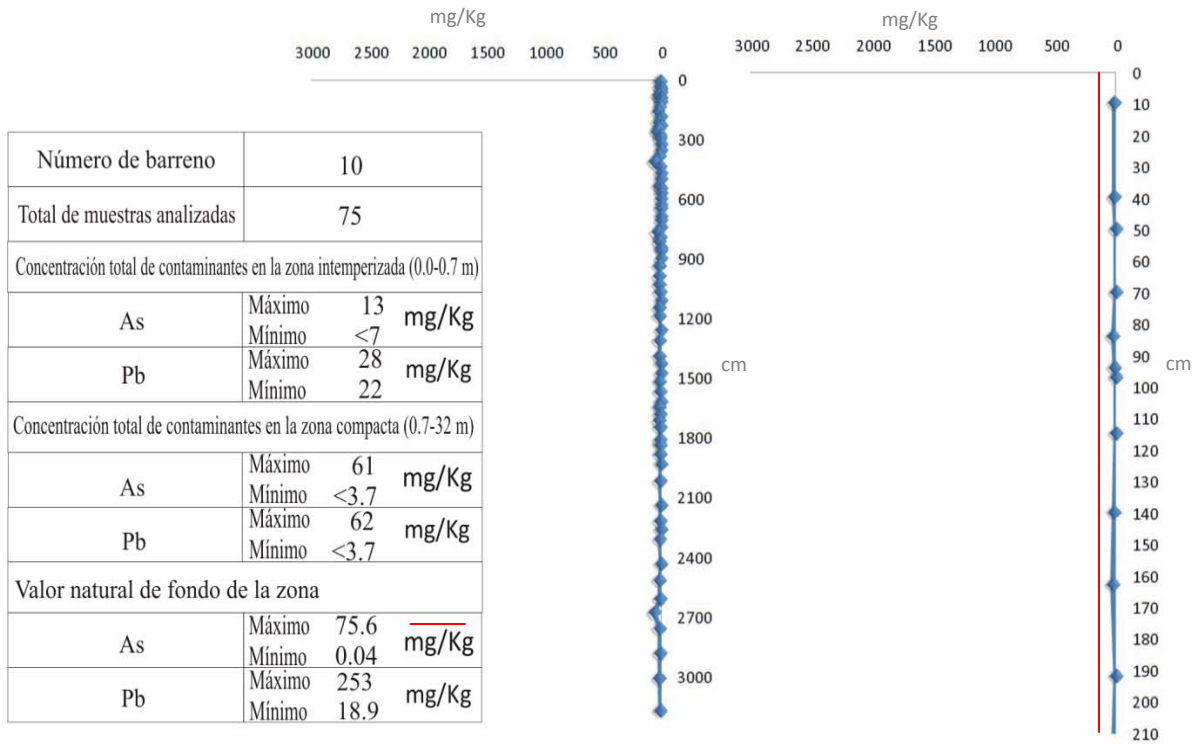
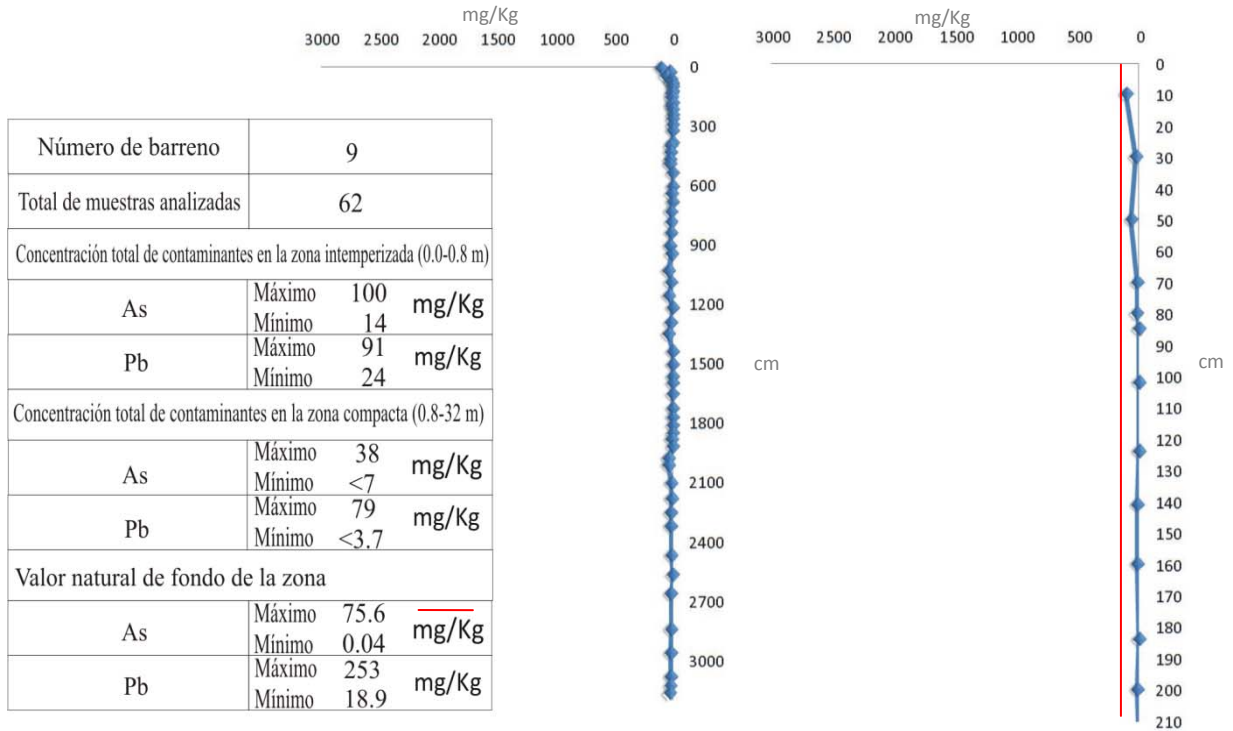


Figura 4.22. Resultados de la movilidad de EPT en la zona de estudio.

b) Distribución espacial de las concentraciones de As y Pb asociadas a la parte del conglomerado intemperizado

Los datos interpolados fueron únicamente los que se encuentran en la parte superficial hasta los 50 cm. Debido a que sólo se encontraron altas concentraciones a nivel superficial (figura 4.23).

En el área donde se realizaron los barrenos 1,2,3,4,5 y 6, (parte sur del área de estudio) la capa superficial del terreno y hasta la profundidad de unos 0.5 se determinaron las mayores concentraciones de arsénico y plomo ($As = 17 - 2887 \text{ mg/kg}$ y $Pb = 26-3398 \text{ mg/ kg}$); en cambio en el área de los barrenos 7, 8, 9 y 10 (parte norte del área de estudio), se determinaron las concentraciones más bajas de estos contaminantes ($As = <7-100 \text{ mg/kg}$ y $Pb = <3.7-174$)

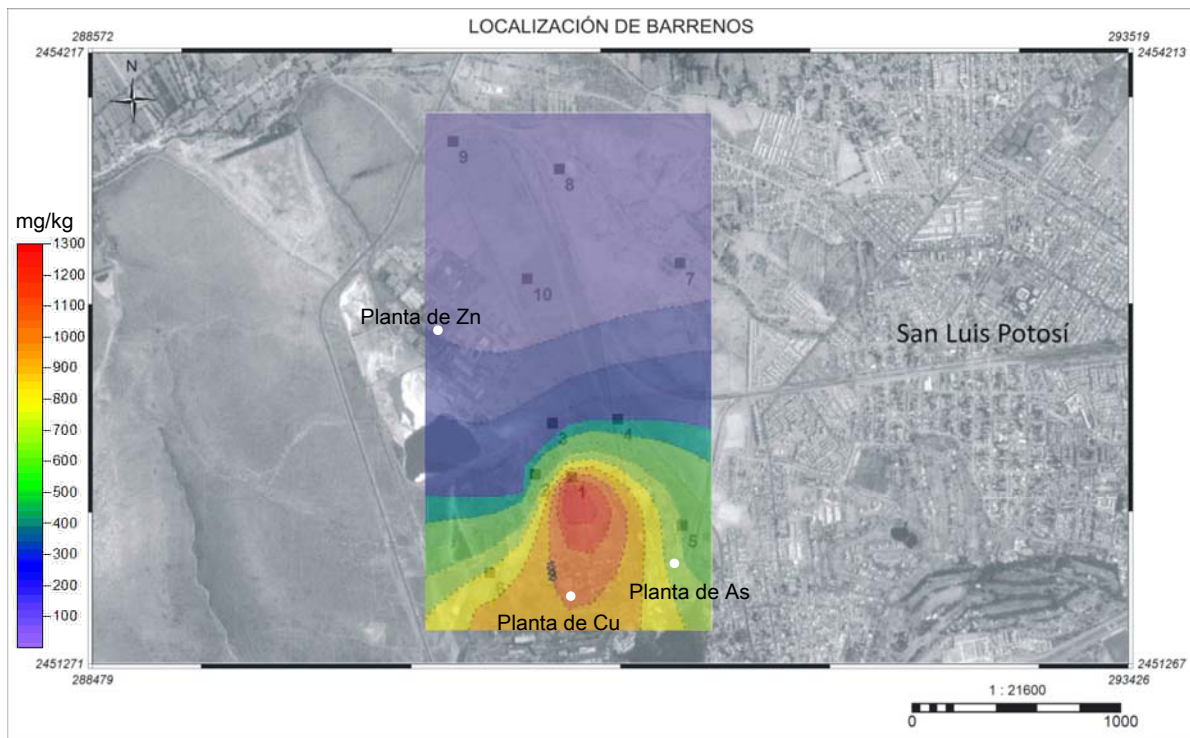


Figura 4.23. Mapa de concentraciones de As en la capa superficial (0.0 – 0.6 m) del área de estudio.

Considerando que desde el punto de vista de permeabilidad, la capa superior de los sitios de los barrenos 7 y 8, son permeables, aunque presenten las más bajas concentraciones de contaminantes no deben ser utilizadas para la construcción del confinamiento para el almacenamiento seguro de residuos del complejo metalúrgico.

En los sitios de los barrenos 9 y 10, las pruebas de permeabilidad indican que el material de la zona vadosa se clasifica de “impermeable” y “prácticamente impermeable” y las concentraciones de los contaminantes de interés son bajas e inferiores a los valores de fondo (no están afectados), pueden ser una opción viable para la construcción del confinamiento de residuos de la planta metalúrgica.

En los sitios de los barrenos 1, 2, 3, 4, 5 y 6, las pruebas de permeabilidad indican que el material de la zona vadosa se clasifica de “prácticamente impermeable” con excepción del barreno 6, donde el material es “impermeable”. Sin embargo, las altas concentraciones de los contaminantes de interés en la capa superficial del terreno, obliga a que esta capa superficial sea retirada para que la zona de los barrenos 1,2,3,4,5 y 6 pueda ser una opción viable para el confinamiento de los residuos del complejo metalúrgico. En el caso de que se decida que en esta zona no se pueda construir el confinamiento, se recomienda realizar trabajos de remediación en ella, ya que los vientos frecuentes que van hacia el este y noreste pueden dispersarlos en esas direcciones y poner en riesgo la salud de la población que se localiza, en esa dirección, a escasos 2.0 km. A pesar de que la tabla de máxima velocidad de viento nos indica que los vientos que arrastran partículas no van en dirección este sino suroeste.

6.2.2 Características del As y Pb. en la parte superior de conglomerado (suelo).

En las gráficas 8, 9 y 10 se observa que la movilidad del As y Pb en la parte superior del conglomerado (suelo) son inferiores a los valores de fondo naturales, aún cuando esta parte superior es una zona permeable, lo que es evidencia de la baja movilidad de los estos contaminantes.

Para inferir las causas de la baja movilidad del As y Pb se hicieron análisis, en las muestras de la parte superior del conglomerado intemperizado, por Microscopía Electrónica de Barrido acoplada con espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS).

Por MEB-EDS se identificaron partículas que contienen As y Pb (Figuras 4.24 y 4.25), lo cual sugiere que están ocurriendo fenómenos de atenuación natural que limitan su movilidad.

Uno de los mecanismos de retención de contaminantes muy reportado en la literatura especializada, es la precipitación de minerales insolubles y su sorción en superficies de algunos minerales. Algunos autores señalan que los minerales insolubles son el mejor mecanismo de retención que gobierna la liberación y movilidad de los elementos potencialmente tóxicos (Roussel et al., 2000, Gieré et al., 2003, Fukushi et al., 2003, Romero et al., 2008).

Asimismo, se reporta la sorción As y Pb y otros metales pesados en superficies de oxihidróxidos de hierro, los cuales son compuestos muy estables bajo las condiciones ambientales y no permiten la liberación de los elementos que han retenido vía sorción, (Bowel 1994, Lin, 1997, Foster et al., 1998, McGregor et al., 1998, Romero et al., 2007).

En la gráfica 4.24. y 4.25., se observan partículas que contienen hierro (Fe) y arsénico (As), y partículas que contienen Fe y plomo (Pb), respectivamente. Esto permite inferir que en el sitio de estudio puede estar ocurriendo la sorción de estos contaminantes en partículas de oxihidróxidos de fierro que limita la movilidad del As y Pb.

Asimismo se identificaron partículas que contienen azufre (S), Fe, Pb, y partículas de S, Fe, As, Pb (Figuras 4.26. y 4.27). La presencia de este tipo de partículas nos permite inferir que en el sitio de estudio también puede estar ocurriendo la precipitación de minerales secundarios insolubles, que podría explicar la baja movilidad del As y Pb en la zona de estudio.

Sin embargo, se requiere de estudios especializados para comprobar si están ocurriendo los fenómenos geoquímicos mencionados y la identificación respectiva de las fases sólidas que controlan la movilidad del As y Pb en la zona de estudio.

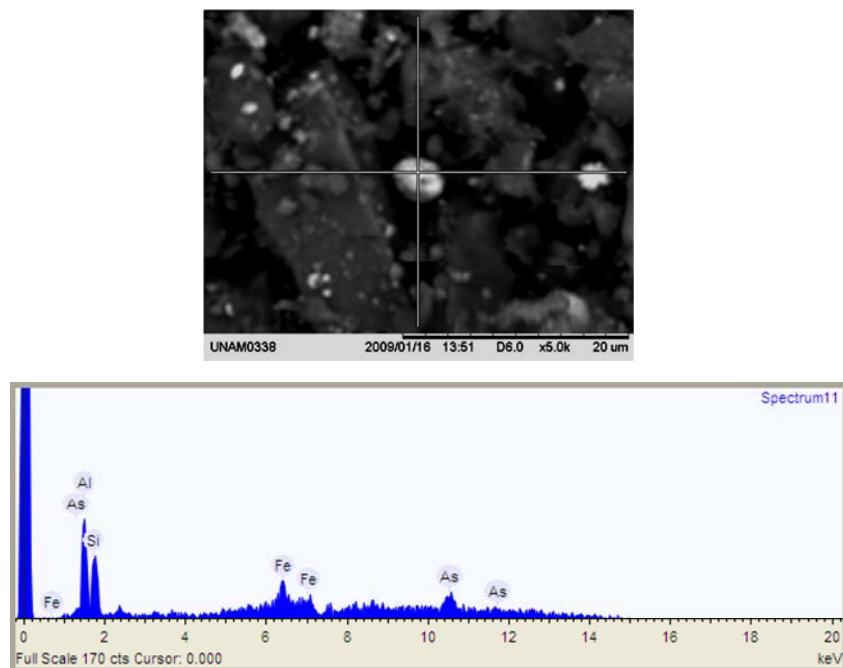


Figura 4.24 Microfotografías y microanálisis de partículas de Arsénico (As), Fierro (Fe).

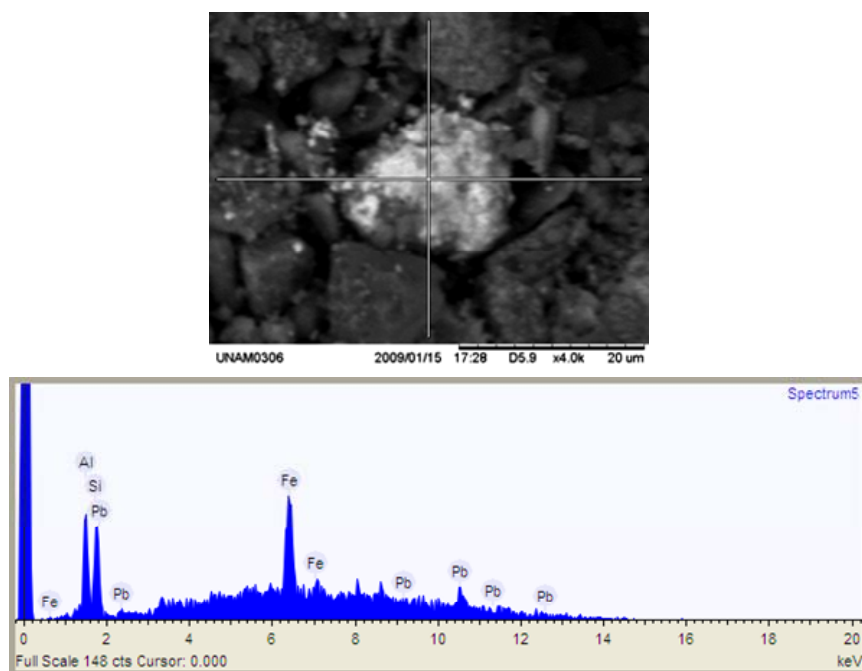


Figura 4.25 Microfotografías y microanálisis de partículas de plomo (Pb).

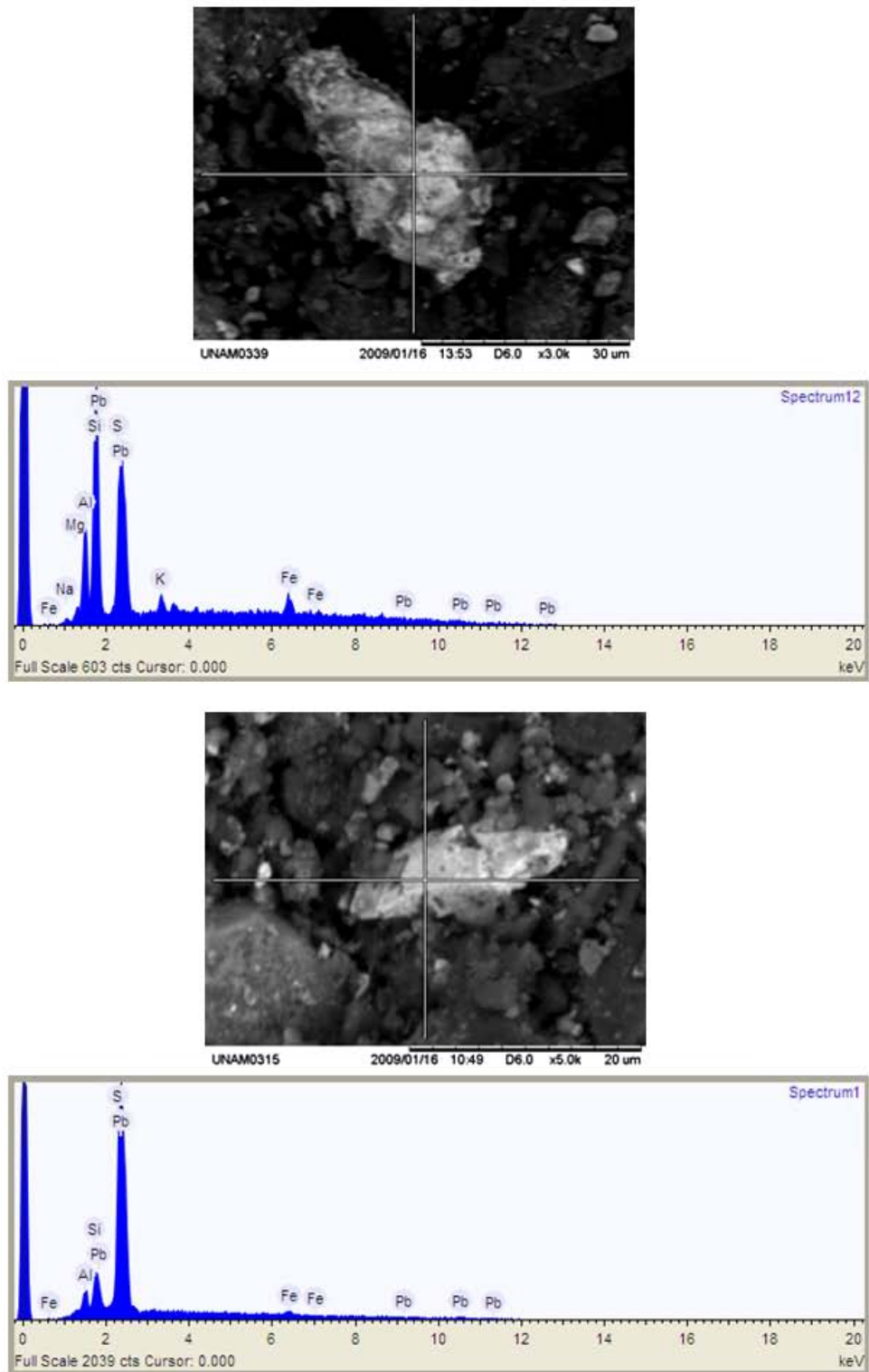


Figura 4.26. Microfotografías y microanálisis de partículas asociadas a minerales insolubles.

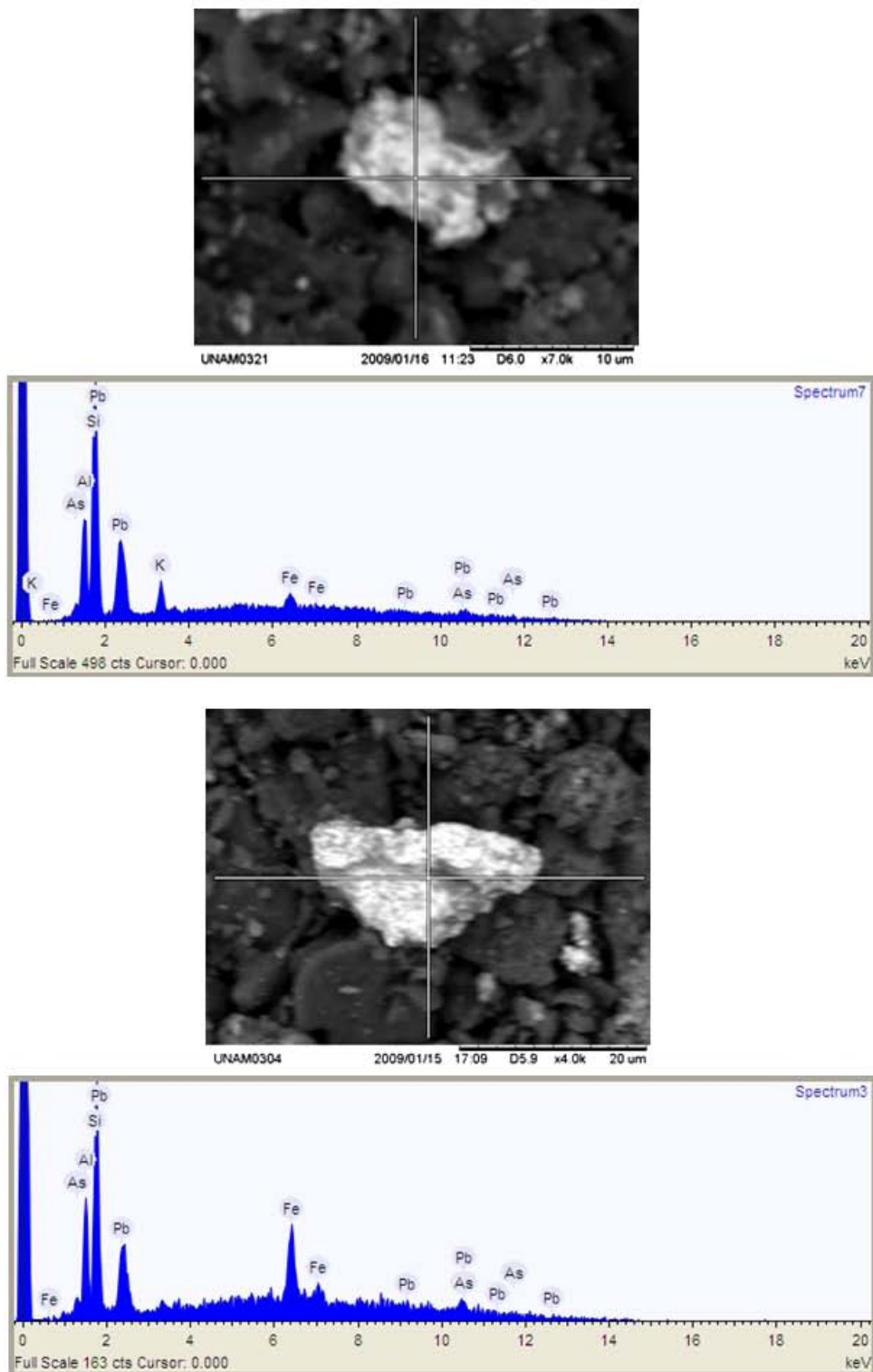


Figura 4.27 Microfotografías y microanálisis de partículas asociadas a minerales insolubles.

V. CONCLUSIONES.

Las principales conclusiones se describen a continuación:

1. PROPIEDADES FÍSICAS EVALUADAS EN EL SITIO DE ESTUDIO.

- 1.1 Las características climáticas del sitio de estudio resultan propicias para el almacenamiento ambientalmente seguro de residuos minero-metalúrgicos debido a que hay una evaporación de cinco órdenes más que la precipitación y la temperatura propicia que haya una mayor evaporación en comparación con la precipitación.

La infiltración de agua superficial o procesos de escorrentía en el sitio son poco probables. Sin embargo, deberán tomarse en cuenta las lluvias extraordinarias que registran valores de 5-23mm de lluvia, y que tienen frecuencia anual.

- 1.2 La tendencia general de los vientos es hacia el este y suroeste. De forma específica los vientos capaces de arrastrar partículas (elementos potencialmente tóxicos EPT) sólo se presentan hacia el suroeste, donde se encuentran las zonas despobladas. Sin embargo, será útil considerar la acción del viento dentro de las obras de ingeniería civil.

- 1.3 La geología de la zona se caracteriza por ser un conglomerado bien consolidado salvo en los primeros 0.6 m. donde el material está intemperizado. Es recomendable remover la capa intemperizada para que los residuos minero-metalúrgicos se dispongan dentro del conglomerado sano.

- 1.4 Los resultados hidrogeoquímicos del sitio clasificaron al agua como bicarbonatada sódica, característica principal de sistema de flujo regional. Sin embargo, los pozos ubicados en las cercanías con el valle de San Luis Potosí (al oriente de la zona de estudio) indican que hay una mezcla de aguas profundas y aguas someras.

2. VALORACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO.

- 2.1 La determinación de los valores G.O.D. indican que la vulnerabilidad del acuífero va de 0.168 a 0.072 (despreciable a baja). Por esta razón aún cuando se presente una infiltración de EPT, el acuífero no es vulnerable a ser contaminado.

3. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD “IN SITU”.

- 3.1 Las pruebas de permeabilidad indicaron que el conglomerado Halcones tiene un valor que va de “muy impermeable” a “prácticamente impermeable”. Lo que confirma la valoración de la vulnerabilidad del acuífero por medio del método G.O.D.

3.2 Durante la prueba no se reportaron pérdidas de agua por lo que se infiere que no hay presencia de fallas o fracturas en el sitio.

3.3 Mediante las pruebas de permeabilidad pudo dividirse el sitio en dos partes. La parte oriental que contiene material más permeable, y comprende dos barrenos (7, 8) con material permeable a los 13 y 7 m, respectivamente. La parte occidental con material que se caracteriza por ser “muy impermeable” y “prácticamente impermeable”.

3.4 La zona oriente está muy cerca del contacto litológico entre el conglomerado Halcones y el material aluvial del valle de San Luis Potosí. Esto puede ser inferido por las pruebas de permeabilidad que reportan un material permeable no sólo en la parte superficial y por las pruebas geoquímicas que mostraron una mezcla de aguas profundas con aguas someras hacia el oriente.

4. VALORACIÓN DE LA MIGRACIÓN VERTICAL DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS (EPT).

4.1 La mayor movilidad de los EPT se localizó en la parte superficial (conglomerado intemperizado) del conglomerado. En otros sitios no hubo movilidad de EPT aún en las partes intemperizadas, esto indica la presencia de un fenómeno químico de atenuación que impide la liberación de EPT.

4.2 Por medio de la valoración de la migración vertical de EPT se establecieron dos zonas, de acuerdo a la concentración de contaminantes que se encontró en la parte superficial. La parte norte en donde se localiza una menor concentración de EPT y la parte sur con el mayor reporte de EPT en el suelo. La zona más viable es la parte norte y la remoción de la parte superficial del conglomerado intemperizado que contiene mayor cantidad de EPT, debe integrarse junto con los residuos minero-metalúrgicos en el confinamiento.

5. CARACTERÍSTICAS DEL AS Y PB. EN LA PARTE SUPERIOR DE CONGLOMERADO (SUELO).

5.1 Por medio del método MEB-EDS se encontraron partículas de oxihidróxidos de hierro (Fe-oxihidróxidos), As y Pb. Se infiere que las partículas de Fe retienen por vía sorción a los elementos de As y Pb, por ello hay poca movilidad de los contaminantes en el sitio de estudio.

5.2 El método MEB-EDS también identificó partículas de azufre (S), junto con las partículas de Fe, As, y Pb. Estas partículas pueden estar asociadas a minerales como la galena, anglesita y partículas de As-Pb (asociadas posiblemente a arseniatos de plomo) que son muy insolubles, por tanto retienen la liberación y controlan la movilidad de los EPT. Sin embargo, se deben hacer estudios a detalle para comprobar los supuestos establecidos en el presente trabajo.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre R., 2007, Valoración para la geodisponibilidad y bioaccesibilidad en suelos contaminados con elementos potencialmente tóxicos por la industria minero-metalúrgica, Tesis de maestría en Geología Ambiental, Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, 92 p.
- Banco Mundial/OMS/PNUMA., 1989, The safe disposal of hazardous wastes: the special needs and problems of developing countries, Vols. I-III, Documento Técnico del Banco Mundial N° 93, R. Washington, D.C. 132 p.
- Belmont R., 2007 Gestión de residuos peligrosos y subproductos, Taller sobre desarrollo de un inventario de sustancias químicas para México, Dirección De Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, SEMARNAT, 11 p.
- Buró Hidrogeológico, 2008, Estudio geofísico eléctrico de resistividad en terrenos propiedad de IMMSA, Mpio. San Luis Potosí. Informe Técnico, 43 p.
- Cardona, 2008, “*Diagnóstico geológico e hidrogeológico del acuífero de San Luis Potosí, reporte final*”, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Grupo Minera México en:
<http://ciep.ing.uaslp.mx/publicaciones/212009Pages%20Reporte%20final%20IMMSA>
- Cardona B., Carrillo R., 1998, *Situación hidrogeológica de las cuencas de San Luis Potosí, Aguascalientes, Hidalgo y Valle de México, como referencia conceptual del funcionamiento del agua subterránea en la región centro del país, Simposio Internacional de Aguas Subterráneas, León, Guanajuato, 69-83 p.*
- Cardona A., Carrillo J., 1995, “*Control equilibrio-solubilidad en la concentración de fluoruro en el agua subterránea del centro de México*”, en: *Memorias del V congreso Nacional de Geoquímica, Actas INAGEQ, Vol. 1 No.1, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Gto., 51-56 p.*

- Carrillo R., Armienta, M., 1989, “*Diferenciación de la contaminación inorgánica en las guas subterráneas del valle de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México*” en: Geofísica Internacional, Vol.28, No.4, 763-783 p.
- Carrizales L., et. al., 2006, Exposure to arsenic and lead of children living near a copper-smelter in San Luis Potosi, Mexico: Importance of soil contamination for exposure of children, Environmental Research, Vol. 101, Issue 1, 1-10 p.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1991, Gestión de residuos peligrosos y el programa regional del CEPIS, en: <http://www.bvsde.ops/oms.org/cdromrepi86/full-text/bvsacd/scan/hdt046.pdf>
- , 1997, (con apoyo técnico del gobierno alemán a través de la Agencia de Cooperación Técnica, GTZ), “*Guía para la definición y clasificación de residuos peligrosos*”, en: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/gtz/defclarp/resanex2.html>
- Comisión de Comunidades Europeas (CCE), 2002, Hacia una estrategia temática para la protección del suelo, en www.europarl.eu.in
- Comisión Nacional del Agua CNA, 2002, Determinación de la disponibilidad del acuífero de San Luis Potosí, Estado de San Luis Potosí, 27 p.
- CONAGUA, 2005, *Estudio geotécnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 “San Luis Potosí” en el estado de San Luis Potosí, COTAS, Acuífero del Valle de SLP, A. C., 75 p.*
- Custodio E., Ramón M., 1976, “*Exploración de aguas subterráneas*”, en: Hidrología Subterránea, Ediciones Omega, Barcelona, España, 1435-1445 p.
- D. La Grega, L. Buckingham, C. Evans Jeffrey, McGraw-Hill , 1996, Gestión de residuos tóxicos, traducido de Hazardous waste management, México.
- Davis et. al., 1993 Micromineralogy of mine wastes in relation to lead bioavailability, Butte, Montana. Environ Sci Technol, No.27, 1415-1425 p.

- Díaz B. 1996, “*Los residuos peligrosos en México. Evaluación del riesgo para la salud*”, Instituto Nacional de Salud Pública de Cuernavaca, México, año/vol. 38, No. 004, 280-291 p. en: <http://redalyc.uaemex.mx>
- Diario Oficial de la Federación, (DOF), 2007, Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos, México, 42 p.
- Environmental Protection Agency (EPA), 1988, Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies Under CERCLA, Washington, D.C., 186 p.
- Ferrari L., López-Martínez M., Rosas-Elguera J., 2002, Ignimbrite flare up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: implications for the late subduction history of the Farallon plate, *Tectonics*, v.21, n. 4, 17-24 p.
- G. William Page., 1997, Contaminated sites and environmental cleanup, Academic Press, Oxford
- Gonzales de V., Ferrer M., Ortuño L., Oteo C., 2002, Ingeniería geológica Prentice Hall, 744 p.
- GM Grupo México, 2003, “Historia de IMMMSA”, en: <http://www.grupomexico.com/gm21000.html>
- Hernández S., Lugo H., Ortiz P., 2007, “*Morfoestructuras regionales*” en: Nuevo Atlas Nacional de México, clave NA III 1, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Ciudad Universitaria, México.
- Lacstusu R., 1998, Appraisinsg levels of soil contamination by pollution with heavy metals. European soil bureau, Research report No. 4, , en http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ES_DB_Archive/eusoilsdocs/esbrr/n04_landinformation-systems/5_7.doc, 393-399 p.
- Landín L., 2006, Parámetros fisicoquímicos y concentración de flúor y arsénico en el agua de los pozos de la Ciudad de San Luis Potosí y zona conurbada. Alternativa de tratamiento: adsorción de flúor y arsénico en la interfase Al₂O₃ activada, solución acuosa. Tesis de maestría, Posgrado Multidisciplinario en Ciencias Ambientales, UASLP.

- LAFQA, UNAM. 2003, Diagnóstico Ambiental de la Planta de Cobre, San Luis Potosí: Caracterización geoquímica de suelo y subsuelo, Calidad de aguas subterráneas y evaluación del riesgo a la salud en la Zona Habitacional Morales.
- Maderey R., Torres R., 2007, “*Escurrimiento medio anual*” en: Nuevo Atlas Nacional de México, clave NA VII 2, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Ciudad Universitaria, México.
- 2007, “*Evapotranspiración real*” en: Nuevo Atlas Nacional de México, clave NA VII 4, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Ciudad Universitaria, México.
- MacDonald, J.A. 1997, Hard Times for Innovative Cleanup Technology, Environmental Science and Technology. Vol.31. No. 12, 560-563 p.
- McDowell F., Keizer R., 1977, Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental, México: Geol. Soc. America Bull., v.88, 1479-1487 p.
- Marmo I., 2003, Heavy metals in the context of EU policies on soil and waste, European Commission, DG Environmental, en: www.eu-ropa.eu.int
- Martínez, S., et. al. 2009, Socio-economic development in arid zones: the influence of water availability in the San Luis Potosí Basin, México. In Arid Environments. Edotors: Antonio Fernández-Bernal
- Medellín M., 2001, “*IMMSA: una larga historia*”, diario de San Luis, sección ideas, pág. 4, en: <http://ambiental.uaslp.mx/docs/PMM'ap010-906.PDF>
- Mejía J., Díaz B., Calderón J., Ríos C., Jiménez C., 1997, “*Effects of lead-Arsenic Combined Exposure on Central Monoaminergic Systems*”, Neurotoxicology and Teratology, Vol. 19, No. 6, Elsevier Science, USA, 489-497 p.

- Ministerio de Desarrollo Económico Vicemisterio de Minería y Metalurgia Unidad Sectorial de Medio Ambiente, 2001, “*Reglamento ambiental para actividades mineras*” en: Guía Ambiental de Presas y Colas, Bolivia, 132 p.
- Naciones Unidas, 1995, “*Recomendaciones sobre el transporte de mercaderías peligrosas*”, 9ª ed. revisada. Nueva York y Ginebra, en:
<http://web.worldbank.org/external/projects/main?pagePK=64817132&piPK=51523504&theSitePK>
- Nieto S., Alaniz A., Camprubí C., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica, Volumen conmemorativo del centenario, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVII Número 3, 285-318 p.
- Olexa T., Leviten A., Samek K., 2003, “*Manual de Reglamento de Desechos Sólidos Peligrosos en Florida: Acta de Recuperación y Conservación de Recursos (ARCR)*”, Universidad de Florida, en: <http://edis.ifas.ufl.edu>
- Ortiz M., Cortinas N., Maffey G., 1987, Manejo de los desechos industriales peligrosos en México, Universo veintiuno, México, 56 p.
- Reporte geológico del área de estudio del Dr. José Sánchez Zavala, 2008, reporte técnico para el Instituto de Geología, UNAM, 3 p.
- Rodríguez Juan J., Irabien Ángel, 1997, Los residuos peligrosos, Caracterización, tratamiento y gestión. Manuales científico-técnicos. Editorial Síntesis, México, 97 p.
- Romero F., Armienta M., González G., 2007, The solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead zinc mine tailings impoundment, Taxco, México. Applied Geochemistry, 22, 109-127 p.
- Romero F., Villalobos M., Aguirre R., Gutiérrez M., 2008, Solid-phase control on lead bioaccessibility in smelter-impacted soils. Archives Environmental Contamination and Toxicology, No. 55, 566-575 p.

- SARH, Dirección general de Captaciones y conclusiones de agua, Subdirección de Estudios planes y programas, 1998, Estudio geofísico geohidrológico del Valle de San Luis Potosí, Instituto de Geofísica, 127p.
- SEDESOL-INE, 1994, “*Bases para una Política Nacional de Residuos Peligrosos. Secretaría de Desarrollo Social*” en: www.ine.gob.mx/descargas/políticas/pdf/html., México, 38 p.
- SEMARNAT, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004, Norma Oficial Mexicana NOM141-SEMARNAT-2003, Diario Oficial de la Federación (DOF), México, 53 p.
- 2008, “*Programa nacional Para La Prevención y la Gestión Integral de los Residuos*” en: <http://www.semarnat.gob.mx/quees-semarnat/programas/Documents/PNPGIRversion-consultabis.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2007, Carta geológico minera de Tepetate F14 A83, San Luis Potosí, Pachuca, Hgo.
- Tristán G., Labarthé H., 1978, Cartografía geológica hoja San Luis Potosi, folleto técnico No. 59, Universidad Nacional Autónoma de San Luis Potosí, 70 p.
- Tristán G., Labarthé H., 1979, Cartografía geológica, hoja Tepetate, S.L.P., folleto técnico No. 66, Universidad Nacional Autónoma de San Luis Potosí, 46 p.
- Vidal Z., 2005, “*Región 4. Norte*” en: Las regiones climáticas de México, I.2.2, Instituto de Geografía, UNAM, 67’86 p.
- , 2007, “*Climas: según sistema de clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García*” en: Nuevo Atlas Nacional de México, clave NA IV 13, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Ciudad Universitaria, México.
- Zamora Martínez, O., Romero, F.M., Lozano, R., 2008, Evaluación del desempeño de un analizador portátil de fluorescencia de rayos X en la determinación de la composición elemental de residuos mineros. GEOS, Vol. 28, 161–162 p.

Páginas en internet:

<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/6200.pdf> (Revisado en mayo de 2008)

<http://nzdl.sadl.uleth.ca/cgi-bin/library> (Revisado en junio de 2008).

<http://www.ambiental.net/temasclave/TC07SantandreuConflictosAmbientales.htm> (Revisado en junio 2008)

<http://www.semarnat.gob.mx/GESTIONAMBIENTAL/MATERIALESYACTIVIDADESRIESGO/SAS/Pages/residuos peligrosos.aspx> (Revisado en diciembre de 2008)

<http://www.cepis.ops/oms.org/eswww/fulltext/gtz/defclarp/resanex2./html> (Revisado en enero 2009)

http://www.uam.mx/cdi/childwatch2006/pdf/cubillastejeda_mx.pdf (Revisado en enero de 2009)

<http://www.semarnat.gob.mx/queessearnat/programas/Documents/PNPGIR/html>

<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/6200.pdf>

A N E X O.

VII. ANEXO 1.

Concentraciones totales de Arsénico y Plomo a profundidades de 10 cm-3200 cm.

BARRENO 1			BARRENO 2			BARRENO 3		
Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg	Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg	Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg
10	3399	2887	10	409	810	10	766	815
30	789	1189	30	62	209	30	38	190
50	187	248	50	36	128	50	58	36
5	40	16	65	28	59	65	26	17
5	31	16	130	27	13	75	16	7
10	20	8	130	27	22	85	23	19
10	18	13	167	16	10	85	34	39
15	8	13	167	31	14	105	29	14
15	25	22	264	41	25	105	36	7
20	25	14	264	35	10	145	61	25
20	39	19	304	18	10	145	44	35
25	19	8	391	30	26	170	27	17
25	25	17	391	29	10	170	38	45
30	15	8	445	24	17	190	22	7
35	45	17	445	44	14	190	36	7
55	17	10	568	22	10	213	24	13
55	38	8	618	21	10	213	37	35
60	32	18	668	37	15	246	19	12
60	40	18	747	38	15	246	29	18
65	16	8	774	23	14	281	21	7
65	28	14	840	38	10	342	20	7
70	27	8	885	40	71	342	44	7
70	30	8	930	26	12	373	17	7
75	8	10	975	20	10	373	19	8
75	36	9	1062	28	19	403	16	7
80	11	8	1150	24	13	403	32	16
80	38	8	1187	31	61	439	9	7
85	31	56	1226	28	21	439	15	10
85	35	13	1226	27	18	459	9	7
90	48	8	1252	24	15	495	19	10
90	28	17	1252	35	15	521	32	10
95	13	19	1310	29	10	520	34	19
97	10	8	1340	30	39	550	21	7
97	25	12	1417	22	9	550	37	12

10	30	22	1465	27	20	590	22	7
25	26	13	1573	28	14	590	38	24
25	39	14	1643	49	33	615	20	14
30	99	8	1710	35	16	615	43	7
30	20	12	1783	49	37	650	22	15
45	19	12	1833	46	25	680	31	7
45	28	13	1946	24	10	680	28	16
50	39	24	2017	16	14	698	35	22
70	43	27	2038	29	54	731	13	10
85	23	15	2075	33	10	731	34	7
85	35	16	2150	27	10	793	12	9
100	45	8	2150	33	10	793	20	11
110	36	14	2242	34	29	841	43	55
120	32	29	2327	43	19	878	11	9
120	37	18	2374	37	37	978	18	7
150	22	8	2436	39	18	1056	12	10
150	41	8	2470	40	11	1141	36	7
155	18	9	2498	25	10	1202	41	14
165	16	16	2537	22	14	1276	27	15
165	30	9	2537	21	18	1276	42	10
175	12	8	2584	34	10	1321	13	7
175	38	8	2664	36	10	1382	13	7
180	19	8	2779	27	18	1382	43	17
180	36	8	2779	33	58	1470	17	8
195	23	8	2802	32	18	1470	18	7
195	40	35	2802	40	40	1502	23	10
200	13	8	2850	46	15	1502	32	13
205	21	8	2850	33	10	1590	33	14
205	28	34	2866	36	33	1705	27	13
220	15	8	2897	21	45	1705	45	10
220	32	8	2897	31	32	1772	41	40
10	25	16	2976	21	64	1839	25	11
10	41	27	3004	30	10	1931	31	7
20	34	8	3004	25	20	2006	42	7
43	31	8	3067	42	13	2099	44	7
43	37	18	3087	39	14	2177	32	12
64	24	17	3087	31	45	2240	29	11
80	26	15	3154	15	15	2321	27	12
80	34	27	3154	37	10	2407	32	10
95	8	8	3200	43	10	2577	30	15

95	32	24
120	8	13
165	27	15
10	46	22
40	40	8
6	23	18
47	40	14
80	34	14
117	39	15
15	126	25
10	27	23
90	18	8
155	48	40
70	35	11
130	30	19
10	36.64 *	19.85 *
35	28	19
70	34.18 *	15.18 *
110	27.36 *	15.04 *
130	38	24
80	41	16
43	41	21
85	28	13
55	27	46
105	34	17
10	42	20
45	52	8
95	26	18
40	51	24

*Muestras molidas y tamizadas
por malla -100 y nuevamente
analizadas

BARRENO 4		
Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg
8	871	1290
23	50	151
38	63	115
53	126	202

BARRENO 5		
Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg
10	230	855
30	92	526
60	161	553
106	45	38

BARRENO 6		
Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg
5	999	563
23	230	1107
40	178	923
55	1268	974

77	37	21	221	33	59	65	613	845
90	44	20	271	29	58	86	22	12
102	32	22	309	40	49	86	47	31
136	21	11	359	39	25	92	26	37
136	41	13	382	33	22	100	28	31
150	17	13	404	39	7	100	28	31
150	25	18	440	31	13	113	35	43
168	31	54	454	82	34	113	35	43
179	23	7	471	44	7	139	55	45
199	22	11	523	38	32	158	99	7
204	20	7	562	28	14	158	32	7
211	19	15	606	41	15	211	28	7
211	28	19	696	49	67	211	28	7
222	43	14	804	43	21	252	30	18
231	21	7	833	44	7	252	30	18
254	42	15	855	32	19	278	33	38
254	45	14	900	31	18	278	33	38
275	23	11	964	40	28	323	36	86
275	45	15	1104	20	11	323	24	56
294	25	17	1104	37	23	361	29	26
308	7	9	1132	45	7	361	61	49
308	37	15	1172	21	7	386	29	7
315	25	14	1284	24	26	418	29	68
321	24	12	1319	30	7	418	48	61
321	31	7	1456	29	16	440	63	40
331	20	9	1456	35	24	440	32	19
331	27	11	1577	34	14	462	41	14
348	27	31	1577	60	41	485	20	7
348	31	17	1641	38	32	485	35	36
363	16	7	1641	27	12	512	31	31
369	19	7	1721	25	13	527	26	11
369	37	13	1779	28	12	527	66	54
385	23	7	1860	20	15	540	35	21
385	25	13	1948	40	35	540	40	19
420	23	13	2018	95	50	561	15	38
420	42	31	2067	42	18	561	36	41
451	28	7	2098	45	7	586	35	14
492	37	10	2098	42	11	586	49	13
512	32	22	2141	32	24	615	38	20
553	26	7	2141	36	21	642	37	18

553	36	19
575	28	10
575	38	7
629	18	7
629	25	15
672	13	7
711	40	22
732	30	19
743	26	9
773	29	30
784	31	7
784	32	20
854	28	7
854	29	16
886	28	7
886	41	15
915	33	34
967	27	7
1013	33	7
1067	31	11
1089	36	20
1122	34	16
1138	37	7
1187	48	7
1275	32	9
1275	40	7
1328	31	7
1343	22	7
1343	37	26
1379	17	7
1379	46	18
1405	34	18
1451	23	7
1451	35	15
1476	29	7
1476	37	10
1544	52	18
1559	31	15
1598	35	17
1658	32	18

2192	31	7
2243	39	10
2333	40	7
2401	33	7
2533	17	26
2654	33	7
2732	37	16
2875	85	35
2953	33	7
3073	52	51
3185	48	7

672	40	16
692	29	20
692	46	25
728	53	45
785	34	61
785	42	49
819	51	23
861	65	51
926	38	12
965	39	12
988	20	12
1009	34	11
1009	44	27
1046	33	19
1046	33	19
1078	29	40
1099	37	25
1122	37	17
1122	37	25
1143	62	27
1143	34	16
1165	31	7
1165	32	13
1194	43	47
1194	41	19
1223	32	19
1301	32	26
1301	40	17
1326	30	69
1375	49	23
1388	47	19
1436	13	7
1436	41	31
1528	32	16
1599	21	16
1636	23	15
1663	42	37
1717	25	9
1778	68	42
1931	33	21

1691	31	7
1707	30	11
1718	26	7
1745	39	13
1799	35	12
1866	33	11
1902	37	17
1924	35	40
1992	33	19
2062	41	17
2098	51	7
2171	35	7
2195	20	14
2208	38	7
2220	31	13
2241	29	12
2265	28	12
2293	34	18
2362	32	22
2424	46	15
2482	27	10
2526	40	29
2625	40	7
2661	26	7
2669	41	16
2761	36	19
2800	35	7
2852	52	7
2911	30	17
3016	22	9
3177	30	20

2009	39	19
2141	24	25
2182	45	29
2255	41	30
2329	60	52
2442	39	10
2506	41	7
2615	30	13
2615	39	11
2671	38	11
2753	22	14
2895	48	37
2940	37	15
2940	113	72
2989	31	26
3080	24	7
3133	33	13

BARRENO 7		
Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg
10	113	57
30	72	14
50	30	12
70	30	9
85	25	12
96	186	112

BARRENO 8		
Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg
10	174	87
30	33	27
50	34	11
70	40	14
85	27	9
95	23	7

BARRENO 9		
Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg
5	91	100
20	40	24
40	56	60
55	24	14
70	24	15
85	23	8

96	186	112	148	31	10	102	21	8
105	179	113	204	26	12	124	15	8
118	176	105	231	21	17	141	19	11
130	153	100	274	27	13	160	15	12
143	30	17	308	38	17	184	79	8
164	30	17	346	37	13	200	31	14
164	30	17	383	28	8	217	16	8
185	19	7	406	32	36	245	34	8
199	36	11	435	27	8	270	16	8
219	27	12	478	52	35	299	23	8
247	71	39	513	31	24	327	7	8
275	27	7	550	34	8	386	34	8
303	33	10	586	40	40	402	31	15
331	32	12	632	20	9	435	29	15
344	27	11	667	31	28	471	39	26
386	43	21	696	37	10	497	47	25
475	57	38	738	34	13	544	36	8
525	35	16	760	17	14	607	41	8
600	52	29	806	39	18	646	24	10
625	27	12	835	75	8	686	12	8
675	34	76	879	35	19	736	36	15
725	26	22	890	23	15	791	27	13
800	35	21	966	37	12	842	39	13
832	30	11	1004	11	8	907	35	25
876	31	18	1073	13	8	950	43	11
892	43	7	1120	21	8	1034	34	38
919	43	7	1163	33	24	1093	21	14
963	33	12	1194	38	8	1160	32	34
996	27	7	1242	34	11	1221	33	8
1018	30	7	1301	25	8	1299	38	17
1029	42	19	1363	54	18	1357	30	37
1065	58	20	1412	30	40	1443	16	8
1065	35	7	1465	19	8	1508	18	8
1097	26	22	1510	20	9	1570	35	8
1123	36	7	1559	35	8	1602	30	8
1150	52	41	1589	30	8	1661	23	8
1176	36	15	1630	28	10	1730	27	8
1176	19	36	1708	32	22	1775	32	8
1189	39	12	1733	11	8	1818	22	8
1235	34	13	1787	40	13	1854	21	8

1254	154	73
1254	42	13
1280	40	7
1318	44	17
1363	35	22
1416	25	17
1416	44	7
1437	26	11
1454	33	21
1470	17	13
1470	33	7
1495	19	20
1495	39	7
1515	21	7
1515	34	7
1535	21	12
1560	34	26
1560	36	7
1580	21	7
1580	33	15
1605	20	11
1605	25	11
1640	16	7
1660	23	7
1680	21	7
1700	17	7
1720	29	7
1755	56	23
1785	41	12
1800	24	19
1800	39	25
1812	32	17
1862	20	15
1937	29	22
1937	53	44
2011	31	19
2094	25	13
2189	42	24
2189	26	21
2268	40	21

1819	36	26
1873	43	14
1911	28	15
1982	33	8
2027	32	21
2088	28	8
2157	28	10
2209	28	15
2270	34	8
2326	30	27
2374	25	11
2530	29	12
2617	52	8
2692	38	23
2727	33	15
2768	29	12
2820	30	10
2872	35	46
2934	33	21
2989	38	126
3049	46	8
3126	13	13

1887	37	12
1926	33	8
1981	32	38
2018	40	38
2109	14	13
2186	27	11
2259	54	16
2326	26	16
2474	37	13
2574	7	8
2667	33.96	15.29
2846	31.33	14.09
2967	40.02	16.99
3086	30.69	17.63
3132	27.13	19.95
3171	39.02	28.14

2364	20	12
2468	40	12
2592	37	7
2683	31	7
2768	35	7
2884	22	11
3081	108	52
3290	34	7

BARRENO 10		
Profundidad cm	As mg/Kg	Pb mg/Kg
10	28	13
30	28	11
40	23	7
60	22	7
94	38	23
84	7	9
97	21	8
115	21	8
140	25	13
163	29	27
192	17	8
216	31	21
232	10	8
248	26	24
265	29	39
281	11	9
299	10	10
324	19	8
357	14	8
386	46	18
418	62	58
443	17	9
475	25	8
499	20	8
536	16	16
550	25	8

575	39	8
602	20	8
635	26	8
650	18	8
688	29	8
713	41	8
747	17	8
771	51	35
797	27	13
819	29	17
848	39	8
860	29	8
905	25	8
938	22	17
993	32	16
1032	46	17
1073	30	10
1112	38	8
1152	29	17
1191	20	14
1263	37	8
1315	31	14
1393	28	15
1429	20	8
1481	18	8
1521	25	13
1571	30	12
1620	25	8
1649	34	17
1688	18.53	12.53
1719	35.78	14.97
1753	25.56	10.92
1815	26.3	10.57
1840	32.58	11.24
1886	18.34	11.58
1936	26.9	8
2023	35	11
2143	33	8
2224	32	10
2263	31	8

2316	32	13
2439	36	8
2521	25	14
2616	19	12
2684	48	61
2766	38	15
2891	24	12
3015	28	16
3178	28	10