



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

EVALUACIÓN DEL GRADO DE CONTAMINACIÓN DE LA
ZONA NORESTE DEL ACUÍFERO SOMERO DEL VALLE DE
SAN LUIS POTOSI, ASOCIADO AL RIEGO CON AGUA
RESIDUAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(AGUA SUBTERRÁNEA)

PRESENTA:

MARICARMEN SALAZAR LEDESMA

JURADO EXAMINADOR

DRA. ELOÍSA DOMÍNGUEZ MARIANI
DR. OSCAR ELCOLERO FUENTES
DRA. LUCY NATIVIDAD MORA PALOMINO
DR. FRANCISCO MARTÍN ROMERO
DRA. MARÍA VICENTA ESTELLER ALBERICH



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

RESUMEN

1	INTRODUCCIÓN	
1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivos	4
2	GENERALIDADES	
2.1	Descripción general del área de estudio	
2.1.1	Localización y vías de acceso	5
2.1.2	Población y actividad económica	6
2.1.3	Uso del agua residual para riego en el valle de San Luis Potosí	7
2.2	Marco físico de referencia	
2.2.1	Fisiografía	10
2.2.2	Geomorfología	12
2.2.3	Clima	13
2.3	Marco geológico	
2.3.1	Geología regional	18
2.3.2	Geología local	21
2.4	Tipos de suelo	25
2.5	Modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero	
2.5.1	Antecedentes	26
2.5.2	Modelo hidrogeológico regional	27
2.6	Procesos geoquímicos que gobiernan la movilidad de contaminantes en el suelo	31
3	MÉTODO DE TRABAJO	
3.1	Actividades de campo	
3.1.1	Visita de reconocimiento y censo de norias	36
3.1.2	Muestreo de agua subterránea, suelo y agua residual	38
3.1.3	Medición de parámetros de campo	47
3.2	Actividades de laboratorio	
3.2.1	Determinación de parámetros físico-químicos en muestras de agua residual y subterránea	50

ÍNDICE

3	MÉTODO DE TRABAJO	
3.2	Actividades de laboratorio	
3.2.2	Determinación de parámetros físico-químicos en muestras de suelo	52
3.3	Actividades de gabinete	
3.3.1	Recopilación y análisis de información	54
3.3.2	Procesamiento e integración de datos	54
3.3.3	Interpretación de resultados	55
4	RESULTADOS	
4.1	Análisis de la composición química de las muestras de agua residual	57
4.2	Análisis de parámetros físico-químicos de las muestras de suelo	63
4.3	Análisis de la composición química de las muestras de agua subterránea	76
4.4	Modelo hidrogeológico local del acuífero somero	87
5	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	
5.1	Interpretación hidrogeoquímica	92
5.2	La función del sistema suelo como filtro de contaminantes	104
5.3	Relación entre la composición química del agua residual y subterránea	110
5.4	Evaluación de parámetros ambientales	120
6	CONCLUSIONES	125
	REFERENCIAS	133

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
2.1 Clasificación del clima dentro del área de estudio (Tomada de Cardona-Benavides, 2007).	14
2.2 Relación de estaciones climatológicas consultadas (IMTA, 2000).	15
2.3 Valor de la temperatura media anual (IMTA, 2000).	16
2.4 Valor de la evaporación potencial (IMTA, 2000).	16
3.1 Métodos analíticos utilizados en muestras de agua residual y subterránea.	51
3.2 Métodos analíticos utilizados para la determinación de parámetros en muestras de suelo.	53
4.1 Relación de muestras y resultados de los parámetros de campo del agua residual.	58
4.2 Resultados de la determinación de elementos mayores del agua residual.	58
4.3 Resultados de la determinación de metales del agua residual.	61
4.4 Relación de muestras de suelo.	63
4.5 Caracterización de campo del perfil de suelo MS-S11 y resultados de los análisis de laboratorio.	64
4.6 Caracterización de campo del perfil de suelo MS-S12 y resultados de los análisis de laboratorio.	65
4.7 Resultados de la determinación de carbono orgánico, inorgánico y materia orgánica correspondientes a los perfiles MS-S11 y MS-S12.	68
4.8 Resultados de los análisis de difracción de rayos X de las muestras orientadas.	72
4.9 Relación de muestras y resultados de los parámetros de campo del agua subterránea.	77
4.10 Resultados de la determinación de elementos mayores del agua subterránea.	78
4.11 Resultados de la determinación de metales de las muestras de agua subterránea.	84
4.12 Relación de norias y niveles piezométricos del agua subterránea.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
2.1 Localización del área de estudio.	6
2.2 Provincias fisiográficas de San Luis Potosí (INEGI, 2002).	11
2.3 Geología del área de estudio (Servicio Geológico Mexicano, 1998).	21
2.4 Sección esquemática oeste-este del valle de San Luis Potosí (Tomada de Noyola-Medrano <i>et al.</i> , 2009).	28
3.1 Localización de norias seleccionadas para el muestreo de agua subterránea.	39
3.2 Unidades de suelo y localización de sitios de muestreo (CETENAL, 1973).	43
3.3 Localización de sitios de muestreo de agua residual.	45
4.1 Concentraciones de cationes en las muestras de agua residual.	59
4.2 Concentraciones de aniones en las muestras de agua residual .	60
4.3 Concentración de Fe en las muestras de agua residual .	61
4.4 Concentración de Cd, Cr, Cu, y Pb en las muestras de agua residual.	62
4.5 Diagrama triangular de texturas de las muestras de suelo.	66
4.6 Difractograma muestra MS-S11A (fases mineralógicas encontradas).	71
4.7 Valores de concentración de cationes de los extractos del suelo.	73
4.8 Valores de concentración de aniones de los extractos del suelo.	75
4.9 Concentraciones de cationes para las muestras de agua subterránea.	79
4.10 Concentraciones de aniones para las muestras de agua subterránea.	81
4.11 Concentración de sílice en las muestras de agua subterránea.	82
4.12 Concentración de Fe en las muestras de agua subterránea.	85
4.13 Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb en las muestras de agua subterránea.	86
4.14 Configuración de curvas con isovalores de profundidad del nivel estático (m).	89
4.15 Elevación del nivel estático (m) y red de flujo subterráneo.	90
4.16 Sección esquemática del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero somero.	91
5.1 Diagrama de Piper para las muestras de agua residual y subterránea.	93
5.2 Diagramas de Stiff para las muestras de agua residual y subterránea.	95
5.3 Curvas de isovalores de pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	97
5.4 Curvas de isovalores de concentración de Ca^{2+} y Na^+ (meq/L).	99

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
5.5 Curvas de isovalores de concentración de Cl^- y SO_4^{2-} (meq/L).	100
5.6 Curvas de isovalores de concentración de NO_3^- y PO_4^{3-} (meq/L).	101
5.7 Curvas de isovalores de concentración de Cr y Fe ($\mu\text{g/L}$).	102
5.8 Curvas de isovalores de concentración de Cu y Pb ($\mu\text{g/L}$).	103
5.9 Gráfica comparativa de la concentración de cationes del agua residual vs. agua subterránea.	113
5.10 Gráfica comparativa de la concentración de aniones del agua residual vs. agua subterránea.	114
5.11 Gráfica comparativa de la concentración de Cd, Cr y Pb del agua residual vs. agua subterránea.	116
5.12 Gráfica comparativa de la concentración de Cu y Fe del agua residual vs. agua subterránea.	117
5.13 Curvas de isovalores de concentración de NO_3^- (mg/L) y distribución de granjas dentro del área de estudio.	121
5.14 Curvas de isovalores de concentración de SAAM (mg/L) en muestras de agua subterránea.	123

RESUMEN

La ciudad de San Luis Potosí, asentada en el altiplano árido potosino, se localiza en el valle del mismo nombre y al interior de una cuenca hidrológica considerada entre las más secas del país. Uno de los principales problemas que enfrenta esta ciudad y su zona conurbada, es la degradación de los recursos hídricos. En esta región se ha desarrollado la práctica histórica desde 1959 de utilizar para la irrigación de los cultivos, el agua residual sin tratamiento generada en la zona urbana. Este efluente es conducido a las zonas agrícolas ubicadas principalmente en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez, a través de 16 colectores a cielo abierto y una red de canales secundarios que atraviesan las zonas de cultivo.

El presente estudio tiene la finalidad de determinar el grado de contaminación de una porción del acuífero somero del Valle de San Luis Potosí, ubicada al noreste de la ciudad del mismo nombre, asociado a la influencia del riego en zonas agrícolas con agua residual proveniente de la zona urbana, así como evaluar la función del sistema suelo como filtro de contaminantes.

El acuífero somero está conformado por material granular de origen volcánico (tobas) y depósitos aluviales, con un espesor máximo de 40 m, una conductividad hidráulica horizontal promedio de 2×10^{-4} m/s y una dirección de flujo subterráneo con orientación SW-NE. Por otro lado, el tipo de suelo presente en el área de estudio es un Xerosol háplico, poco desarrollado y con bajo contenido de materia orgánica, que lo define como un suelo característico de zonas áridas y semiáridas.

Para la realización de este estudio, se midieron niveles piezométricos con la finalidad de definir la dirección de flujo subterráneo, se tomaron muestras de agua subterránea procedentes de 26 norias para la determinación de su composición química, al igual que para las muestras de agua residual recolectadas en 5 sitios que

corresponden a canales de distribución de aguas negras que atraviesan el área de estudio, y se tomaron 8 muestras de suelo para definir su función como filtro - amortiguador de contaminantes.

Para las muestras de agua, se determinaron parámetros tales como pH, CE, alcalinidad total, elementos mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , F^- , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-}), presencia de coliformes fecales y totales, SAAM (sustancias activas al azul de metileno), y metales como Cd, Cr, Cu, Fe y Pb.

En el caso del agua residual, el pH tiene un valor promedio de 7.8 y una conductividad eléctrica promedio de 1,140 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por su composición química, el Na^+ y el HCO_3^- son los iones que presentan las concentraciones más altas (7.8 y 6.0 meq/L), por lo que se clasificó como un agua residual de composición bicarbonatada - sódica principalmente. De los metales analizados, los valores máximos de concentración obtenidos se consideran bajos, Cd (0.17 $\mu\text{g}/\text{L}$), Cr (1.5 $\mu\text{g}/\text{L}$), Cu (2.21 $\mu\text{g}/\text{L}$), Fe (201.22 $\mu\text{g}/\text{L}$) y Pb (0.9 $\mu\text{g}/\text{L}$), ya que éstos se encuentran por debajo de los límites permisibles establecidos en la NOM-001-ECOL-1996.

Para las muestras de agua subterránea el pH tiene un valor promedio de 6.7 y una conductividad eléctrica promedio de 1,280 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por su composición química, los iones dominantes son el HCO_3^- (11.4 meq/L), Ca^{2+} (25.2 meq/L) y Na^+ (15.2 meq/L), como valores de concentración máximos, por lo que se clasificó como un agua bicarbonatada cálcica/sódica. Con base en lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994, los iones que superan los límites máximos permisibles son el NO_3^- , con un 42% de muestras de agua subterránea que superan el límite de 50 mg/L (0.81 meq/L), obteniéndose valores de hasta 300 mg/L (4.9 meq/L) al SW del área de estudio. Caso similar ocurre con los valores de SAAM, siendo el 70% de las muestras las que superan el valor de 0.5 mg/L.

Con respecto a los metales analizados, sólo el Fe es el que supera el límite permisible de 0.3 mg/L en el 65% de las muestras, alcanzando valores de hasta 1.3 mg/L.

Por otro lado, los valores de concentración de la mayoría de los diferentes parámetros analizados aumentan en dirección al SW, presentándose las máximas concentraciones en los alrededores del poblado de Soledad de Graciano Sánchez, mientras que los valores más bajos se presentan al NE del área de estudio.

Por lo anterior se propone, que la existencia de una zona no saturada (ZNS) de gran espesor en la porción NE, contribuye a que haya mayor interacción entre el agua de riego y el medio por donde se infiltra, dando como resultado menores concentraciones iónicas en dicha zona. A diferencia de lo anterior, en la porción SW se tiene una ZNS de menor espesor que proporciona mayor posibilidad de infiltración. Adicionalmente, en dicha zona se llevan a cabo actividades antropogénicas tales como el almacenamiento y disposición inadecuada de residuos líquidos y sólidos de granjas ubicadas en dicha porción del área de estudio, así como de sistemas sépticos inapropiados para la disposición de aguas residuales de origen doméstico de la zona periurbana del poblado de Soledad de Graciano Sánchez, por lo que los valores de concentración de los diferentes parámetros analizados son mayores en esta región.

Para definir la función del sistema suelo como filtro de contaminantes, las muestras de suelo colectadas fueron analizadas para la determinación de pH, CE, textura, contenido de elementos mayores de los extractos del suelo, capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de materia orgánica y composición mineralógica por difracción de rayos X.

A partir de los datos obtenidos, en la zona noreste del área de estudio se obtuvieron bajos contenidos de materia orgánica (<2%), presencia mínima de minerales arcillosos, CIC baja, textura franco arenosa, capacidad de amortiguamiento media y pH neutro.

En la zona suroeste, el contenido de materia orgánica también es bajo, los minerales arcillosos son un poco más abundantes tal y como lo denota una textura franco arcillo arenosa, la CIC es alta en los primeros centímetros y media a profundidad, se tiene una capacidad de amortiguamiento baja y un pH neutro a ligeramente alcalino.

A pesar de que en general el suelo tiene una capacidad de intercambio catiónico baja, bajos contenidos de arcilla y poca materia orgánica, su pH neutro ofrece las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la precipitación de metales. Además es importante mencionar que, en el presente trabajo se estudiaron las características y propiedades del suelo hasta una profundidad de 1.5 m, en tanto que la ZNS tiene un espesor considerable (12 a 25 m), lo cual permitiría una mayor interacción entre el agua de riego y el medio a través del cual se infiltra, dando la posibilidad de que a mayor profundidad, se puedan presentar procesos de intercambio catiónico.

Por otro lado, se debe considerar que en este estudio no se tienen los elementos suficientes para valorar la capacidad filtro del suelo con respecto a los aniones, sin embargo por el carácter neutro a ligeramente alcalino del suelo, se estima que es poco probable que se presenten procesos que propicien su retención, pues se sabe que dichos procesos se llevan a cabo a pH más bajos. Lo anterior queda de manifiesto por la presencia de altas concentraciones de NO_3^- , sobre todo en la porción suroeste del área de estudio, donde se tienen valores superiores a los 300 mg/L (4.9 meq/L).

Así, dadas las prácticas de reuso del agua residual para el riego de la zona agrícola llevadas a cabo por un periodo de más de 50 años, la calidad del agua subterránea del acuífero somero del valle de San Luis Potosí ha ido disminuyendo paulatina y progresivamente, tal y como se ha constatado en este trabajo y en otros estudios en los que se ha reportado una afectación por los altos contenidos de Cl^- , HCO_3^- y NO_3^- , éste último superando por mucho el límite establecido en la norma de calidad de agua para consumo humano.

Además, considerando que el sistema suelo y el medio geológico no poseen las propiedades físico-químicas adecuadas para amortiguar dichos efectos contaminantes, de no modificarse tales prácticas, se perderá la posibilidad de tener una fuente alterna de agua para abastecimiento público-urbano de la ciudad de San Luis Potosí y su zona conurbada.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la actualidad, el crecimiento acelerado de las zonas urbanas de las últimas décadas, ha producido un incremento en la demanda de agua potable.

Como resultado de este crecimiento, se han generado grandes volúmenes de aguas residuales provenientes de las ciudades densamente pobladas, por lo que la disposición final de éstas se convirtió en un problema social que vino a ser resuelto por la reutilización de ésta como un recurso agrícola que fertiliza la tierra y aumenta su producción. Por otro lado, el agua es un recurso sumamente escaso en zonas áridas y semiáridas, por lo que el empleo de las aguas residuales en la agricultura, ha venido a subsanar tal carencia.

Sin embargo, las aguas residuales poseen un carácter ambivalente al ser un desecho que fecunda la tierra, y un recurso que puede alterar la calidad del agua subterránea y causar serios problemas de contaminación. Las aguas residuales contienen compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, además de contener elevadas cantidades de microorganismos patógenos, y esto aunado al vertido de sustancias tóxicas producidas por la actividad industrial, convierten a éstas aguas en una fuente potencial de contaminación.

La ciudad de San Luis Potosí se asienta en el altiplano árido potosino, en el valle del mismo nombre y al interior de una cuenca hidrológica considerada entre las más secas del país (Cirelli, 2004).

Uno de los principales problemas que enfrenta la zona conurbada de San Luis Potosí (SLP) - Soledad de Graciano Sánchez (SGS), es la degradación de los recursos hídricos en términos de calidad. En esta región se ha desarrollado la costumbre

histórica de utilizar para la irrigación de los cultivos, las aguas residuales sin tratamiento generadas por la zona urbana, las cuales son conducidas a las zonas agrícolas ubicadas principalmente en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez, a través de 16 colectores a cielo abierto y una red de canales secundarios que atraviesan las zonas urbanas (Cirelli, 2004).

Por otro lado, es importante mencionar que dentro del área de estudio, específicamente en la porción suroeste, existen poblados y varias granjas de ganado vacuno, porcino y aves de corral, las cuales podrían tener implicaciones de tipo ambiental, sobre todo si se considera que en este tipo de granjas generalmente se llevan a cabo prácticas inadecuadas de disposición de residuos líquidos y sólidos.

Las condiciones de manejo del agua residual mencionadas anteriormente, proporcionan un marco de referencia para tratar de identificar la magnitud del problema de contaminación que se ha producido en esta zona del país y que afecta en primer lugar al suelo, pudiendo alcanzar mayores profundidades y afectar de manera substancial al agua subterránea.

En el Valle de San Luis Potosí (VSLP) se reconocen dos sistemas acuíferos, el somero con niveles estáticos entre 3 y 36 m de profundidad y una extracción de 5 Mm³/año, y el profundo con niveles entre los 75 y 180 m de profundidad y una extracción de 120 Mm³/año (Cirelli, 2004; CONAGUA, 2009).

Análisis químicos enfocados a la identificación de la contaminación que afecta al agua subterránea del acuífero somero, fueron reportados por el Instituto de Geofísica de la UNAM (1988). De acuerdo con estudios previos (Carrillo y Armienta, 1989), el acuífero somero del VSLP presenta una disminución en la calidad del agua, asociada a la contaminación producida por la infiltración de aguas residuales.

Estas aguas sin tratamiento, tanto domésticas como industriales, se desalojan hacia el lado norte, este y sureste de la ciudad de SLP a través de tres sistemas colectores: - norte, centro y sur -, mismos que son canalizados a 16 colectores a cielo abierto, a los campos de cultivo en donde abarcan una superficie de riego de 2,652 ha y un volumen de descarga de entre 58 y 65 Mm³/año (CNA 2000, tomado de Cirelli, 2004).

Las norias y pozos someros perforados en la región ubicada al noreste de la ciudad de SLP, presentan una marcada influencia de contaminación asociada con efluentes de origen municipal e industrial. Carrillo-Rivera (1992), señala que este tipo de contaminación es evidente en base a los valores de concentración de algunos iones como el NO₃⁻ (29.2 mg/L), HCO₃⁻ (212.0 mg/L) y Cl⁻ (85.5 mg/L), como valores promedio.

Con base en lo anteriormente descrito, se decidió realizar un estudio para evaluar los efectos provocados por el empleo de agua residual para el riego de la zona agrícola ubicada en los alrededores del municipio de Soledad de Graciano Sánchez.

Para ello, se estableció el área de estudio que comprende una superficie rectangular de 56 Km² localizada al NE de la ciudad de San Luis Potosí, dentro del municipio de Soledad de Graciano Sánchez y situada geográficamente entre las coordenadas 22° 11' 27" y 22° 15' 12" de latitud Norte y 100° 51' 44" y 100° 56' 27" de longitud Oeste.

Así, se llevaron a cabo los trabajos correspondientes para determinar la presencia de algunas especies químicas que se han incorporado al agua subterránea del acuífero somero, como resultado del uso del agua residual para fines agrícolas, así como también de aquellas generadas como producto de la actividad humana imperante en dicha zona.

1.2 Objetivos

General

- Determinar el grado de contaminación del acuífero somero en la porción noreste del Valle de San Luis Potosí, debido a la influencia del riego con agua residual en zonas agrícolas.

Específicos

- Caracterizar la composición química del agua residual utilizada para el riego de la zona agrícola ubicada al noreste de la ciudad de San Luis Potosí.
- Identificar la función del sistema suelo como filtro de contaminantes, a partir de la determinación de propiedades físico-químicas tales como su textura, pH, composición mineralógica, contenido de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, y con ello evaluar los procesos de transformación presentes en él.
- Caracterizar la composición química del agua subterránea del acuífero somero, y evaluar su posible afectación debido a la influencia del riego con agua residual.
- Establecer el modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio, a fin de conocer la interacción agua residual-agua subterránea, así como identificar la posible dirección de migración de contaminantes.

2. GENERALIDADES

2.1 Descripción general del área de estudio

2.1.1 Localización y vías de acceso

La ciudad de San Luis Potosí se localiza en la porción sur-occidental del estado, en el extremo sur de la Sierra Madre Oriental en una planicie alargada cuya elevación se encuentra entre los 1,850 y 1,900 msnm. Este aspecto contrasta con las elevaciones de las sierras que limitan al oriente y occidente de la zona, y que están representadas por la Sierra de Álvarez con una elevación de 2,160 msnm y la Sierra de San Miguelito cuya elevación alcanza 2,630 msnm respectivamente, condiciones topográficas que la definen como una cuenca cerrada, misma que pertenece a la región hidrológica RH-37 denominada "El Salado".

El área de estudio se localiza a 8 km aproximadamente, al noreste de la ciudad de San Luis Potosí, dentro del municipio de Soledad de Graciano Sánchez (Figura 2.1), mismo que limita al norte con Villa Hidalgo, al este con Armadillo de los Infante y al sur y oeste con San Luis Potosí.

La principal ruta de acceso al área de estudio es a través de la carretera principal No. 57 (México-Piedras Negras), que cruza al estado de San Luis Potosí de sur a norte por la parte central de la entidad. Esta carretera comunica a la capital del estado con Matehuala, Saltillo, Coahuila y Monterrey.

De igual forma, la carretera No. 49 comunica a la ciudad de San Luis Potosí, con las ciudades de Zacatecas y Torreón, y entronca con la No. 45 México-Ciudad Juárez; además existen carreteras estatales, así como brechas y terracerías que comunican a los diferentes poblados y municipios comprendidos dentro de la zona de estudio.

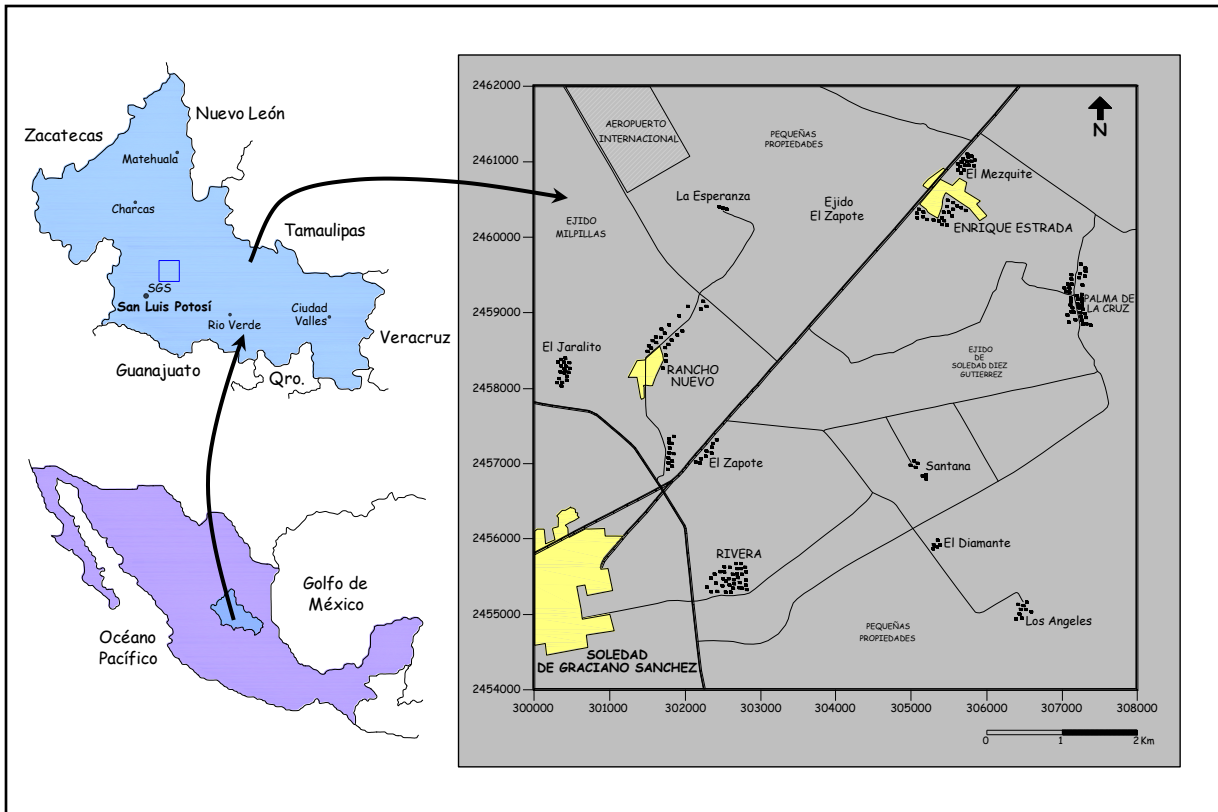


Figura 2.1 Localización del área de estudio

2.1.2 Población y actividad económica

De acuerdo con el II Conteo de Población y Vivienda del 2005 realizado por el INEGI, la población del municipio de Soledad de Graciano Sánchez es de 226,803 habitantes, misma que representa el 7.84% de la población total del estado.

Con respecto a la actividad económica, el sector primario representa el 3.7% de la población económicamente activa. Dicho sector incluye la actividad agrícola que tiene como principales cultivos: maíz, frijol, cebada y los de mayor importancia en la región que son la alfalfa y las hortalizas (INEGI, 2000); el riego de las zonas agrícolas se realiza con agua de pozos, norias y agua residual.

Por otro lado, una de las principales actividades del municipio es la ganadería, la cual destina una superficie de 15,350 ha para dicha actividad. Los principales productos obtenidos de la actividad pecuaria son: leche, carne, pieles y lana, de los cuales la leche es el que se comercializa principalmente a través de la elaboración artesanal de quesos, crema y mantequilla.

A este respecto, es importante mencionar que dentro del área de estudio, específicamente en la porción suroeste, existen varias granjas de ganado vacuno, porcino y aves de corral, las cuales podrían tener implicaciones de tipo ambiental, sobre todo por las prácticas inadecuadas de disposición de residuos que generalmente se tienen en este tipo de granjas.

El sector secundario está representado por la industria manufacturera (35.54% de la población económicamente activa), mientras que el sector terciario involucra actividades comerciales, la cual se lleva a cabo en establecimientos de diferentes giros que representan el 57.57% de la población económicamente activa.

2.1.3 Uso del agua residual para riego en el valle de San Luis Potosí

Desde la perspectiva de la política agrícola e hidráulica, el agua residual (como recurso hidráulico) presenta varias ventajas: liberación de agua dulce para consumo humano, ampliación de la frontera agrícola, incremento en la productividad, y disminución de la presión sobre el recurso especialmente en zonas áridas y semiáridas (Cirelli, 2004).

Así, en el caso de la ciudad de San Luis Potosí, esta enfrenta un doble problema con respecto al recurso hídrico: la calidad del agua en la red de distribución de agua potable y la disposición final de las aguas de desecho.

El desarrollo de una agricultura de riego con aguas residuales en las márgenes de San Luis Potosí, ha favorecido la formación de una comunidad de productores que, a lo largo del tiempo, se han organizado para la gestión colectiva de efluentes urbanos.

A partir de 1925, entre los documentos de la Reforma Agraria, se encuentra información de un grupo de habitantes que utilizaba de forma coordinada el agua de desecho de la ciudad (Cirelli, 2004). Se trataba de productores del municipio de Soledad, organizados con la finalidad de obtener los permisos del ayuntamiento capitalino para reutilizar los efluentes en el riego de sus parcelas. Se sabe que para ese año, la superficie regada con aguas residuales en Soledad sumaba 200 hectáreas. El reparto agrario a mediados de los años 30's, originó nuevos demandantes de las aguas residuales de la ciudad, creando una competencia en torno al recurso entre los socios de la existente cooperativa, antiguos usuarios y los nuevos reclamantes (Cirelli, 2004).

En 1959, gracias al decreto presidencial que dotó de derecho al uso de las aguas residuales urbanas, cuatro agrupaciones de la región (los Ejidos de Soledad, El Zapote y San Francisco, además de los usuarios antiguos) pudieron aprovechar libremente de este recurso. El 52% de las aguas residuales urbanas se destinó a los ejidos, y el 48% restante a los antiguos usuarios; 5.5 Mm³/año repartidos en una superficie de riego de 412 hectáreas (Cirelli, 2004).

En 1980, la superficie irrigada con aguas residuales era de 1,000 hectáreas, en tanto que el volumen de agua residual utilizada para el riego de la zona agrícola, se incrementó alcanzando la cifra de 28 Mm³ anuales (SARH, 1981; Gobierno del Estado de SLP, 1993, tomado de Cirelli, 2004).

Hoy en día las aguas residuales, tanto domésticas como industriales sin tratamiento, se desalojan hacia el lado norte, este y sureste de la ciudad, por gravedad, siguiendo

la pendiente natural de la cuenca, por un sistema de drenaje de tipo combinado, en el cual convergen las aguas residuales municipales, pluviales e industriales.

El sistema de riego cuenta con 16 fuentes de distribución que corresponden a los principales canales emisores, con una red extensa de canales secundarios, que desalojan cerca de $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$, entre 58 y 65 Mm^3 anuales de aguas residuales en una superficie de riego de 2,652 hectáreas (CNA, 1999, tomado de Cirelli, 2004); 86% procede de aguas de consumo doméstico y comercial, y el 14% restante de la industria.

La fuente de mayor caudal de aguas residuales es el Canal General, que desaloja 40% de todos los efluentes urbanos procedentes del centro de la ciudad. Otro 40% del agua residual es conducido por cuatro canales principales: el río Santiago, el canal Pedroza, Libertad y Los Gómez. El restante 20% del agua residual es desalojado por los canales Industrias I y II y el río Españita, los cuales conducen las aguas residuales de la zona industrial.

La infraestructura de riego cuenta también con dos tanques de almacenamiento de aguas residuales. El primero de ellos es el Tanque del Morro, ubicado al interior del Anillo Periférico, al este de la ciudad, y con una capacidad de almacenamiento de 780 lps. El segundo tanque de almacenamiento es el Tenorio, localizado fuera del Anillo Periférico, al sureste de la ciudad, donde descargan las aguas residuales de la zona industrial.

En lo que se refiere a la composición química del agua residual, existen algunos trabajos realizados en el área del valle de San Luis Potosí que han incluido su estudio y análisis. Tal es el caso del "*Plan integral de saneamiento para el reuso de aguas residuales*" (Comisión Estatal del Agua de San Luis Potosí, 2001), en el cual se incluyen resultados de los análisis realizados al influente del Tanque Tenorio, ubicado al SE de la ciudad de San Luis Potosí.

De acuerdo con dicho estudio, el agua residual tiene un pH de 6.9, una conductividad eléctrica de 1040 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una alcalinidad de 390 mg/L CaCO_3 como valores máximos. Se analizaron otros parámetros tales como, STD con valor promedio de 690 mg/L, una demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) entre 250 y 275 mg/L y una demanda química de oxígeno (DQO) máxima de 570 mg/L.

Con respecto al contenido de elementos mayores, el estudio sólo incluye los valores de concentración de iones tales como F^- (3 mg/L), Cl^- (50 mg/L), NO_3^- (38 mg/L) y SO_4^{2-} (220 mg/L) todos ellos como los valores máximos.

En el caso de los metales pesados, se analizaron las concentraciones de As (0.031 mg/L), Cd (0.085 mg/L), Cu (0.05 mg/L), Cr (0.044 mg/L), Hg (0.001 mg/L), Fe (0.3 mg/L), Pb (0.098 mg/L) y Zn (0.24 mg/L), también como valores máximos. De acuerdo con la NOM-001-ECOL-1996, y con estos resultados, el Cd es el más cercano al valor normativo que es 0.1 mg/L.

2.2 Marco físico de referencia

2.2.1 Fisiografía

El territorio del estado de San Luis Potosí se ubica en tres provincias fisiográficas que son: la Provincia de la Sierra Madre Oriental, la Provincia de la Mesa Central y la Provincia de la Llanura Costera del Golfo de México, de las cuales la que ocupa la mayor extensión territorial en el estado es la Sierra Madre Oriental (INEGI, 2002).

La región analizada para el presente estudio forma parte de la provincia fisiográfica de la Mesa Central (Figura 2.2), que corresponde a una cuenca endorreica con una elevación promedio en la zona del valle de 1,840 msnm, la cual queda limitada en su porción occidental, meridional y septentrional por sierras de topografía escarpada de hasta 2700 msnm, y al oriente con elevaciones de 2,200 msnm. Esta provincia ocupa la

parte noroccidental del territorio de San Luis Potosí; colinda al norte y oriente con la Sierra Madre Oriental, al oeste con la Sierra Madre Occidental y al sur con la Provincia del Eje Neovolcánico (INEGI, 2002). En general, los rasgos fisiográficos que caracterizan a esta provincia están representados por amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas.



Figura 2.2. Provincias fisiográficas de San Luis Potosí (INEGI, 2002)

El extremo sur-sureste de la región pertenece a la Subprovincia de las Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato, en la cual dominan las llanuras localizadas entre sierras constituidas por rocas volcánicas que cubren la mayor parte del territorio y que en ocasiones se asocian con mesetas volcánicas con un piso de aluviones antiguos, y que hacen contacto abrupto en el sureste con la Sierra Gorda. Esta subprovincia comprende parte de los municipios de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez.

En una pequeña porción, en el límite suroccidental con el estado de Zacatecas, se tiene la Subprovincia de la Llanura de Ojuelos-Aguascalientes, caracterizada por la presencia de mesetas y sierras volcánicas con lomeríos y extensas llanuras.

2.2.2 Geomorfología

Dentro de la zona se distinguen las siguientes topoformas (CNA, 2002):

Valle tectónico. Es una depresión rectangular que se prolonga hacia el graben de Villa de Reyes al sur, y Villa de Arista al norte, mismo que está limitado por fallas de gran ángulo de rumbo N-S en donde se considera que el colapsamiento alcanzó hasta 500 m.

Sierras de elevación intermedia. Al occidente y suroccidente, el valle es bordeado por la Sierra de San Miguelito, que es un pilar tectónico formado por rocas volcánicas de relieve abrupto a moderado con laderas que tienen inclinaciones entre 15 y 45%, el drenaje es de tipo rectangular.

Al oriente, el valle queda limitado por la Sierra de Álvarez, que es también un pilar tectónico conformado por rocas calcáreas de edad cretácica, intensamente plegadas, con su eje orientado de NW a SE; el drenaje en esta zona es de tipo dendrítico. Al norte, el valle queda separado de la zona de Villa de Arista por otro pilar volcano-tectónico denominado Alto La Melada.

En Aqualulco por ejemplo, se localizan formaciones montañosas al noreste, siendo las principales Cerro Laguna, Puerto Limpio, Los Llanitos, El Cochi y Los Homos, elevaciones que tienen una altura que fluctúa alrededor de los 2,000 m. Por otro lado, Cerro de San Pedro se encuentra prácticamente enclavado en la zona montañosa, destacando en la parte norte el Cerro Reposo, además hay otros cerros de importancia como son: San Pedro Portezuelo, Lobo, Chiquihuitillo, Las Cruces y el Ranchito (INEGI, 2002).

En la parte sur de Mexquitic de Carmona, se localiza una parte de la Sierra de San Miguelito, donde destacan el cerro Perro Grande, La Cuchilla y Los Venados. En la

parte central se localizan estribaciones como: Cerro La Mina, El Punto, El Agua Azul, Grande, La Cruz y La Mesota.

En el municipio de San Luis Potosí, se localizan formaciones montañosas al norte, destacando por su altura: Cerro Gordo, El Panalillo, El Divisadero, El Cabo y El Coyote; al sur y oeste se localiza la Sierra de San Miguelito, destacando los cerros de: Las Peñas Blancas, El Picacho del Fraile, Mesa Redonda, La Hierbabuena, Mesa Las Gallinas, Las Palomas, La Peña, La Campana, El Mezapil y El Borrego.

En el caso particular del municipio de Soledad de Graciano Sánchez, éste se encuentra prácticamente establecido en una planicie, y sólo se aprecian formaciones montañosas de poca consideración en la parte norte formadas por los cerros Guapillas, Gordo y Santa Cruz, que varían en una altura promedio de 1,900 msnm.

Finalmente en Zaragoza, la zona considerada como montañosas se localiza en las porciones sureste, este y norte, en donde empieza a formarse la Sierra de Álvarez. En la parte norte destacan los cerros: La Mina, El Puerto y El Salto. En la parte este, destacan los cerros: Rincón del Hoyo, La Virgen y El Águila (INEGI, 2002).

2.2.3 Clima

El clima que predomina en todo el Altiplano y gran parte de la Sierra Madre Oriental es del tipo seco, con una temperatura media anual entre 16° y 18°C, y con una precipitación media anual de 410 a 500 mm, con lluvias principalmente en verano y muy escasas en el resto del año (INEGI, 2002).

De acuerdo con INEGI (2002), el clima predominante de la zona del valle de San Luis Potosí, pertenece al grupo de climas secos, con tipos semi-seco, seco y muy seco. En general los tipos secos y muy secos predominan en la planicie, mientras que los semi-secos se presentan en las partes elevadas.

Las condiciones de canícula se presentan en cada uno de ellos, y se manifiesta en una pequeña temporada menos lluviosa dentro de la temporada de lluvias, llamada también sequía de medio verano. En la Tabla 2.1 se presenta la clasificación del clima que prevalece dentro del área de estudio (Cardona-Benavides, 2007).

Tabla 2.1. Clasificación del clima dentro del área de estudio

Grupo	Tipo	Subtipo	Zona donde predomina
Clima Seco (Bs)	Semiseco (Bs ₁)	Semiseco Templado (Bs ₁ Kw)	Predominio en la porción occidental. Abarca las partes altas con más de 1,950 msnm (Sierra de San Miguelito).
	Seco (Bs ₀)	Seco Semicálido (Bs ₀ hw)	Predominan en una pequeña porción al S-SE de la cuenca de San Luis Potosí.
		Seco Templado (Bs ₀ Kw)	Abarca gran parte del área de estudio, predominando en la porción Sur y al Oriente de la cuenca de San Luis Potosí (Sierra San Pedro).
	Muy seco (BW)	Muy Seco Templado (BW Kw)	Con predominio en la porción norte (Peñasco).

Nota: Tomada de Cardona-Benavides (2007).

Con base en las dimensiones del área analizada y los diferentes tipos de climas identificados, se presentan variaciones en los patrones de precipitación, temperatura y evaporación potencial, tanto a nivel espacial como temporal, por lo que a continuación se presenta una breve descripción del comportamiento de cada uno de ellos dentro del área de estudio.

Precipitación

En la región de San Luis Potosí el periodo de lluvias comprende los meses de mayo a octubre, con una precipitación media mensual de aproximadamente 53 mm para este periodo. La precipitación media anual para el valle de San Luis Potosí es de aproximadamente 367 mm al año (INEGI, 2002), sin embargo la distribución de la precipitación indica valores de 400 a 450 mm al año hacia las Sierras de San Miguelito, San Pedro y Álvarez, mismas que rodean la planicie.

Para obtener el valor de la precipitación dentro del área de estudio, se tomaron en cuenta los datos de 6 estaciones climatológicas (IMTA, 2000). En la Tabla 2.2 se presenta una relación con la ubicación de dichas estaciones y el periodo de años en los que se contó con información.

Tabla 2.2. Relación de estaciones climatológicas consultadas

	Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Periodo	Precipitación media anual
1	24024	El Peaje, S.L.P	22° 05' 26"	101° 06' 55"	1971-2000	379.2
2	24069	San Luis Potosí, DGE	22° 09' 10"	100° 58' 38"	1971-2000	359.7
3	24081	Soledad D. Gutiérrez	22° 11' 00"	100° 56' 00"	1971-2000	383.3
4	24106	Zaragoza, Zaragoza	22° 08' 00"	100° 44' 00"	1971-2000	305.9
5	24111	San Luis Potosí, SMN	22° 09' 00"	100° 59' 00"	1971-2000	341.7
6	24179	Xoconoxtle, Zaragoza	22° 05' 00"	100° 42' 00"	1971-2000	376.0

Fuente: ERIC II. Extractor Rápido de Información Climatológica., IMTA (2000).

De acuerdo con la información disponible de las estaciones que se ubican cerca y dentro al área de estudio (periodo de observación 1971-2000), la precipitación media anual en la zona es de 357.6 mm, valor que es muy parecido al obtenido a partir de la información consultada en INEGI (2002).

Temperatura

En la cuenca del valle de San Luis Potosí la temperatura media anual es de 17.5°C, con una media anual en verano de 21°C. La temperatura máxima extrema se presenta en los meses de mayo y junio, alcanzando valores de 37.3°C y la temperatura mínima extrema se presenta en el mes de diciembre.

Al igual que en el caso de la precipitación, para obtener el valor de la temperatura media anual, se obtuvo la información de las 6 estaciones consultadas para el caso de la precipitación (IMTA, 2000). En la Tabla 2.3 se presenta el valor promedio de temperatura de acuerdo con el periodo 1971-2000.

Tabla 2.3. Valor de la temperatura media anual

Clave	Nombre	Temperatura media anual (°C)
24024	El Peaje, S.L.P	16.8
24069	San Luis Potosí, DGE	17.4
24081	Soledad D. Gutiérrez	18.3
24106	Zaragoza, Zaragoza	17.7
24111	San Luis Potosí, SMN	17.6
24179	Xoconoxtle, Zaragoza	15.1

Fuente: ERIC II. Extractor Rápido de Información Climatológica., IMTA (2000).

Con base en los resultados de la tabla anterior, y de acuerdo con la información disponible de las estaciones consideradas, en la región comprendida por los municipios de Aqualulco, San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Mexquitic de Carmona, Cerro de San Pedro y Zaragoza, la temperatura media anual es de 17.1°C, ligeramente menor a la reportada para el mismo periodo por INEGI (2002).

Evaporación potencial

Para el cálculo de la evaporación en la zona de estudio, se tomaron los datos de sólo 3 estaciones climatológicas dado que fueron las únicas que contaban con dicha información (IMTA, 2000). En la siguiente tabla se presenta una relación con el valor de la evaporación potencial media anual para cada una de las estaciones consultadas.

Tabla 2.4. Valor de evaporación potencial

Clave	Nombre	Evaporación media anual (mm)
24024	El Peaje, S.L.P	2,039.5
24069	San Luis Potosí, DGE	1,926.3
24111	San Luis Potosí, SMN	1,850.4

Fuente: ERIC II. Extractor Rápido de Información Climatológica., IMTA (2000).

De acuerdo con la información obtenida de las estaciones consideradas, la evaporación media anual en el área de estudio es de 1,939 mm, valor que se considera muy superior a la lámina de precipitación que se presenta en la zona, por lo tanto este valor es representativo de la evaporación potencial, es decir aquella evaporación que ocurriría si toda el área fuera un cuerpo de agua.

Evapotranspiración real

De lo anterior, se convino en calcular la evapotranspiración real para el periodo de años considerado, mediante la fórmula de Turc (ecuación 1), la cual es función de la temperatura promedio anual y de la lluvia media anual (Custodio y Llamas, 1983); de esta manera se consideraron los valores de 17.1°C y el valor medio de precipitación en el periodo que es de 357.6 mm.

$$ETR = \sqrt{P / (0.9 + P^2/L^2)} \dots (1)$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real en mm/año

P = precipitación media en mm/año

L = $300 + 25t + 0.05t^2$

t = temperatura media anual en °C

Sustituyendo los valores medios y desarrollando la fórmula anterior se obtuvo el valor de ETR para el periodo de años comprendido entre los años de 1971 y 2000; dicho valor es de 336.08 mm, mismo que representa el valor real de agua que se evapotranspira dentro del área de estudio, y que como se observa es considerablemente inferior al obtenido a partir de la evaporación potencial en el valle de San Luis Potosí.

2.3 Marco geológico

Existen numerosos trabajos de carácter regional y local que describen los aspectos geológicos de la zona del Valle de San Luis Potosí con diferente grado de detalle. En el presente documento se intenta llevar a cabo una descripción de la geología (características litológicas y estructurales) que tienen mayor influencia en el funcionamiento hidrogeológico del valle.

El Valle de San Luis Potosí fue originado por una fosa tectónica limitada por fallas escalonadas de gran ángulo, con rumbo preferencial N-S, la cual fue rellenada por sedimentos aluviales, lacustres y material piroclástico (Tristán-González, 1986); la emisión de este último no modificó las características principales del relieve, persistiendo las cuencas hidrográficas formadas a principios del Terciario. El zócalo rocoso está formado por derrames lávicos y/o ignimbritas de edad terciaria (Latita Portezuelo, y/o Ignimbrita Cantera).

Las rocas que conforman las sierras que bordean el valle, son predominantemente de tipo efusivo de edad terciaria y material piroclástico que incluye ignimbritas, tobas y brechas de composición riolítica. Alcanzan su máxima expresión en la porción central y suroeste de la sierra de San Miguelito, que constituye el límite occidental de la cuenca (Labarthe *et al.*, 1982).

Esta secuencia cubre rocas sedimentarias marinas del Cretácico Superior (Formaciones Caracol, Soyatal y Cárdenas), las cuales se hallan expuestas únicamente en la frontera oriental (Cerro de San Pedro) y en algunos pequeños afloramientos en forma de lomeríos al noreste del valle, que a su vez sobreyacen a calizas del Cretácico Inferior (Formaciones Cuesta del Cura y La Peña), también expuestas en la margen oriental del valle.

La tectónica cortante se manifiesta por fallas longitudinales que constituyen un sistema con orientación preferencial N40°W, así como uno normal al anterior, mismos que dieron origen a pilares y fosas tectónicas.

2.3.1 Geología regional

La zona de estudio se ubica en la porción central del país, que comprende una amplia región de la provincia fisiográfica de la Mesa Central, que limita al norte y oriente con

la Sierra Madre Oriental, compuesta principalmente por sedimentos plegados del Mesozoico. Al occidente limita con la Sierra Madre Occidental, que consiste de un campo volcánico compuesto predominantemente por rocas félsicas calciálcas que se formaron durante el Terciario Medio; finalmente al sur limita con la Faja Volcánica Transmexicana; el límite entre todos es transicional.

Basamento

En algunas porciones de la Mesa Central afloran rocas sedimentarias del Mesozoico, que constituyen el basamento, las cuales presentan características diferentes dependiendo de la región considerada.

En la zona oriental de la cuenca de San Luis Potosí, las rocas sedimentarias del Mesozoico constituyen dos importantes unidades: la Plataforma de Valles-San Luis Potosí y la Cuenca Mesozoica del Centro de México (Carrillo-Bravo, 1971).

Por un lado, la Plataforma de Valles consiste hacia su base de sedimentos clásticos y evaporíticos del Jurásico, cubiertos por una secuencia evaporítica (Formación Guaxcamá) y por un complejo arrecifal del Albiano-Cenomaniano (Formación El Doctor, Labarthe *et al.*, 1982).

La Cuenca Mesozoica del Centro de México consiste de una secuencia de sedimentos carbonatados y pelíticos, que presentan características de aguas profundas. En la zona de la Sierra de San Pedro, afloran rocas sedimentarias que por sus características (calizas arcillosas de textura microcristalina, estratos delgados, interestratificaciones arcillosas y lentes y nódulos de pedernal café a negro) se asocian con sedimentos de la cuenca.

Cubierta Cenozoica

De los aspectos más importantes de la Mesa Central, destaca la distribución regional de unidades geológicas compuestas por rocas volcánicas de edad correspondiente al

Terciario, que litológicamente abarcan derrames lávicos, ignimbritas y tobas que descansan discordantemente sobre el basamento Mesozoico.

Las unidades geológicas que componen la cubierta de rocas del basamento, están compuestas por: 1) conglomerados continentales del Eoceno, 2) un paquete de rocas volcánicas de composición predominantemente félsica de edad entre 44 y 26 Ma. De igual forma se incluyen extensos depósitos de gravas del Pleistoceno, que en ocasiones están cubiertos por rocas volcánicas de composición máfica.

En la porción central de San Luis Potosí, se ha establecido la existencia de una región donde afloran ampliamente rocas volcánicas del Terciario Medio, región definida como Campo Volcánico de San Luis Potosí (Labarthe *et al.*, 1982), formado por rocas volcánicas en su mayoría félsicas, y que pertenecen a la extensa provincia magmática de la Sierra Madre Occidental.

Considerando la propuesta de Nieto-Samaniego *et al.* (1996), en el análisis a escala 1:250,000, las unidades geológicas de tipo volcánico que afloran en la zona de estudio pueden ser agrupadas en 5 grupos: 1) Volcanismo heterogéneo, 2) Domos riolíticos, 3) Grupo ignimbrítico, 4) Andesitas y basaltos y 5) Basanita; con excepción de la unidad de andesitas y basaltos, las restantes afloran ampliamente en las inmediaciones de la zona de estudio.

Depósitos del Cuaternario

Incluyen todo tipo de material transportado y depositado en las zonas en donde se llevó a cabo el colapsamiento de las fosas tectónicas, el cual está constituido por conglomerados con clastos de rocas ígneas y sedimentarias de la región dentro de una matriz arenosa. Ya hacia el centro del valle, el material conglomerático subyace a un aluvión formado por material más fino en horizontes interdigitados sin compactar tanto de gravas, arenas y arcillas (Aguirre-Hernández, 1992).

2.3.2 Geología local

En la zona del valle de San Luis Potosí afloran rocas sedimentarias del Cretácico, rocas volcánicas del Terciario y sedimentos granulares del Cuaternario. Su distribución espacial se presenta en la Figura 2.3.

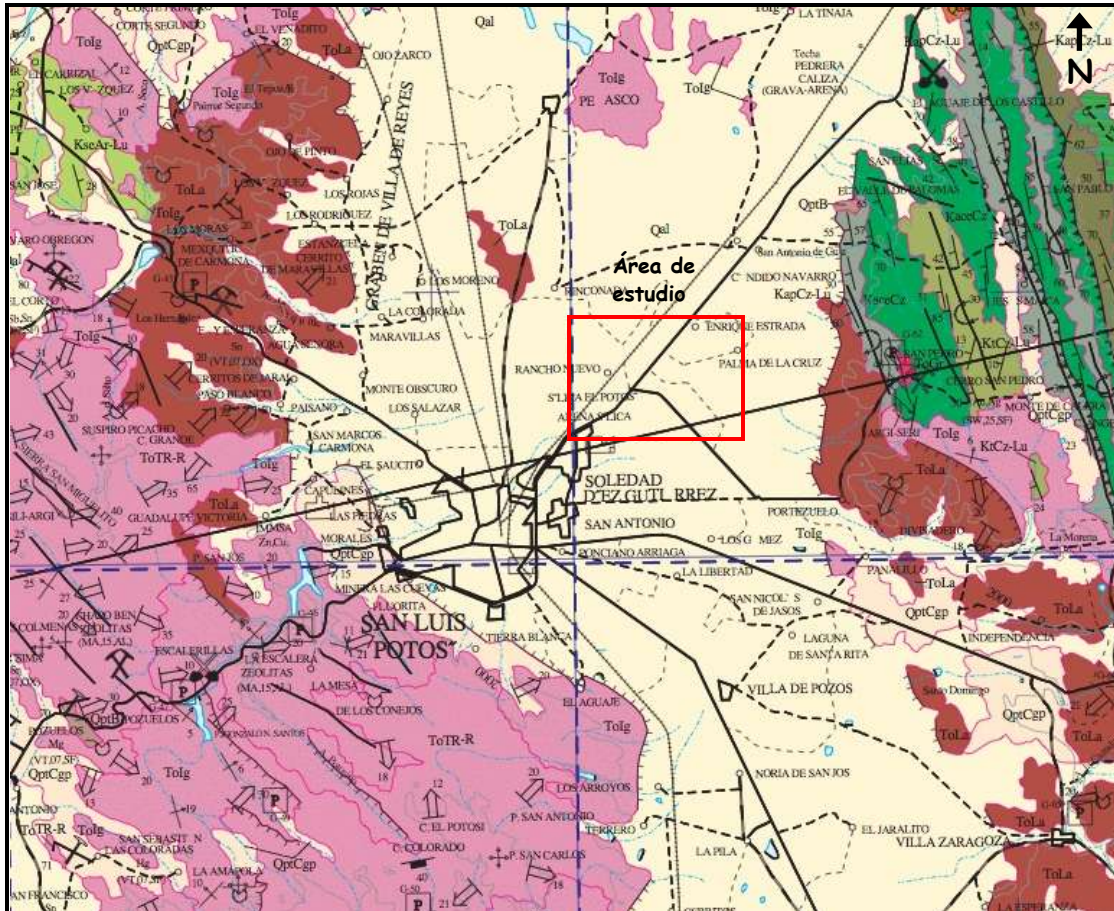


Figura 2.3 Geología del área de estudio (Servicio Geológico Mexicano, 1998)

Rocas del Mesozoico (Cretácico Medio-Superior)

En la porción NE del área de estudio (Sierra de Álvarez), aflora una secuencia sedimentaria del Cretácico (Aptiano-Turoniano) intensamente plegada, constituyendo una serie de anticlinales y sinclinales con eje de rumbo preferencial de orientación N20°W.

Entre las formaciones que afloran en esta región se tiene: Formación La Peña (Kip), Cuesta del Cura (Kcc), El Doctor (Kid) e Indidura (Ksi). Dichas formaciones consisten de calizas arcillosas (en ocasiones carbonosas) de grano fino a medio, de color gris claro a oscuro. Se encuentran en estratos medianos a delgados de 5 a 20 cm y en ocasiones de 20 a 40 cm de espesor, con abundantes bandas y lentes de pedernal, y en algunas ocasiones presentan interestratificación arcillosa.

Sobreyacen con un contacto concordante y transicional a la Formación La Peña y subyacen de manera discordante a los sedimentos clásticos continentales del Paleoceno-Eoceno (Formación Cenicera) y a varias de las unidades de rocas ígneas del Cenozoico.

Del mismo modo, con respecto a la presencia de cuerpos intrusivos, se tiene el pórfido cuarzomonzonítico asociado a la mineralización de sulfuros de Pb, Ag y Au en la Sierra de Álvarez, donde aparecen pequeños diques. El intrusivo consiste de una roca de color gris a pardo rojizo, de textura holocristalina, porfirítica con fenocristales de ortoclasa, plagioclasa y cuarzo. La presencia de pseudomorfos de cuarzo sugiere que los intrusivos son de poca profundidad. Su edad absoluta no ha sido determinada, sin embargo se conoce que es posterior al Cretácico, ya que se encuentra intrusionando a sedimentos calcáreos de ese periodo.

Rocas del Cenozoico (Terciario)

1) Rocas del Paleoceno-Eoceno Medio

La evidencia de actividad volcánica de la región del Campo Volcánico de San Luis Potosí se inicia durante el Eoceno (44 Ma) y está representada por derrames de tipo andesítico, que afloran en zonas aisladas dentro del área de estudio.

Durante las primeras fases de formación del CVSLP, el vulcanismo fue de composición variada (desde intermedio hasta básico), y de la que sólo quedan algunos afloramientos aislados, representados por la Andesita Casita Blanca (44.1 Ma, Labarthe *et al.*, 1982) y por ello se considera que pertenece al Eoceno Medio, por lo que es la roca volcánica más antigua de la secuencia. Las características que presenta esta andesita, sugieren que constituyó estructuras de tipo central, con derrames de lava de poco espesor.

La Andesita Casita Blanca aflora en forma de ventanas aisladas a una escala no cartografiada al oriente de la cuenca de San Luis Potosí, estando caracterizada por ser una andesita de color gris verdoso de textura porfirítica con fenocristales de biotita y plagioclasa. Sobreyace discordantemente sobre los sedimentos marinos del Mesozoico, así como también subyace discordantemente a las diferentes unidades volcánicas del Terciario.

La Formación Cenicera se identifica en buenas exposiciones sobre el arroyo del mismo nombre. Esta incluye una secuencia de horizontes brechosos, conglomeráticos y areniscas poco consolidadas, limos y arcillas que presentan una marcada variación litológica lateral de conglomerados a zonas arcillosas, que han sido identificados en algunos de los pozos profundos perforados en la región de San Luis Potosí.

2) Rocas del Oligoceno Medio-Tardío

Las rocas del Oligoceno Medio-Tardío afloran ampliamente en las Sierras de San Miguelito y Cerro de San Pedro y están representadas por las Formaciones Riolita San Miguelito (Tsm), Latita Portezuelo (Tlp) e Ignimbrita Santa María (Tis) principalmente. Esta unidad consiste en domos y derrames lávicos, generalmente

de color gris claro a café grisáceo, presentando texturas variadas (holocristalina, porfirítica, entre otras) y matriz vítrea constituida por microlitos de plagioclasa.

Algunos derrames lávicos presentan una matriz totalmente desvitrificada, por lo que es común la presencia de estructuras esferulíticas que le dan a la roca un aspecto moteado. Las tobas están compuestas por fragmentos piroclásticos contenidos en una matriz de ceniza o vítrea.

El espesor de esta unidad es del orden de los 600 a 1,300 m, y sobreyacen discordantemente al basamento (formaciones marinas del Mesozoico, Formación Cenicera y Andesita Casita Blanca), y subyacen discordantemente a la unidad ignimbrítica del Oligoceno Tardío.

3) Rocas del Oligoceno Tardío

Las rocas que pertenecen a esta unidad afloran en la Sierra de San Miguelito y en menor proporción en la Sierra de Álvarez. Esta unidad consiste en ignimbritas y riolitas definidas como Ignimbrita Cantera (Tic) y Riolita Panalillo (Tap), con algunas intercalaciones de tobas y lava riolítica; ocasionalmente se observan derrames de basalto intercalado (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996).

Esta unidad consiste de una ignimbrita de color rosa a café rosado, de textura holocristalina, porfirítica y fluidal, con fenocristales de cuarzo y algunas plagioclasas, inmersos en una matriz desvitrificada, con esferulitas rellenas de cuarzo.

Las tobas son de color crema a ligeramente rojizas, depositadas por flujos de ceniza, sin soldar, bien estratificados y gradados, con fenocristales de cuarzo y plagioclasas y algunos fragmentos líticos, en una matriz de grano muy fino.

Su espesor es del orden de 200 a 900 m, y sobreyacen discordantemente a la formación Cenicera y a la Andesita Casita Blanca, así como a la unidad de domos riolíticos definidos por las formaciones Riolita San Miguelito, Latita Portezuelo e Ignimbrita Santa María; del igual forma subyacen a los depósitos continentales del Terciario, como gravas, arenas y tobas (Flores *et al.*, 1990), así como a los depósitos de material aluvial del Cuaternario.

Depósitos del Cenozoico (Cuaternario)

Los depósitos del Cuaternario están representados por sedimentos que afloran en la planicie y pie de monte de las sierras. Dentro del área de estudio están caracterizados por ser un material transportado y depositado en las diversas depresiones existentes de la región (material aluvial).

Está conformado por conglomerados con clastos de rocas ígneas y sedimentarias que van de subredondeados a redondeados, presentando una pobre clasificación y consolidación, hasta clastos de menor tamaño (gravas, arenas, limos y arcillas), pobremente cementados en una matriz arenosa y calcárea. El espesor varía entre los 60 y 350 m. Esta unidad sobreyace a las rocas del Terciario descritas con anterioridad.

2.4 Tipos de suelo

En la región del Valle de San Luis Potosí se pueden encontrar tres tipos de suelos, los Litosoles, Regosoles, y Xerosoles, estos últimos en general muy poco desarrollados debido a que las condiciones climáticas que prevalecen, limitan los procesos asociados con su desarrollo (INEGI, 2002).

Los Litosoles, son suelos cuya distribución se localiza principalmente hacia el oriente del valle de San Luis Potosí, en las cercanías de la sierra de San Pedro (Martínez-

Banda, 2005). Este tipo de suelos presentan un color pardo grisáceo en las zonas donde afloran rocas calizas y en aquellas en donde afloran rocas volcánicas tienen un color más oscuro. En general estos suelos tienen una textura areno-arcillosa.

En el caso de los Regosoles, éstos tienen la característica de ser una delgada capa de suelo que cubre a la roca. Se encuentran distribuidos principalmente en las pendientes de la sierra de San Miguelito, lo cual se refleja en el pequeño espesor que tienen. Son suelos de color rosa a gris, con alta pedregosidad dada por la presencia de fragmentos grandes de tobas riolíticas.

Finalmente, los Xerosoles (del griego *xeros* = seco) como su nombre lo indica, son propios de climas secos, por lo que la actividad biológica que sustentan es mínima. Se encuentran ubicados generalmente en planicies o en pendientes moderadas. Por su escasa cubierta vegetal son susceptibles a la erosión hídrica y eólica (Fortanelli-Martínez, 1999).

El Xerosol, es el tipo de suelo más abundante en la porción central del valle de San Luis Potosí, y es el único tipo que se presenta dentro del área de estudio de este trabajo. Se encuentra distribuido en las partes planas con pendientes menores a 5°, su color predominante en seco es gris rosáceo, de textura media, en ocasiones puede presentar fragmentos de caliza y tiene un espesor promedio de 40 cm.

2.5 Modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero

2.5.1 Antecedentes

Con base en cortes litológicos obtenidos de pozos localizados en la cuenca hidrogeológica del Valle de San Luis Potosí (COTAS y CNA, 2005), se puede conocer la geometría del sistema acuífero, en donde se identifica la configuración del piso rocoso, formado por la Latita Portezuelo y la Formación Cenicera (ambas del Terciario

Inferior), las cuales se encuentran sepultadas a diferentes profundidades dentro del valle por cenizas volcánicas y conglomerados intercalados del Terciario Medio correspondientes a la Formación Panalillo y por material aluvial y lacustre del Terciario Superior y Cuaternario (Ramos-Leal, 1997).

En el subsuelo del valle, existen dos depresiones tectónicas bien marcadas, una en la zona de Peñasco y la otra en la zona de San Luis, siendo la segunda la de mayor extensión, con una superficie de aproximadamente 450 m².

Tradicionalmente se han identificado en el valle de San Luis Potosí la presencia de dos acuíferos principales, un acuífero somero y otro profundo, separados por una capa de arena fina compacta (Streeta y del Arenal, 1961; Carrillo y Armienta, 1989; Carrillo-Rivera, 1992; Cardona-Benavides, 2007).

Sin embargo, en los últimos años se han realizado estudios hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos que demuestran diferencias entre el medio granular y el fracturado del acuífero profundo (Carrillo-Rivera, 2000; Carrillo-Rivera *et al.*, 2002; Cardona-Benavides *et al.*, 2006), y debido a que el acuífero somero en realidad tiene características de un acuífero colgado (Carrillo-Rivera *et al.*, 2002), se considera que el valle de San Luis Potosí contiene un sistema acuífero formado por un acuífero somero, un intermedio alojado en material granular y otro profundo de tipo fracturado (Noyola-Medrano *et al.*, 2009).

2.5.2 Modelo hidrogeológico regional

En el área de estudio el agua subterránea fluye regionalmente a través de los valles de Villa de Reyes y San Luis Potosí con dirección SW-NE. Sin embargo, y como ya se había mencionado anteriormente, la geometría del subsuelo de estos valles presenta irregularidades debido a la presencia de fosas y pilares en su basamento, lo cual modifica localmente las direcciones de flujo regional (Figura 2.4).

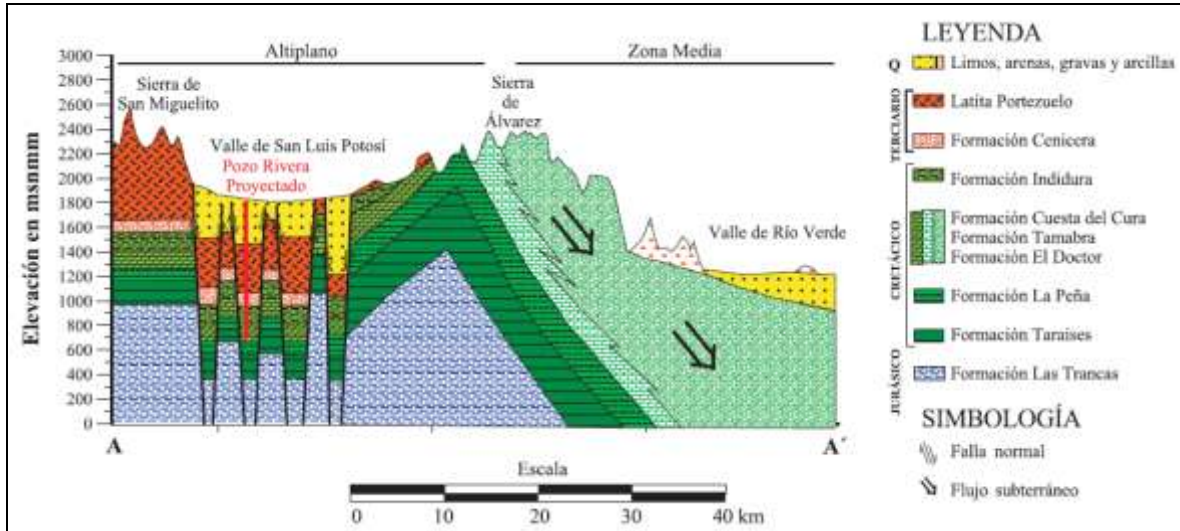


Figura 2.4 Sección esquemática Oeste-Este del valle de San Luis Potosí (Tomada de Noyola-Medrano *et al.*, 2009)

Estudios previos realizados por Carrillo-Rivera (2000), Carrillo-Rivera *et al.* (2002), sugieren un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico en el que se involucra a dos importantes rasgos orográficos (Sierra de Álvarez y Sierra de San Miguelito) como parte importante de la recarga a los acuíferos profundos.

De igual forma, se mencionan tres sistemas de flujo de agua subterránea:

- 1) *Sistema de flujo regional*, que se mueve a través de las rocas volcánicas fracturadas del acuífero profundo, asociado a regiones en donde se ha detectado la existencia de lineamientos y sistemas de fallas, y se establecen zonas de recarga donde el agua subterránea ha viajado una distancia de por lo menos 30 km en la Sierra Madre Oriental.
- 2) *Sistema de flujo intermedio*, que se desplaza en material granular que incluye el relleno de las fosas tectónicas y que representa agua subterránea cuya zona de recarga se limita a la zona de pie de monte en la Sierra de San Miguelito.

3) *Sistema de flujo local*, que se desplaza a través de material granular que tiene una conductividad hidráulica relativamente baja, cuya principal componente es de tipo horizontal y que está representado por agua subterránea del acuífero somero.

Noyola-Medrano *et al.* (2009) mencionan que a nivel regional, la recarga del acuífero del valle de San Luis Potosí, generada a partir de la Sierra de Álvarez (perteneciente a la Sierra Madre Oriental), no es favorable debido a los cambios de facies de las rocas carbonatadas, ya que hacia esta zona del valle son rocas de facies de cuenca (formaciones Indidura y Cuesta del Cura), con un alto contenido de arcilla (caliza arcillosa), la cual funciona más bien como una barrera hidrológica. Por lo tanto, el escurrimiento superficial y subterráneo de la Sierra de Álvarez iría hacia el Golfo de México.

Mismo caso se presenta para las rocas volcánicas que bordean el valle y que componen la Sierra de San Miguelito, las cuales están selladas por minerales de origen hidrotermal, lo que las hace impermeables, limitando la recarga hacia el acuífero (Ramos-Leal *et al.*, 2007).

Sistema acuífero

La hidrogeología del valle de San Luis Potosí ha sido descrita en varios estudios realizados anteriormente, en los cuales se reconocen dos acuíferos denominados tradicionalmente como *somero* y *profundo*; éste último formado en un sistema constituido por material granular y material fracturado, motivo por el cual Noyola-Medrano *et al.* (2009) los diferencia y separa en tres acuíferos (somero, intermedio y profundo).

De los tres acuíferos mencionados, en el presente estudio se considera sólo el **acuífero somero**. Este tiene características de un importante acuífero colgado (Carrillo-Rivera *et al.*, 2002) debido a que es muy superficial, tiene poco espesor

(menos de 40 m), presenta una extensión limitada (sólo en la ciudad de San Luis Potosí y su zona conurbada) y se origina a partir de una capa de material poco permeable. Está formado por depósitos aluviales con limo, arena y grava de aproximadamente 5 a 40 m de espesor (CNA, 1996).

Hidráulicamente se comporta como un acuífero libre, con profundidades al nivel del agua entre 5 y 30 m, y la carga potenciométrica que se ubica entre 1,850 y 1,880 msnm.

Los resultados de las pruebas de bombeo realizadas en el valle de San Luis Potosí reportadas por Carrillo-Rivera (1992), muestran que la conductividad hidráulica horizontal promedio para éste acuífero es del orden de $\sim 2 \times 10^{-4}$ m/s.

Debido a la poca profundidad a la que se encuentra, este acuífero tiene un comportamiento muy dinámico y es sensible a los efectos estacionales con presencia de contaminantes (Carrillo y Armienta, 1989).

Una capa de arenisca fina y compacta, de hasta 60 m de espesor (considerada como la base del acuífero), separa el acuífero somero del intermedio. CNA (1996) reporta para este *acuitardo*, valores de conductividad hidráulica horizontal de $\sim 1 \times 10^{-9}$ m/s.

Recarga al acuífero

Para el acuífero somero se tienen los siguientes tipos de recarga:

- Recarga natural, a partir de la precipitación, que es el agua que se infiltra una vez que satisface los requerimientos de humedad del suelo y evapotranspiración. Es estacional y se estima que es mínima, ya que las condiciones climáticas no permiten que se lleve a cabo.

- Recarga natural indirecta, que se presenta a partir de los escurrimientos producidos por efecto de la precipitación estacional en la zona de pie de monte de las sierras que delimitan el valle.
- Recarga inducida difusa y/o localizada, que es la recarga artificial no intencional originada por fugas de los sistemas de saneamiento, fugas de los sistemas de distribución de agua potable, infiltración a partir de canales y cuerpos de agua que conducen y almacenan las aguas residuales de la zona conurbada, retornos de riego en zonas donde se riega con agua subterránea y retornos de riego en zonas donde se riega con agua residual.

2.6 Procesos geoquímicos que gobiernan la movilidad de contaminantes en el suelo

El suelo es un sistema dinámico, sujeto a cambios en las condiciones de pH, potencial de óxido-reducción y alteraciones graduales producidas en respuesta a cambios en su manejo o a factores ambientales (Chapela-Lara, 2011). Todos estos cambios en las propiedades del suelo, afectan la forma química y con ello la disponibilidad y movilidad de sus diferentes constituyentes, o los aportados por fuentes externas como el agua de riego en zonas agrícolas.

En suelos regados con aguas residuales, la distribución de elementos potencialmente tóxicos también es controlada por las características químicas específicas de cada elemento del efluente.

Propiedades del agua residual como el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica (particulada y coloidal), el nitrógeno potencialmente mineralizable y la fuerza iónica, afectan en forma indirecta la disponibilidad potencial de los elementos traza (Weggler-Beaton *et al.*, 2000, tomado de Chapela-Lara, 2011), mientras que el contenido de metales y la capacidad de sorción de los componentes

orgánicos e inorgánicos, la afectan directamente (Zhou y Wong, 2001, tomado de Chapela-Lara, 2011).

Así, la movilidad se refiere a la capacidad biológica o química de un contaminante para desplazarse en el suelo con el tiempo. Un contaminante puede moverse bajo la influencia de la gravedad, al igual que con líquidos de fase no-acuosa ligeros o densos, o bajo la influencia del flujo de agua subterránea como componentes disueltos (US.EPA., 1999).

La movilidad de compuestos inorgánicos, especialmente los metales, es difícil de determinar debido a la gran cantidad de reacciones que pueden tener dichos compuestos con los diferentes componentes del suelo. La movilidad de los compuestos metálicos está fuertemente influenciada por el tipo de suelo (textura), su pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del mismo, por lo que el tipo de suelo o su composición, es un factor muy importante en las reacciones de fijación de metales pesados.

De acuerdo con lo anterior, el suelo posee la capacidad de filtrar y amortiguar el efecto de sustancias contaminantes que se encuentran suspendidas o disueltas en la solución del suelo. De esta manera se evita que dichas sustancias sean absorbidas por las plantas, o que sean translocadas a los acuíferos o cuerpos de agua cercanos. La filtración puede ser puramente mecánica en el sistema poroso del suelo. También puede ser físico-química, si las sustancias son adsorbidas sobre las superficies activas de las partículas más finas del suelo (principalmente arcilla y materia orgánica), o química si se forman precipitados insolubles en agua. La filtración físico-química y química de un suelo también se conoce como capacidad de amortiguamiento.

La textura del suelo o el tamaño de partículas, es un factor que puede influir en la fijación de metales. En general, los suelos de texturas finas, retienen elementos traza

y metales pesados en mayor medida que los suelos de texturas gruesas. También, los suelos de texturas finas generalmente tienen mayor CIC.

El pH del suelo juega un papel muy importante en la movilidad y retención de metales. Este es un factor de control en las reacciones de sorción-desorción y disolución-precipitación. Además, la CIC del suelo generalmente aumenta a medida que el pH se incrementa.

Los minerales arcillosos contribuyen con las propiedades químicas del suelo debido a su área superficial comparativamente alta y su carga negativa, por lo que son sumamente importantes en las reacciones de adsorción. Gracias a dicha carga superficial, las arcillas tienen una alta CIC y pueden atrapar cationes metálicos por co-precipitación (Chapela-Lara, 2011); el tipo de arcilla mineral presente también es un factor importante. Además, los suelos con un alto contenido de humus u otro tipo de materia orgánica, también poseen una buena capacidad de intercambio.

Muchas reacciones de sorción se llevan a cabo en la superficie de hidróxidos de Fe y Al así como de oxi-hidróxidos, por lo tanto, el contenido de Fe y Al de los suelos se convierte en un factor esencial que gobierna la capacidad de un suelo para la retención de metales pesados (US.EPA., 1984; tomado de US. EPA., 1999).

El potencial de óxido-reducción (potencial redox) del suelo, es muy importante para determinar qué especies de cierto elemento están disponibles para su sorción, precipitación o complejación. En general, las formas reducidas de un metal, son más solubles que las formas oxidadas. Por otro lado, el potencial redox de un suelo, suele ser alterado por la actividad biológica, y un cambio de potencial muchas veces está correlacionado con cambios en el pH. Condiciones reductoras pueden ser asociadas a pH bajos, dando como resultado la formación de CO_2 y ácidos orgánicos como producto

de la degradación microbiana de la materia orgánica. Las condiciones anaeróbicas podrían aumentar la movilidad de metales de efluentes del sistema (US. EPA., 1999).

Los metales añadidos a un sistema suelo/agua subterránea, experimentarán procesos de fijación y adsorción, los cuales afectarán de manera directa la movilidad de dichos metales. Los procesos de fijación incluyen entre otros a la precipitación, la cual tiene el impacto más significativo en el destino y movilidad de los metales. Los procesos de sorción, también juegan un papel importante en dicha movilidad.

A continuación se presentan dos de los procesos que afectan en mayor medida la movilidad y disponibilidad de elementos potencialmente tóxicos en el suelo.

Precipitación

La precipitación de una especie metálica determinada depende del Eh (potencial redox) y el pH del sistema (suelo/agua subterránea), así como de la presencia de aniones y cationes que excedan la constante del producto de solubilidad. Cuando el Eh y pH se usan juntos, se pueden elaborar diagramas Eh/pH para un metal determinado, los cuales indican las especies de dicho metal que pueden existir bajo diferentes condiciones de Eh y pH.

La precipitación de un metal también depende de la presencia de aniones que provoquen la formación de compuestos inorgánicos insolubles. La constante del producto de solubilidad, es un indicador de la tendencia de un compuesto dado para formarse en la solución, sobre la base de las concentraciones de los cationes y aniones individuales de un producto. Otros cationes también pueden estar presentes en el sistema, los cuales compiten por los aniones precipitando a menores concentraciones (US. EPA., 1999).

Adsorción

La adsorción está definida como el proceso a través del cual una sustancia química reacciona con el límite común entre dos fases contiguas. Las reacciones de adsorción incluyen atracción catiónica, formación de complejos, y adsorción/exclusión de aniones.

A menudo la adsorción de metales ocurre en presencia de arcillas. Las superficies de las arcillas poseen cargas negativas, mientras que la mayoría de los metales poseen cargas positivas. Así, la arcilla tenderá a remover los metales de la solución, por el proceso de intercambio catiónico. Los iones metálicos también pueden formar complejos con las moléculas o iones que contienen pares libres de electrones. La molécula o aniones con los cuales un metal forma el complejo, se denomina ligando; dos ligandos orgánicos importantes son los ácidos húmicos y fúlvicos (US. EPA., 1999).

Las partículas del suelo también pueden tener cargas positivas en superficie. Los bordes de minerales arcillosos aluminosilicatados, las superficies de los óxidos y la materia orgánica pueden tener cargas positivas, dependiendo del pH del medio que los rodea. Las cargas superficiales positivas, entonces tendrán la capacidad de acumular especies aniónicas tales como fosfatos, arseniatos, sulfatos, boratos, ácidos silícicos, fluoruros y nitratos.

Sin embargo, la mayoría de las partículas del suelo están principalmente cargadas negativamente. De manera general, los componentes aniónicos en solución son repelidos por las superficies cargadas negativamente. Esta repulsión conduce a un proceso denominado exclusión aniónica, que incrementa la movilidad de algunos compuestos (US. EPA., 1999). Por lo tanto, especies aniónicas como fosfatos, sulfatos, fluoruros o nitratos migrarán con mayor rapidez a través del suelo, debido a las fuerzas de repulsión presentes.

3. MÉTODO DE TRABAJO

3.1 Actividades de campo

3.1.1 Visita de reconocimiento y censo de norias

Con la finalidad de tener un panorama general de las condiciones del área de estudio, se llevó a cabo una visita de reconocimiento en la zona para conocer las características del sitio y así poder llevar a cabo la planeación de las actividades subsecuentes a realizar durante el trabajo de campo.

Como primera actividad, y con base en los datos de la distribución de aprovechamientos dentro del área de estudio, obtenida en diferentes dependencias durante la etapa de recopilación y análisis de información, se visitaron varias norias en las cuales se midió la profundidad del nivel del agua y se seleccionaron otras en las que además se tendría la posibilidad de obtener una muestra de agua subterránea durante la segunda visita de campo. Una vez seleccionados los sitios en donde se llevaría a cabo el muestreo, se contactó a los propietarios de las norias y se acordó con ellos la realización de una visita subsecuente para llevar a cabo la toma de muestras.

De igual forma, con base en la distribución y localización real de las norias, se modificó el área de estudio desplazándola hacia el sur, esto debido a la falta de puntos de muestreo al norte de la zona que permitieran tener una densidad y distribución adecuada para los objetivos del presente estudio.

Cabe mencionar que en algunas de las norias visitadas durante esta etapa, se tomaron niveles piezométricos, muestras de agua y se midieron varios parámetros de campo tales como pH, conductividad eléctrica y contenido de CO_2 (Foto 3.1 Y 3.2), esto con la finalidad de conocer y aprender las técnicas, procedimientos y actividades que se llevarían a cabo durante la etapa de muestreo.

Por otro lado, se llevaron a cabo varios recorridos para identificar y definir los sitios de muestreo de suelo y agua residual de acuerdo con su localización y distribución dentro del área de estudio, tomando en cuenta la fuente de procedencia de los canales de distribución en el caso del agua residual, y la antigüedad de las áreas agrícolas regadas con dicha agua en el caso de las muestras de suelo.



Fotos 3.1 y 3.2 Trabajo de campo durante la visita de reconocimiento

3.1.2 Muestreo de agua subterránea, suelo y agua residual

El trabajo de campo para el muestreo de agua subterránea, suelo y agua residual se llevó a cabo en dos partes. La primera etapa del trabajo de campo consistió en realizar el muestreo de agua subterránea en las norias seleccionadas durante la visita de reconocimiento, así como también en definir, con base en las observaciones de campo, los sitios definitivos para el muestreo de la segunda etapa de campo, en la cual se llevó a cabo tanto el muestreo de suelo como el de agua residual. A continuación se hace una breve descripción de las actividades realizadas durante los trabajos de campo correspondientes a la etapa de muestreo.

Muestreo de agua subterránea

De acuerdo con la información obtenida durante el análisis de las bases de datos proporcionadas por dependencias federales y estatales (CNA, INTERAPAS, COTAS) con la ubicación de norias y aprovechamientos localizados en los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, así como con los resultados de la visita de reconocimiento realizada dentro del área de estudio, se seleccionaron 26 norias en donde se llevó a cabo el muestreo de agua subterránea, realizado en el mes de noviembre de 2008.

Las actividades realizadas durante los trabajos de muestreo consistieron en tomar las coordenadas del sitio con la ayuda de un GPS portátil modelo e-Trex marca Garmin, y localizarlo en las cartas topográficas escala 1:50,000 editadas por el INEGI (cartas F14-A74 y F14-A84). Con dicha información se generó un mapa base con la distribución de los sitios de muestreo dentro del área de estudio, mismo que se presenta en la Figura 3.1

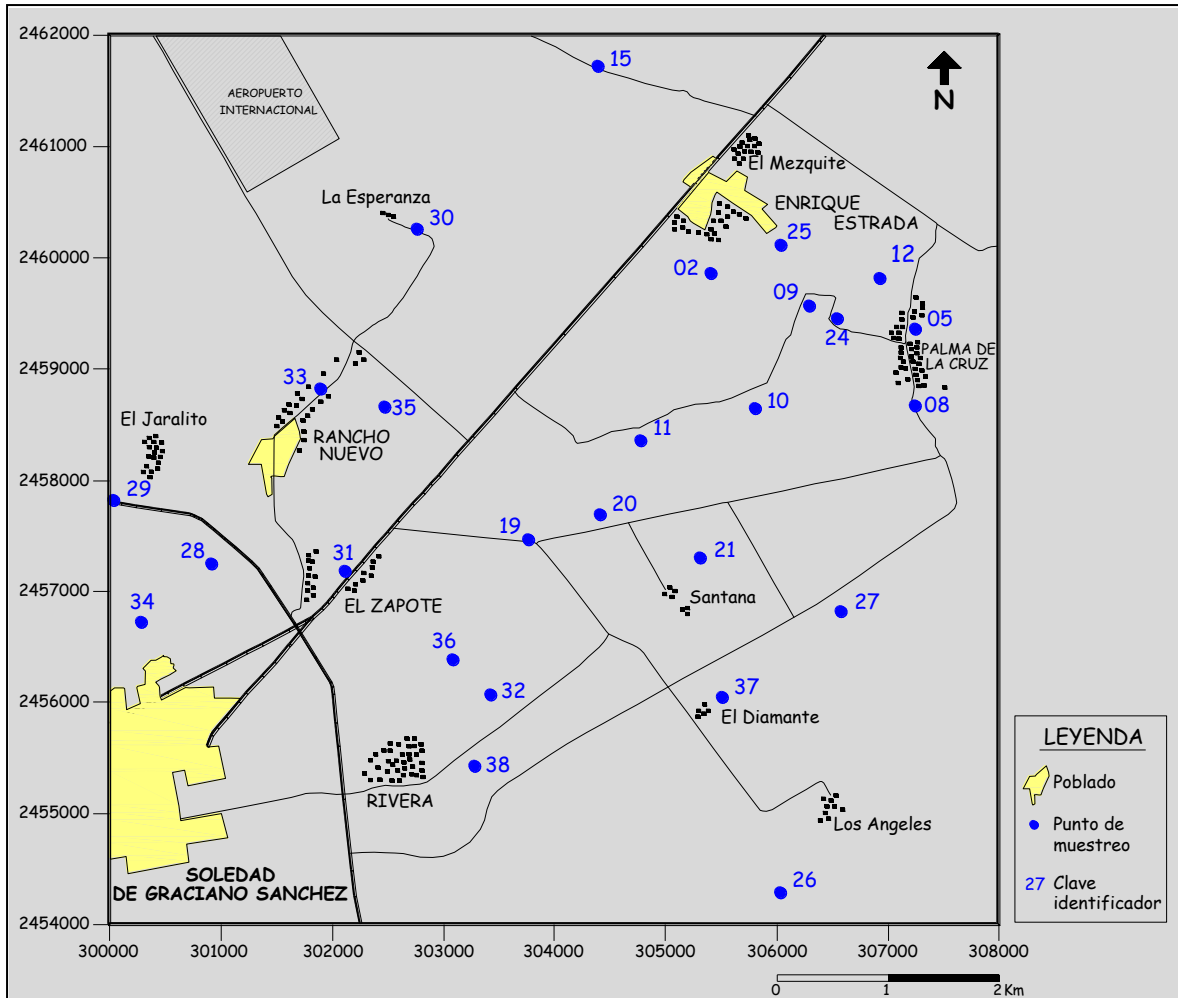


Figura 3.1 Localización de norias seleccionadas para el muestreo de agua subterránea

Una vez ubicado el punto de muestreo, se tomaba la profundidad del nivel estático o dinámico del agua (según fuera el caso), y se entrevistaba al propietario del aprovechamiento para conocer algunos datos de la noria tales como: profundidad total, modo de operación, uso del agua y si alguna dependencia la había muestreado anteriormente; adicionalmente, se anotaba si existía alguna fuente de contaminación cercana a la noria. Toda esta información se registraba en un formato diseñado para tal efecto.

Al mismo tiempo, se colocaban y preparaban los aparatos para medir algunos parámetros *in situ* tales como: temperatura y pH medidos a través de un

potenciómetro portátil marca AquaLytic modelo pH24, la conductividad eléctrica con ayuda de un conductivímetro portátil marca AquaLytic modelo Cd19, así como también se utilizó un kit de campo de la marca LaMotte para la determinación de la alcalinidad (Foto 3.3).



Foto 3.3 Instalación de los equipos de medición

Una vez instalados los aparatos de medición, se extraía agua de la noria a través de un muestreador manual, procurando que el contenedor de agua entrara por lo menos 20 cm por debajo de la superficie del espejo de agua, esto con la finalidad de que el agua que se recolectara de cada noria, no tuviera basura ni hojarasca y mantuviera las condiciones de oxigenación representativas del acuífero, evitando así los efectos del contacto con la atmósfera.

Es importante mencionar que para poder tomar la muestra de agua, era necesario que la noria hubiese estado bombeando agua por lo menos durante 12 horas y que además no llevara más de 6 horas sin trabajar, para que la muestra de agua fuera fresca y representativa de las condiciones y características del acuífero, eliminando alguna condición de estancamiento de la noria. Cuando éstas no reunían dichas

características, se le solicitaba al propietario que pusiera a trabajar la bomba, y se acordaba con él regresar un par de horas después, aunque esto no siempre fue posible.

A partir del momento en que se extraía la muestra de la noria, se medía la temperatura y el pH, después se medía la conductividad eléctrica y se tomaba una pequeña cantidad de agua para determinar por medio de titulación la alcalinidad de la muestra. Los resultados de dichas mediciones, se presentan en el capítulo 4 de este documento.

Después de medir los parámetros de interés, se procedía con el llenado de cuatro frascos de polietileno de 60 mL, debidamente etiquetados para su identificación y análisis de cationes, aniones, metales y de parámetros como NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} y SAAM mediante el colorímetro en campo. Previo a llenar los frascos, la muestra de agua se filtraba haciéndola pasar a través de una membrana de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal 0.22μ marca Millipore, la cual se colocaba en un porta filtro o SWINEX marca Millipore de 25 mm de diámetro que se acoplaba en una jeringa también lavada en el laboratorio (Foto 3.4).

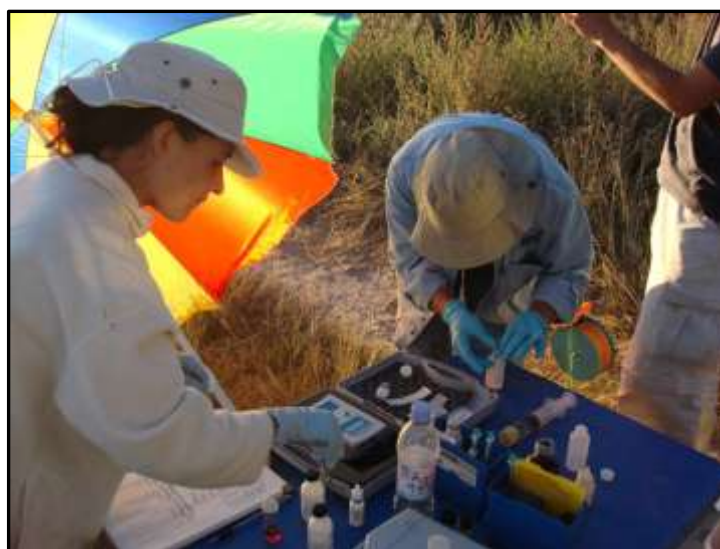


Foto 3.4 Procedimiento de filtrado y llenado de muestras de agua subterránea

Ya que los frascos eran llenados, en el caso de las muestras para análisis de cationes y metales, se les agregaban un par de gotas de HNO_3 de tal forma que ésta quedara en una solución al 2% de HNO_3 (guardando la proporción 2/100 ml de muestra) para que fuera almacenada y conservada a un pH <2, con la finalidad de mantener en solución los solutos de interés hasta el momento de su análisis en el laboratorio. Finalmente las muestras eran tapadas, selladas y colocadas en contenedores aislantes con hielo en su interior, para conservar las muestras a una temperatura aproximada de 4 °C hasta su análisis en el laboratorio (de acuerdo con lo recomendado por APHA, AWWA, WPCF, 2005).

Adicional a estas muestras, se tomaba una más para la determinación de coliformes fecales y totales, mismas que eran entregadas y analizadas en el Laboratorio de Calidad del Agua del INTERAPAS en San Luis Potosí, el mismo día del muestreo.

Muestreo de suelo

Para el muestreo de suelo, además de la visita de reconocimiento, se recopiló y analizó la información disponible en artículos científicos, estudios previos realizados en la zona, cartas edafológicas editadas por CETENAL y la base referencial mundial del recurso del suelo (FAO, 2000).

Para definir los sitios de muestreo, se consideraron las unidades de suelo presentes dentro del área de estudio y las zonas agrícolas regadas con agua residual de acuerdo con la fuente y procedencia de ésta (canales de distribución), así como también el número de años que tenían dichas zonas regándose con este tipo de agua.

Así, se seleccionaron 2 sitios para el muestreo de suelo, en los cuales se realizó la correspondiente descripción y caracterización del perfil; su localización y distribución dentro del área de estudio se muestran en la Figura 3.2.

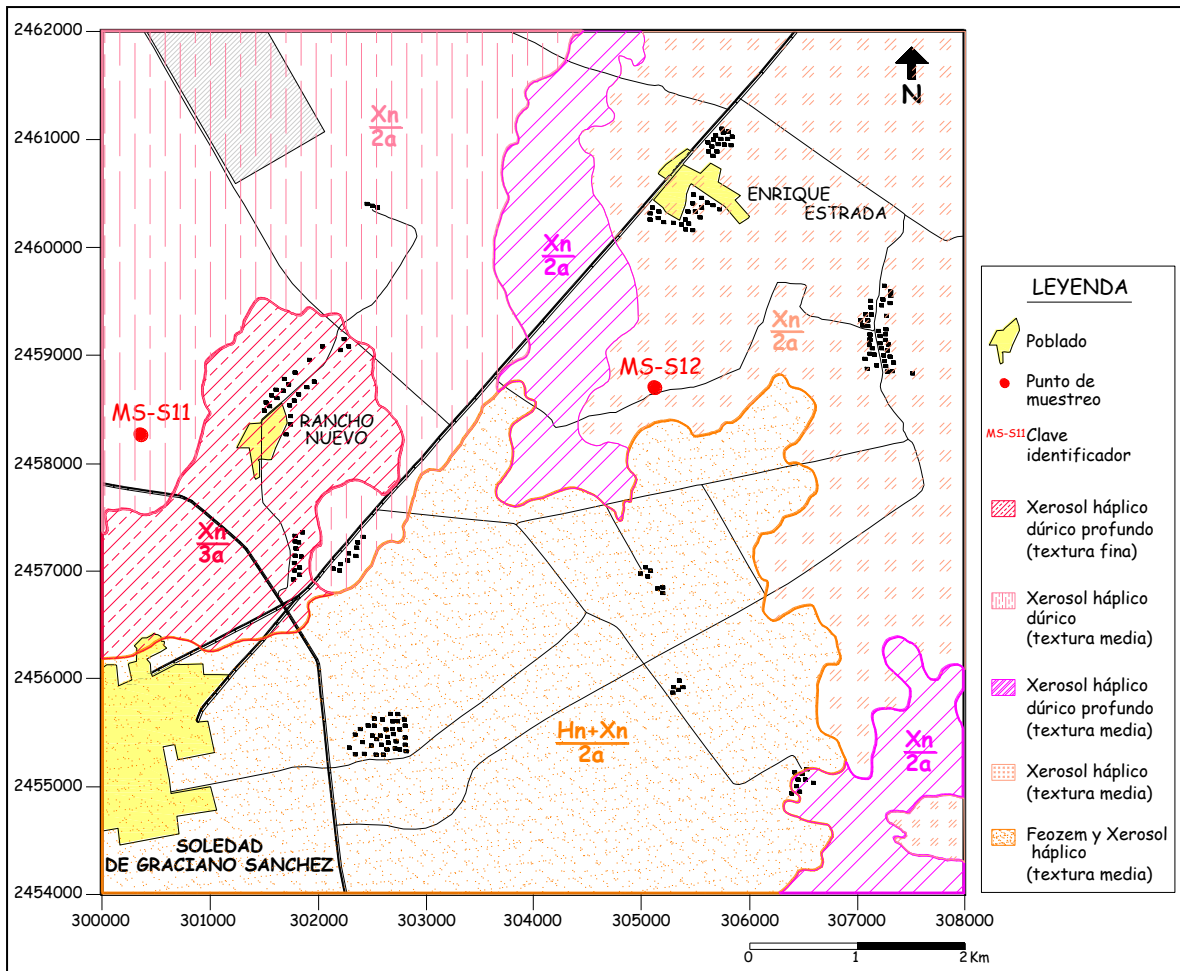


Figura 3.2 Unidades de suelo y localización de sitios de muestreo (CETENAL, 1973)

Una vez elegido el punto de muestreo, se excavaba el perfil y se limpiaba la pared del mismo, con la finalidad de identificar los diferentes horizontes que lo conformaban.

Después se llevó a cabo la caracterización del perfil, de acuerdo con el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al.*, 2006), considerando algunas propiedades importantes tales como: textura, pH, porcentaje de materia orgánica, humedad, estructura, estabilidad de agregados, poros, densidad aparente, densidad de raíces y tipo de límite, para finalizar con la clasificación de cada uno de los horizontes; los resultados de esta caracterización se presentan en el capítulo 4 de esta tesis.

Al terminar la descripción del perfil, se tomaba una muestra de suelo de varios puntos a lo largo del horizonte, se colocaba en una bolsa de plástico previamente etiquetada y se depositaba en un contenedor para su almacenamiento. Esta misma operación se repitió con cada uno de los horizontes definidos.

Muestreo de agua residual

El muestreo de agua residual se llevó a cabo en 5 sitios correspondientes a canales de distribución, los cuales representan aportes de diferentes afluentes provenientes de la zona urbana e industrial de San Luis Potosí (Figura 3.3), entre los que se encuentran: canal General 3 y 4, canal Río Santiago, canal Industrias II, canal Enrique Estrada y canal San Felipe; todos ellos atraviesan el área de estudio y son utilizados para regar las zonas agrícolas dedicadas al cultivo de alfalfa y maíz principalmente.

Los criterios empleados para seleccionar los puntos de muestreo fueron: la localización de los canales de distribución de agua residual dentro del área de estudio, la distribución de las zonas agrícolas regadas con dichos canales, y la localización de los sitios de muestreo de agua subterránea.

Es importante mencionar que con la finalidad de tomar en cuenta las posibles variaciones y cambios de concentración de solutos en el agua residual, asociados a fluctuaciones en los volúmenes de descarga por cambios en la actividad doméstica e industrial durante una jornada, se llevaron a cabo dos muestreos por sitio a diferente hora del día.

El procedimiento para tomar las muestras de agua residual fue muy similar al realizado para las muestras de agua subterránea. Una vez elegido el punto de muestreo se instalaban los aparatos de medición de temperatura, pH y conductividad eléctrica, se

etiquetaban los frascos de polietileno de 60 mL para las muestras de cationes, aniones, metales y colorímetro.

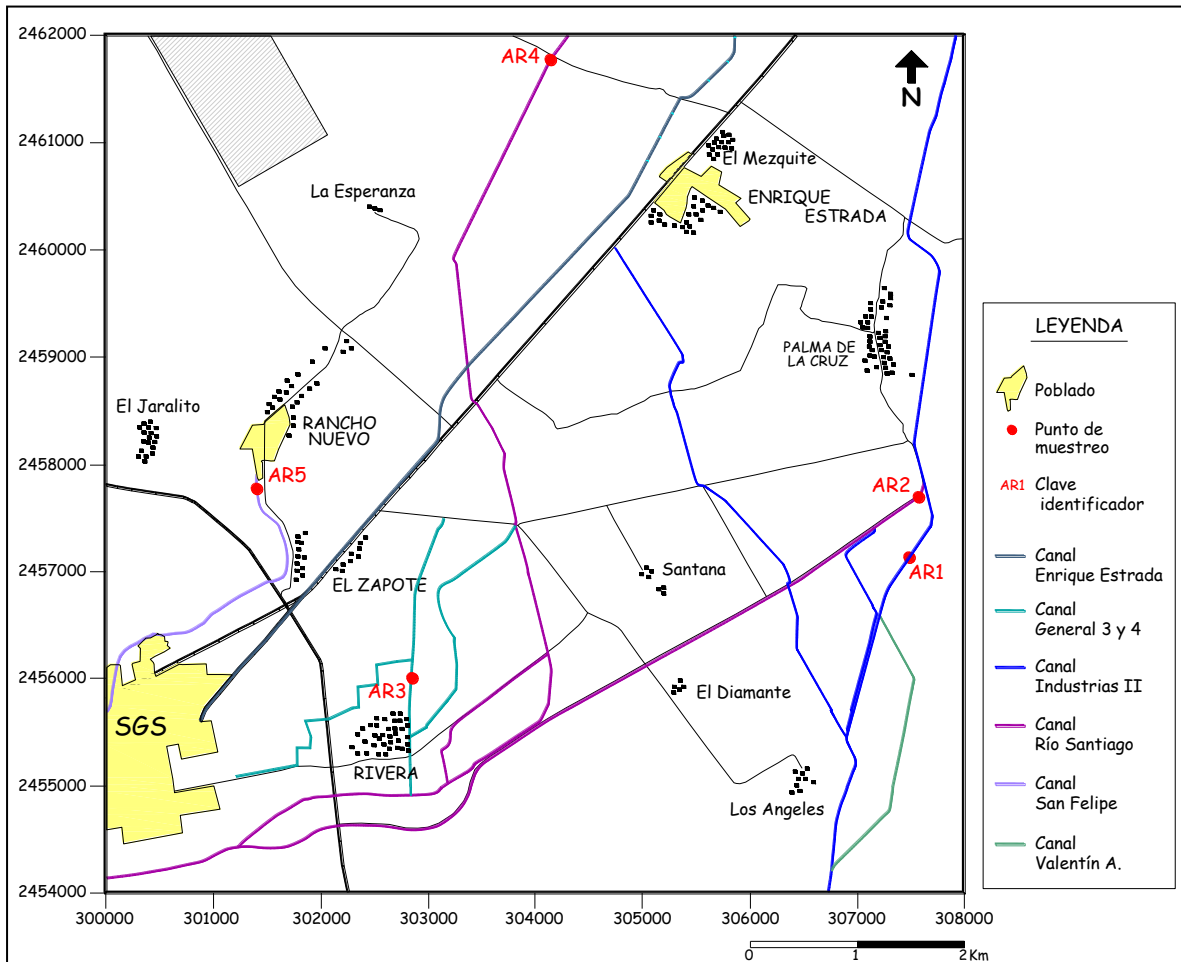


Figura 3.3 Localización de sitios de muestreo de agua residual

Para extraer la muestra de agua del canal se empleó un recipiente de plástico de aproximadamente 250 ml, conectado a un tubo de PVC de 3" de diámetro y 2 m de longitud (Dipper, marca Cole Palmer) que se introducía aproximadamente a la mitad de la profundidad total del tirante de agua en el canal (Foto 3.7).



Foto 3.7 Muestreo de agua residual en el canal Río Santiago

Después de sacar el agua del canal, se colocaba en un recipiente, se introducían los electrodos para medir temperatura, pH y conductividad eléctrica. Los resultados de la medición de estos parámetros se presentan en el capítulo 4 de este documento.

Para poder llenar las botellas de polietileno, por el gran contenido de sólidos en suspensión, fue necesario prefiltrar la muestra haciéndola pasar primero por un filtro de fibra de vidrio de 1.0 μm de tamaño de poro y 25 mm de diámetro marca Millipore colocado en un porta filtro (SWINEX) que se acoplaba a una jeringa de 60 ml.

Una vez prefiltrada la muestra, se hacía pasar por un filtro de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal 0.22 μm marca Millipore. Ya que los frascos eran llenados, en el caso de las muestras para análisis de cationes y metales, se les agregaban un par de gotas de HNO_3 de tal forma que ésta quedara en una solución al 2% para que la muestra fuera almacenada y conservada a un pH <2, con la finalidad de mantener en solución los solutos de interés hasta el momento de su análisis en el laboratorio.

Finalmente las muestras eran tapadas, selladas y colocadas en contenedores aislantes con hielo en su interior, para conservar las muestras a una temperatura aproximada de 4 °C para mantenerlas en buen estado antes de su análisis en el laboratorio (APHA, AWWA, WPCF, 2005).

3.1.3 Medición de parámetros de campo

Con la finalidad de obtener valores representativos de las condiciones originales del agua subterránea y residual, se midieron *in situ* algunos parámetros tales como temperatura, pH, conductividad eléctrica y alcalinidad. Los resultados de éstas mediciones se presentan en tablas en el capítulo 4, de acuerdo con los temas correspondientes a la realización de dicha actividad para cada muestreo (agua subterránea y agua residual, respectivamente).

- Temperatura (T°).- Este parámetro se midió con un termómetro de mercurio y uno digital incorporado en el potenciómetro.
- Potencial de hidrógeno (pH).- La medición de este parámetro se llevó a cabo a través de un potenciómetro digital portátil marca AquaLytic modelo pH24, previamente calibrado con la técnica de tres puntos de pH conocido (4.0, 7.0 y 10.0).
- Conductividad eléctrica (CE).- Este parámetro se midió con un conductivímetro portátil marca AquaLytic modelo Cd19 con ajuste manual de temperatura. Para calibrar el equipo se utilizó una solución de calibración de conductividad eléctrica de 1413 µS/cm a 25 °C marca Hanna.
- Alcalinidad total.- Este parámetro también es necesario medirlo en campo, ya que existen procesos como la disolución de gases, oxidación de metales y la

precipitación de CaCO_3 que pueden modificar la alcalinidad en las muestras de agua subterránea si éste no se mide de inmediato.

Para medirlo se utilizó el kit de campo 4491-DR (LaMotte), el cual emplea la técnica de titulación para determinar la alcalinidad total de la muestra obtenida en ppm de CaCO_3 . Para ello se tomaban 5 ml de muestra filtrada en un recipiente graduado, se le añadía una tableta indicadora (verde de bromocresol - rojo de metilo) hasta disolverla. Después se hacía la titulación con una solución de H_2SO_4 al 0.1% + H_2O , hasta que el agua cambiaba de color verde-azul a morado, lo que marcaba el fin de la titulación.

Adicionalmente a los parámetros anteriormente descritos, después de la jornada del trabajo de campo, en el campamento se medían los valores de concentración de algunos iones, que por sus tiempos de preservación tan cortos (APHA, AWWA, WPCF, 2005), no permitían ser preservados para que su análisis se hiciera hasta llegar al laboratorio. Tal es el caso del ión amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), fosfato (PO_4^{3-}) y sustancias activas al azul de metileno (SAAM).

La determinación de dichos iones se hizo a través de una técnica colorimétrica utilizando un colorímetro modelo Smart 2 (LaMotte), cuyo principio de funcionamiento se basa en medir fotoeléctricamente la cantidad de luz de color absorbida por una muestra de agua de un color particular a la que se le añadió cierto reactivo en particular, en referencia a una muestra sin color (blanco).

La metodología utilizada para la determinación de los cuatro parámetros mencionados anteriormente, fue la que viene indicada en el "Manual de instrucciones para pruebas" v.2.3 1/7 (LaMotte, 2001); los resultados de dichas mediciones se presentan en el capítulo 4 de este documento.

Por otro lado, en lo que se refiere a las muestras de suelo, para la caracterización de los perfiles, los parámetros correspondientes al levantamiento en campo y la evaluación ecológica, se determinaron con ayuda del Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al.*, 2006).

Así, del levantamiento en campo, características tales como la textura, color, pH, contenido de materia orgánica y CaCO_3 , humedad, estructura, poros y densidad aparente, se obtuvieron con base en la apreciación de las características morfológicas del suelo. La metodología consistió en realizar diferentes pruebas a la muestra en cuestión, a través de técnicas de simple inspección al tacto, visuales y pruebas físicas, que son evaluadas a través de tablas y/o diagramas contenidos en el texto de dicho manual.

Con respecto a los parámetros correspondientes a la evaluación ecológica, tales como volumen total de poros (VPT), capacidad de aireación (CA), capacidad de agua disponible (dCC), capacidad de campo (CC), conductividad hidráulica (Kf), capacidad de intercambio catiónico (CIC), nitrógeno total (Nt) y nitrógeno disponible (Nd), estos se determinaron a través una serie de fórmulas, cálculos, tablas y nomogramas, también contenidos en el manual (Siebe *et al.*, 2006).

La evaluación de todos y cada uno de estos parámetros, se realizó de una forma general, con el fin de establecer una primera aproximación de las características del suelo presente dentro del área de estudio. Los resultados de la caracterización de los dos perfiles de suelo, se presentan en el capítulo 4 del presente documento.

3.2 Actividades de laboratorio

Una de las actividades realizadas en el laboratorio, previo al trabajo de campo, fue la preparación del material que se utilizaría durante la campaña de muestreo tanto de agua subterránea como de agua residual (botellas de plástico, jeringas y portafiltros). Para ello, todo el material fue lavado y preparado en el Laboratorio de Química Ultra Pura (LABQUP) del Instituto de Geología de la UNAM.

3.2.1 Determinación de parámetros físico-químicos en muestras de agua residual y subterránea

Después de realizar el trabajo de campo, las muestras de agua fueron almacenadas en refrigeración para mantenerlas a una temperatura constante de 4 °C. Para estas muestras se hicieron análisis de cationes, aniones (LEA, Instituto de Geología, UNAM) y algunos metales tales como: Cd, Cr, Cu, Fe y Pb (Laboratorio ICP-MS, Instituto de Geología, UNAM).

Dados los tiempos de preservación de los iones (APHA, AWWA, WPCF, 2005), las primeras muestras en ser analizadas fueron las de aniones y después las de cationes y metales.

En la Tabla 3.1 se presenta una relación de los métodos de análisis utilizados para la determinación de dichos parámetros.

Tabla 3.1 Métodos analíticos utilizados en muestras de agua residual y subterránea

Parámetro	Método de análisis	Referencia o Equipo
$\text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-$	Titulación	American Society for Testing and Materials D 1067-92
Dureza (CaCO_3)	Calculada (fórmula de dureza)	Custodio E. y Llamas M. R. (1983)
$\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{SiO}_2$ (*)	Espectrofotometría de absorción atómica	Espectrofotómetro Perkin Elmer (Mod. 3110)
Na^+, K^+	Flamometría	Flamómetro Corning (Mod. 400)
$\text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{NO}_2^-, \text{NO}_3^-, \text{PO}_4^{3-}, \text{SO}_4^{2-}$	Cromatografía de líquidos	Cromatógrafo de iones y detector de conductividad (Marca WATERS)
$\text{Cd}, \text{Cr}, \text{Cu}, \text{Fe}, \text{Pb}$	Espectrometría de masas por plasma inductivamente acoplado	Espectrómetro ICPMS (Mod. Agilent 7500ce)
Coliformes fecales y totales (*)	Sustrato cromogénico	NOM-181-SSA1-1998

(*) El SiO_2 , coliformes fecales y coliformes totales sólo se analizaron en muestras de agua subterránea.

Cabe mencionar que, para la determinación de cationes y aniones, en primer término las muestras fueron preparadas, realizando el número de diluciones necesarias para su medición. En el caso de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , dichas diluciones se realizaron añadiendo óxido de lantano al 0.5% a una cantidad de muestra de agua conocida, mientras que para los iones Na^+ y K^+ , las diluciones se hicieron añadiendo cloruro de cesio al 0.1%.

Por otro lado, en lo que se refiere a los aniones, las diluciones se realizaron agregando una solución de gluconato-borato de sodio y acetonitrilo.

De igual forma, es importante mencionar que en la técnica cromatográfica, la separación se llevó a cabo utilizando una columna IC-Pack HR-Waters (4.6 mm de diámetro y 75 mm de longitud) y una mezcla de gluconato borato de sodio al 1.3M en 12% de acetonitrilo a pH 8.5 como fase eluente de los iones retenidos en la columna, todo esto a un flujo de 1 ml min^{-1} y controlando la temperatura a $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

A partir de los resultados de los análisis y con la finalidad de establecer un control de calidad de los trabajos de campo y laboratorio, se llevó a cabo el cálculo del error analítico de cada una de las muestras a través del balance iónico.

Dicho balance se fundamenta en la condición de neutralidad eléctrica (Freeze y Cherry, 1979), es decir, que el total de las cargas de los cationes y aniones (expresadas en meq/L), no deben rebasar un porcentaje denominado error.

El error en el balance iónico se establece a partir de la diferencia de cationes y aniones entre la suma de los mismos, expresado en porcentaje de acuerdo con la ecuación 2 (Freeze y Cherry, 1979).

$$\% \text{ Error} = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} \times 100 \dots (2)$$

Con base en la ecuación anterior, se tomó como criterio un porcentaje de error máximo de 10% (Custodio y Llamas, 1983), estableciéndose que aquellas muestras que rebasaron este límite, no fueran consideradas para fines de la interpretación hidrogeoquímica. Los resultados de los análisis realizados tanto a las muestras de agua residual como subterránea, se presentan en el capítulo 4 de esta tesis.

3.2.2 Determinación de parámetros físico-químicos en muestras de suelo

En el caso de las muestras de suelo, primero se llevó a cabo el secado y tamizado (apertura con diámetro de 2 mm) de 8 muestras de suelo (procedentes de los dos perfiles de suelo con 4 horizontes cada uno). Esta actividad se llevó a cabo en el cuarto de preparación de muestras del Laboratorio de Edafología Ambiental (Instituto de Geología, UNAM).

Una vez secas y tamizadas, se procedió a determinar el pH, conductividad eléctrica, textura, cationes y aniones solubles en agua, capacidad de intercambio catiónico, carbono total y su composición mineralógica a través de la técnica de difracción de rayos X. En la Tabla 3.2 se muestra una relación de los parámetros determinados, así como el método y equipo utilizado para su análisis.

Tabla 3.2 Métodos analíticos utilizados para la determinación de parámetros en muestras de suelo

Parámetro	Método de análisis	Referencia y/o Equipo
pH	Extractos del suelo	Presop MET-004 (LEA, 2001) Potenciómetro AquaLytic (Mod. pH24)
CE	Extractos del suelo	Presop MET-004 (LEA, 2001) Conductímetro AquaLytic (Mod. Cd19)
Textura	Método de Bouyocos	Presop MET-003 (LEA, 2001)
CIC	Cationes intercambiables por extracción con acetato de amonio 1N y pH 7	Presop MET-007 (LEA, 1999)
C _T	Método de combustión	Presop MET-043 (LEA, 2007) Analizador elemental CNHS Perkin Elmer (Mod. 2400)
Composición mineralógica	Difracción de Rayos X	Difractómetro Shimadzu XDR6000
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , F ⁻ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	Iones solubles de los extractos del suelo	Cromatógrafo de iones y detector de conductividad (Marca WATERS)

CE (conductividad eléctrica); CIC (capacidad de intercambio catiónico); C_T (Carbono total); Presop (Procedimiento estandarizado de operación); LEA (Laboratorio de Edafología Ambiental, Instituto de Geología, UNAM).

Es importante mencionar, que en lo que se refiere a la determinación de la capacidad de intercambio catiónico, la medición de las concentraciones de los iones Ca²⁺ y Mg²⁺ se realizaron por espectrofotometría de absorción atómica, mientras que para el Na⁺ y K⁺, éstas se realizaron por flamometría.

Los resultados de los análisis realizados a las muestras de suelo, se presentan en el capítulo 4 de este documento.

3.3 Actividades de gabinete

3.3.1 Recopilación y análisis de información

Para la realización del presente estudio, en primer término se recopiló y analizó la información existente de índole geográfica, topográfica, climatológica, edafológica, geológica e hidrogeológica correspondiente al área de estudio.

De igual forma se solicitaron y consultaron las bases de datos disponibles con la localización de aprovechamientos de agua subterránea (norias), en dependencias federales (CNA) y estatales (INTERAPAS y COTAS, SLP), así como la información disponible del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). Dicha información sirvió para identificar el número y distribución de las norias ubicadas dentro del área de estudio, así como para generar un mapa base necesario para la visita de verificación.

También se consultaron las cartas topográficas, geológicas y edafológicas escala 1:50,000 con claves E14-A74 y A84 editadas por INEGI (1999) y CETENAL (1973).

Adicionalmente se recopiló y analizó información relacionada con las características y condiciones del riego con agua residual dentro del área de estudio, la localización de los canales de distribución y la ubicación de las zonas agrícolas que utilizan dicha agua como fuente de abastecimiento para riego. Toda esta información fue de gran ayuda para definir los sitios de muestreo tanto de agua residual como de suelo durante el trabajo de campo.

3.3.2 Procesamiento e integración de datos

Una vez terminado el trabajo de campo, la siguiente actividad que se realizó fue el análisis en laboratorio de las muestras de agua subterránea, suelo y agua residual.

Al mismo tiempo que se realizaban los análisis de laboratorio, se elaboraron las bases de datos con la información recabada en campo y los resultados de la medición *in situ* de algunos parámetros (características generales, parámetros físico-químicos y los resultados de la determinación de algunos iones a través de la técnica colorimétrica).

De igual forma, se elaboró el mapa base en donde se ubicaron las norias visitadas para tomar muestras de agua subterránea, los sitios seleccionados para el muestreo de suelo, así como también los puntos en donde se recolectaron las muestras de agua residual.

Una vez obtenidos los resultados de los análisis de laboratorio, se generaron las bases de datos correspondientes para los tres tipos de muestras recolectadas. En el caso de las muestras de agua, se elaboraron tablas con los resultados de la concentración de elementos mayores (cationes y aniones), para así poder llevar a cabo el balance iónico y subsecuentemente integrar e interpretar el modelo hidrogeoquímico conceptual del área de estudio.

3.3.3 Interpretación de resultados

Para la interpretación de resultados, en primer término se utilizó el software AquaChem versión 3.7 (Waterloo Hydrogeologic, 1997) que es un programa que se utiliza para elaborar análisis gráficos y numéricos a partir de la información hidrogeoquímica del agua. Para ello se emplean algunas herramientas de análisis y técnicas gráficas usadas comúnmente para la interpretación y representación de datos geoquímicos. En éste programa se introdujeron los resultados de los análisis de laboratorio (cationes, aniones y metales) para las muestras de agua subterránea y residual, y se generaron los diagramas de Stiff y Piper correspondientes, mismos que fueron de utilidad para identificar la composición de las muestras de agua de acuerdo a los iones dominantes.

Del mismo modo, se elaboraron mapas con las configuraciones (curvas de isoconcentración) de los parámetros físico-químicos de las muestras de agua subterránea, empleando el software SURFER versión 8.0 (Golden Software Inc., 2002). Dicho programa permite construir curvas de igual concentración por medio de una malla calculada a partir de datos tabulares. Así con base en la distribución de las norias y los valores de concentración obtenidos a partir de los análisis de laboratorio, se obtuvo la representación gráfica del comportamiento espacial dentro del área de estudio de cada uno de los iones analizados que componen el agua subterránea del acuífero. Las figuras con las configuraciones anteriormente mencionadas se presentan en el capítulo 5 de este documento.

En el caso de las muestras de suelo, para la representación de datos se empleó el software SigmaPlot versión 7.0 (SPSS Inc, 2001) en lo que se refiere a los resultados de los valores de concentración de iones solubles en agua, mientras que para la evaluación de las propiedades y características del suelo se utilizaron los criterios establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000, así como el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al.*, 2006).

4. RESULTADOS

4.1 Análisis de la composición química de las muestras de agua residual

Parámetros de campo

En la Tabla 4.1 se presenta una relación con el número de muestras de agua residual recolectadas, sus coordenadas de localización dentro del área de estudio y el canal de procedencia del cual fueron tomadas. De igual forma se muestran los resultados de la medición *in situ* de su temperatura, pH, conductividad eléctrica y los parámetros medidos con el colorímetro.

De acuerdo con dicha tabla, la temperatura de las muestras de agua residual varía entre 20 y 26 °C, siendo la muestra tomada del canal San Felipe (AR5), la que presenta el valor más alto. El pH tiene valores entre 7.5 y 8.4, mientras que con respecto a la conductividad eléctrica, los valores obtenidos están entre 925 y 1550 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Contenido de elementos mayores

Los resultados de la determinación de elementos mayores de las muestras de agua residual se presentan en la Tabla 4.2.

Con respecto al contenido de cationes, se tiene que el ión predominante es el Na^+ , presentando concentraciones entre 2.7 y 7.8 meq/L, mientras que el Mg^{2+} es el que reporta las concentraciones más bajas (0.4 a 0.7 meq/L). En el caso del Ca^{2+} las concentraciones se encuentran entre los 2 y 2.4 meq/L, y para el K^+ los resultados tienen valores de 0.7 a 0.9 meq/L.

Tabla 4.1 Relación de muestras y resultados de los parámetros de campo del agua residual

No_muestra	UTM_X	UTM_Y	Canal de procedencia	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	(mg/L)		
							PO ₄ ³⁻	SAAM	B
AR1	307487	2457128	Industrias II	20	8.02	1550	31.0	4.8	0.645
AR2	307575	2457691	Río Santiago	23	8.39	925	10.5	7.1	0.340
AR3	302855	2456002	General 3 y 4	22	7.62	1070	18.0	>L.D.	0.360
AR4	304144	2461773	Río Santiago	20	7.55	950	12.4	6.9	0.325
AR5	301406	2457769	San Felipe	26	7.56	1195	39.9	>L.D.	0.405

CE= Conductividad eléctrica; SAAM (sustancias activas al azul de metileno); L.D.=Límite de detección

Tabla 4.2 Resultados de la determinación de elementos mayores del agua residual

No_muestra	Canal de procedencia	Cationes (meq/L)					Aniones (meq/L)							% Error (Balance)
		Dza _(CaCO3)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	F ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	
AR1	Industrias II	8.02	2.09	0.68	7.76	0.92	0.14	0.56	6.01	3.00	0.06	0.02	0.15	7.1
AR2	Río Santiago	7.72	2.20	0.54	3.78	0.80	0.12	0.34	2.63	1.32	0.05	< L.D.	3.07	-1.4
AR3	General 3 y 4	7.73	2.09	0.61	3.27	0.75	0.08	0.32	3.81	1.45	0.05	0.02	0.21	6.2
AR4	Río Santiago	6.96	1.98	0.49	4.08	0.77	0.05	0.24	3.34	1.83	0.07	0.01	0.84	6.9
AR5	San Felipe	7.61	2.37	0.41	2.73	0.81	0.03	0.24	4.17	1.70	0.05	0.03	0.47	-2.8

L.D.= Límite de detección

Como se observa en la Figura 4.1, los valores de concentración de cationes son muy similares en orden de magnitud en todas las muestras de agua residual, excepto en el caso de la muestra AR1 en la cual el Na^+ duplica su concentración con respecto a las demás.

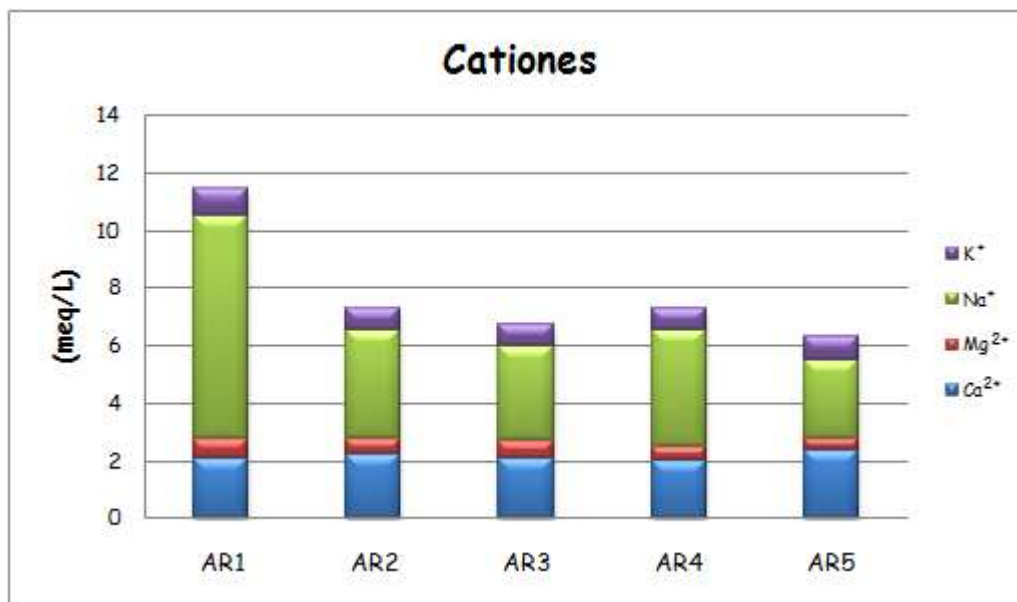


Figura 4.1 Concentraciones de cationes en las muestras de agua residual

Equihua y Carrot (2006), en el estudio realizado por la empresa Degremont S.A. de C.V. para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales "Tanque Tenorio" provenientes de la ciudad de San Luis Potosí, midieron las concentraciones de varios parámetros en algunos de los canales de distribución de aguas residuales que atraviesan el VSLP, encontrando que en el caso de la dureza total la concentración máxima medida fue de 7.2 meq/L, siendo un poco menor que la obtenida en el presente trabajo (Tabla 4.2); esto podría atribuirse como consecuencia del crecimiento demográfico de la zona de estudio de 2006 a la fecha, considerando que la proporción de aguas residuales domésticas e industriales, ha aumentado desde entonces.

En lo que se refiere a los resultados de la determinación de aniones, de acuerdo con la Figura 4.2, el ion predominante es el HCO_3^- con valores de concentración entre 2.6 y

6 meq/L, mientras que los iones que presentan las concentraciones más bajas son el F^- con valores de 0.03 a 0.14 meq/L, el NO_3^- con valores de 0.05 a 0.07 meq/L y el PO_4^{3-} cuyo valor máximo reportado es de 0.03 meq/L.

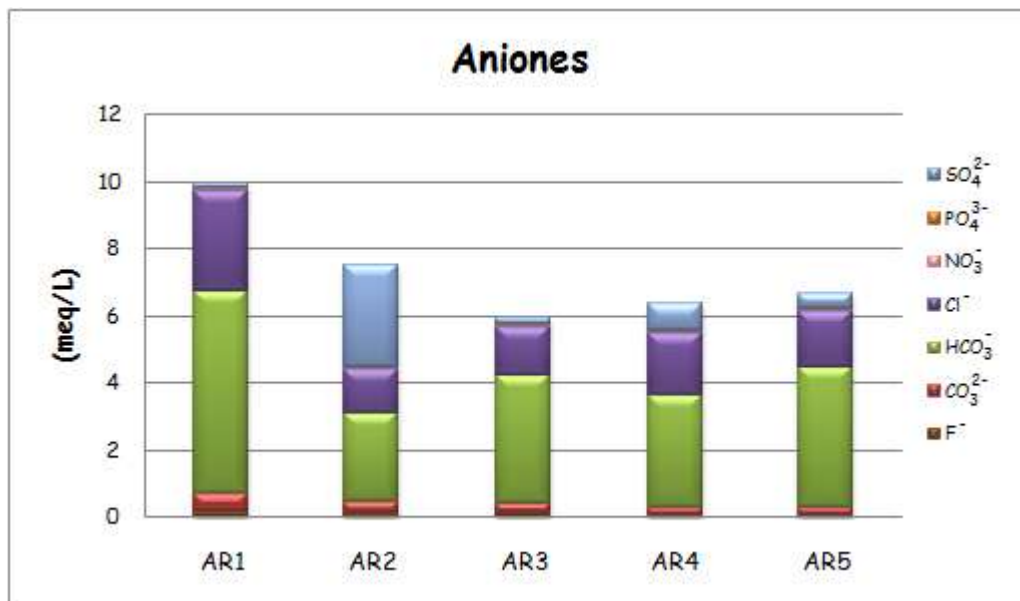


Figura 4.2 Concentraciones de aniones en las muestras de agua residual

Otros de los iones analizados fueron, el ión Cl^- presentando valores entre 1.3 y 3 meq/L, el ión CO_3^{2-} con concentraciones entre 0.2 y 0.6 meq/L y finalmente el ion SO_4^{2-} con valores muy contrastantes que están entre 0.15 y 3.0 meq/L, como es el caso de la muestra tomada en el sitio con clave AR2, la cual presenta la mayor concentración.

De acuerdo con la carga iónica del agua residual, puede considerarse que ésta tiene una concentración media a fuerte (Metcalf y Eddy, 1996), a diferencia de lo que se ha encontrado en otras regiones del país, como en el caso del agua residual del distrito de riego del valle del Mezquital (British Geological Survey, 1995), en donde los valores reportados pueden considerarse como de una concentración fuerte.

Contenido de Cd, Cr, Cu, Fe y Pb

Para las muestras de agua residual también se llevaron a cabo los análisis correspondientes para determinar el contenido de Cd, Cr, Cu, Fe y Pb; en la Tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.3 Resultados de la determinación de metales del agua residual

No_muestra	Canal de procedencia	(µg/L)				
		Cd	Cr	Cu	Fe	Pb
AR1	Industrias II	0.028	1.50	1.39	201.22	0.234
AR2	Río Santiago	0.167	0.42	2.21	117.42	0.300
AR3	General 3 y 4	0.019	0.67	2.01	157.77	0.389
AR4	Río Santiago	0.109	0.65	1.00	120.46	0.211
AR5	San Felipe	0.009	0.47	1.23	147.71	0.900

De acuerdo con la tabla anterior, el metal que tiene las concentraciones más altas es el Fe, presentando valores entre 117 y 201 µg/L, siendo la muestra AR1 la que registra la mayor concentración, tal y como se muestra en la Figura 4.3.

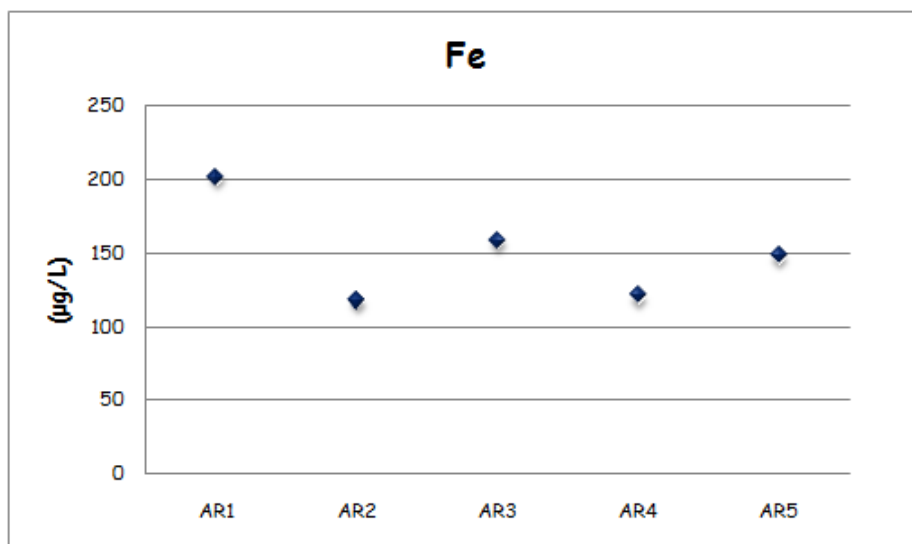


Figura 4.3 Concentración de Fe en las muestras de agua residual

Si se considera que las muestras de agua residual AR2, AR3, AR4 Y AR5 fueron tomadas de canales que conducen agua residual de origen exclusivamente municipal,

mientras que la muestra AR1 se tomó del canal Industrias II, el cual conduce agua residual de origen industrial (industria textil, química, minera, metalúrgica, automotriz, entre otras), es lógico obtener valores de Fe mayores en dicha muestra que en el resto de ellas.

Con respecto a los demás metales (Figura 4.4), el Cu presenta una concentración mínima de 1 $\mu\text{g/L}$ y una máxima de 2.21 $\mu\text{g/L}$ siendo el segundo metal analizado más abundante en las muestras de agua residual.

Por otro lado, el Cr tiene valores de concentración entre 0.42 $\mu\text{g/L}$ y 1.5 $\mu\text{g/L}$, y el Pb valores que van desde 0.2 $\mu\text{g/L}$ hasta 0.9 $\mu\text{g/L}$. Finalmente el Cd es el metal que registra las menores concentraciones, mismas que van desde 0.009 $\mu\text{g/L}$ hasta 0.16 $\mu\text{g/L}$ (ver Figura 4.4).

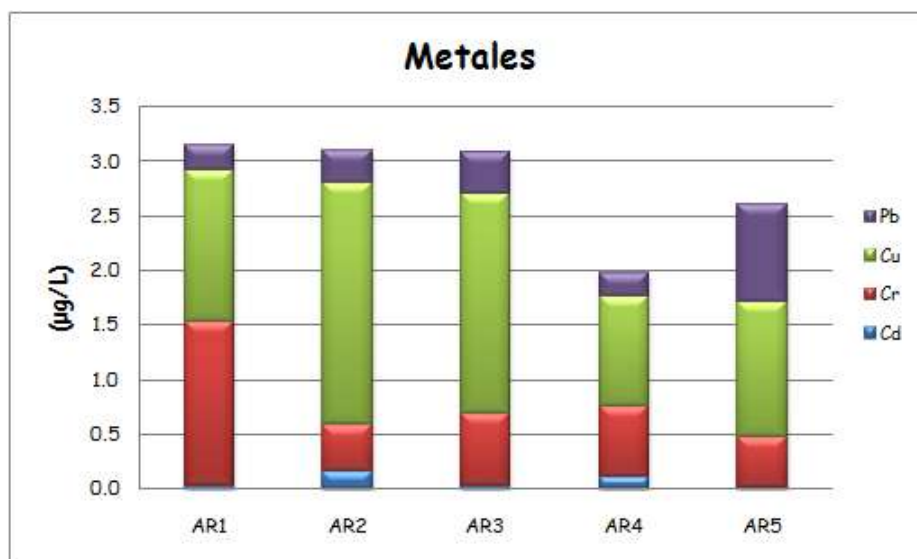


Figura 4.4 Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb en las muestras de agua residual

De acuerdo con los resultados anteriores, y con base en lo que establece la NOM-001-ECOL-1996, ninguna de las muestras de agua residual supera los límites máximos permisibles para los metales analizados. Considerando que como se mencionó anteriormente, la mayoría de las muestras fueron tomadas de canales que contienen

agua residual de tipo doméstico, es lógico obtener valores de concentración tan bajos en lo que se refiere al contenido de metales.

4.2 Análisis de parámetros físico-químicos de las muestras de suelo

Con la finalidad de conocer las características del suelo dentro del área de estudio, y con ello evaluar las propiedades del medio por donde pasa el agua residual con que se riegan las zonas de cultivo, de los dos perfiles seleccionados para el muestreo, se obtuvieron 8 muestras correspondientes a cada uno de los horizontes identificados. En la Tabla 4.4 se presenta una relación del número de muestras y la profundidad a la cual fueron obtenidas, así como las coordenadas de localización de ambos perfiles.

Tabla 4.4 Relación de muestras de suelo

No_muestra	UTM_X	UTM_Y	Altitud (msnm)	Horizonte	Profundidad (cm)
MS-S11A	300358	2458262	1847	Ah	0-24
MS-S11B				AB	24-70
MS-S11C				Cw	70-87
MS-S11D				C	87-100
MS-S12A	305123	2458700	1839	Ah	0-30
MS-S12B				AC	30-36
MS-S12C				Cw	36-54
MS-S12D				C	54-136

Es importante mencionar que de acuerdo con la ubicación de los sitios de muestreo, uno de los perfiles (MS-S11) se localiza en los alrededores de la zona periurbana de Soledad de Graciano Sánchez, y el otro (MS-S12) se encuentra ubicado en la porción centro-oriental del área de estudio, dentro de la zona agrícola.

Durante el trabajo de campo se llevó a cabo la caracterización de estos perfiles, la cual consistió en describir algunas propiedades físicas del suelo, con base en una simple apreciación e inspección física *in situ* de algunas características que poseen dichos suelos (Siebe *et al.*, 2006). Los resultados dicha caracterización se presentan en las Tablas 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5 Caracterización de campo del perfil de suelo MS-S11 y resultados de los análisis de laboratorio

Levantamiento en campo	Clave muestra	Prof. (cm)	Textura		Piedras (Vol%)	Color (humedo)	pH		CE (µS/cm)	M.O. (%)		CaCO ₃ (%)		Humedad		Estructura	Estabilidad
			campo	lab.			campo	lab.	lab.	campo	lab.	campo	lab.	pF	Tipo, tamaño, grado	agregados	
	MS-S11A	0-24	CRA	CR	3	10YR 3/1	8	8.15	270	1.8	1.774	0	4.033	muy seco	5	granular, fina, sin estructura	muy baja
	MS-S11B	24-70	CR	CR	5	7.5YR 3/2	7	7.51	350	2	0.987	0	2.833	muy seco	5	granular, fina, débil	muy baja
	MS-S11C	70-87	CL _f	CRA	10	10YR 4/4	7	6.7	380	1.5	0.382	0	2.800	muy seco	5	subangular en bloque, fina, débil	baja
	MS-S11D	87-100	C	CA	10	10YR 5/4	7	7.78	440	1	0.250	0	3.300	muy seco	5	subangular en bloque, media, moderadamente fuerte	media

Levantamiento en campo	Clave muestra	Prof. (cm)	Poros	Densidad aparente	Densidad raíces	Límite	Horizonte	LEYENDA	
			Abund., tamaño, forma, distrib.					Textura	Evaluación ecológica
	MS-S11A	0-24	comunes, micro, intersticiales, fuera de los agregados	1.4	media	gradual, ondulado	Ah	CRA (franco arcillo arenosa)	VPT (volumen total de poros)
	MS-S11B	24-70	muchos, muy finos, vesiculares, fuera de los agregados	1.6	baja	claro, uniforme	AB	CL _f (franco limosa fina)	CA (capacidad de aireación)
	MS-S11C	70-87	muchos, finos, vesiculares y fuera de los agregados	1.6	nula	claro, ondulado	Cw	CR (franco arcillosa)	dCC (capacidad de agua disponible)
	MS-S11D	87-100	pocos, muy finos, vesiculares y fuera de los agregados	1.8	nula		C	CA (franco arenosa)	CC (capacidad de campo)
								C (franca)	Kf (conductividad hidráulica)
									Nt (nitrógeno total)
									Nd (nitrógeno disponible)

Evaluación ecológica	Clave muestra	Espesor (dm)	Penetrab. raíces	VPT		CA		dCC		CC (hasta 1m)		Kf		CIC (campo)		CIC (lab.)		Humus
				Vol %	eval.	Vol %	eval.	Vol %	L/m ²	Vol %	L/m ²	cm/d	eval.	meq/kg	eval.	cmol/kg	eval.	Kg/m ²
	MS-S11A	2.4	buena	44	mediano	3.5	baja	12.5	27.90	39.5	91.95	40-100	alta	6.5	baja	27.27	alta	5.86
	MS-S11B	4.6	mediana	39	bajo	3.5	baja	10.0	43.70	35.5	155.13	1-10	baja	6.0	baja	15.78	media	13.98
	MS-S11C	1.7	mediana	39	bajo	4.5	baja	21.5	32.89	34.5	52.78	1-10	baja	4.0	muy baja	9.65	baja	3.62
	MS-S11D	1.3	mediana	35	bajo	5.5	baja	13.5	15.70	29.5	34.51	1-10	baja	3.6	muy baja	16.74	media	2.1
								ΣdCC:	120.19	ΣCC:	334.39	Drenaje natural: excesivo						ΣHumus:
								Eval:	mediana	Eval:	mediana	Erodabilidad (Ah)						25.26
												K:	0.66	Evaluación: alta				

Evaluación ecológica	Clave muestra	Espesor (dm)	Nt Kg/m ²	Nd g/m ²
		MS-S11A	2.4	0.29
	MS-S11B	4.6	0.70	3.50
	MS-S11C	1.7	0.18	0.91
	MS-S11D	1.3	0.11	0.52
			ΣNt: 1.28	
			Eval: alta	

Tabla 4.6 Caracterización de campo del perfil de suelo MS-S12 y resultados de los análisis de laboratorio

Levantamiento en campo	Clave muestra	Prof. (cm)	Textura		Piedras (Vol%)	Color (humedo)	pH		CE (µS/cm)	M.O. (%)		CaCO ₃ (%)		Humedad		Estructura	Estabilidad
			campo	lab.			campo	lab.	lab.	campo	lab.	campo	lab.	pF	Tipo, tamaño, grado	agregados	
	MS-S12A	0-30	AC	A	3	10YR 4/3	6	7.04	20	1.8	0.274	0	2.567	muy seco	5	granular, fina, sin estructura	baja
	MS-S12B	30-36	A	AC	5	10YR 4/2	6	7.16	20	1.8	0.358	0	1.000	muy seco	5	granular, fina, sin estructura	baja
	MS-S12C	36-54	CA	CA	7	7.5YR 4/3	7	6.36	400	1.3	0.351	0	1.567	muy seco	5	granular, fina, sin estructura	baja
	MS-S12D	54-136	CA	CA	10	10YR 4/3	7	6.90	30	1.3	0.392	0	0.600	muy seco	5	granular, fina, sin estructura	baja

Levantamiento en campo	Clave muestra	Prof. (cm)	Poros				Densidad aparente	Densidad raíces	Límite	Horizonte	LEYENDA	
			Abund., tamaño, forma, distrib.								Textura	Evaluación ecológica
	MS-S12A	0-30	muchos, muy finos, vesiculares, dentro de los agregados				1.2	muy alta	claro, uniforme	Ah	AC (arenosa franca)	VPT (volumen total de poros)
	MS-S12B	30-36	comunes, micro, vesiculares, dentro de los agregados				1.8	baja	gradual, ondulado	AC	A (arenosa)	CA (capacidad de aireación)
	MS-S12C	36-54	muchos, micro, vesiculares, dentro de los agregados				1.6	muy baja	gradual, ondulado	Cw	CA (franco arenosa)	dCC (capacidad de agua disponible)
	MS-S12D	54-136	muchos, micro, vesiculares, dentro de los agregados				1.2	muy baja		C		CC (capacidad de campo)
											Kf (conductividad hidráulica)	
											Nt (nitrógeno total)	
											Nd (nitrógeno disponible)	

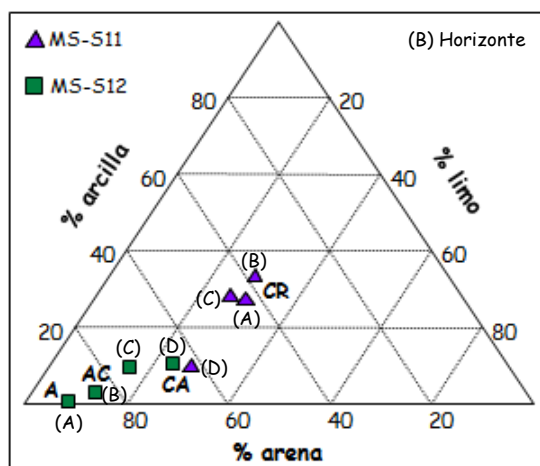
Evaluación ecológica	Clave muestra	Espesor (dm)	Penetrab. raíces	VPT		CA		dCC		CC (hasta 1m)		Kf		CIC (campo)		CIC (lab.)		Humus
				Vol %	eval.	Vol %	eval.	Vol %	L/m ²	Vol %	L/m ²	cm/d	evaluación	meq/kg	eval.	cmol/kg	eval.	Kg/m ²
	MS-S12A	3.0	buena	41.0	mediano	16.5	alta	16.5	48.01	24.5	71.29	10-40	media	1.4	muy baja	4.79	muy baja	6.28
	MS-S12B	0.6	mediana	35.5	bajo	19.0	muy alta	11.5	6.55	16.5	9.4	10-40	media	1.0	muy baja	5.05	muy baja	1.84
	MS-S12C	1.8	mediana	34.0	bajo	7.5	media	17.5	29.29	26.5	44.36	1-10	baja	2.0	muy baja	5.37	muy baja	3.48
	MS-S12D	8.2	mediana	40.0	bajo	9.5	media	20.5	151.29	30.5	225.09	10-40	media	2.0	muy baja	7.98	baja	11.51
								ΣdCC:	235.15	ΣCC:	350.15	Drenaje natural: excesivo						ΣHumus:
								Eval:	muy alta	Eval:	mediana	Erodabilidad (Ah)						23.11
												K:	0.7	Evaluación: alta				

Evaluación ecológica	Clave muestra	Espesor (dm)	Nt	Nd
			Kg/m ²	g/m ²
	MS-S12A	3.0	0.31	1.57
	MS-S12B	0.6	0.09	0.46
	MS-S12C	1.8	0.17	0.87
	MS-S12D	8.2	0.56	2.87
			ΣNt: 1.13	
			Eval: alta	

La caracterización de ambos perfiles, permitió establecer sólo una primera aproximación para la evaluación de la capacidad filtro de estos suelos. Después del trabajo de campo, se realizaron diversos análisis de laboratorio a las muestras de suelo recolectadas, obteniéndose los siguientes resultados.

Textura

Con respecto a la determinación de la textura de las muestras, en la Figura 4.5 se muestra una representación gráfica de los resultados.



CR=franco arcillosa, CA=franco arenosa, AC=arenosa franca, A=arenosa

Figura 4.5 Diagrama triangular de texturas de las muestras de suelo

De acuerdo con la figura anterior, y con base en los resultados de los análisis de laboratorio, en el perfil MS-S11 los primeros tres horizontes tienen textura franco arcillosa y el cuarto franco arenosa, mientras que en el perfil MS-S12 el primer horizonte presenta una textura arenosa, seguida de una capa arenosa franca y por último dos horizontes franco arenosos.

Si se compara la textura obtenida en campo (Tablas 4.5 y 4.6) con la de laboratorio, en general los resultados son muy similares, sobre todo considerando que en campo su determinación se infiere a través de una prueba al tacto (moldeado, consistencia y

granulometría), mientras que en el laboratorio se utiliza un método analítico controlado.

Dado que en el área de estudio el medio geológico está constituido principalmente por material de origen volcánico (tobas) y depósitos aluviales, y el clima es de tipo seco a semiseco, entonces puede explicarse que la textura obtenida en las muestras de suelo de los dos perfiles considerados, sea predominantemente de tipo arenosa, ya que dicha condición climática tiene como consecuencia la presencia de procesos pedogenéticos incipientes, que no favorecen la transformación del material parental.

También cabe recordar, que de acuerdo con la carta edafológica F14-A84 (CETENAL, 1973), y a partir de la cual se elaboró el mapa con la distribución de las unidades de suelo (Figura 3.2, capítulo 3), dentro del área de estudio dichas unidades fueron clasificadas con la nomenclatura - **Xn/2a** -, donde **Xn** representa el tipo de suelo (Xerosol háplico), el número **2** hace referencia a la textura (media), y la letra **a** representa la pendiente del terreno (inclinación menor a 8°). Por lo anterior, los resultados de textura obtenidos a partir de las determinaciones realizadas en el campo y laboratorio, corroboran la presencia de un suelo con dichas características dentro del área de estudio.

Conductividad eléctrica y pH

En el caso de la conductividad eléctrica, esta sólo se determinó en el laboratorio. Para las muestras correspondientes al perfil MS-S11, se obtuvieron valores entre 270 y 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 4.5), mientras que para las muestras del perfil MS-S12 se obtuvieron valores entre 20 y 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 4.6).

Por otro lado, el pH de las muestras del perfil MS-S11 registró valores entre 7 y 8 en las mediciones en campo, mientras que en su determinación en el laboratorio se

obtuvieron valores entre 6.7 y 8.15 (Tabla 4.5). Para el perfil MS-S12, se obtuvieron valores entre 6 y 7 en campo, mientras que en las mediciones realizadas en el laboratorio, se obtuvieron valores entre 6.3 y 7.1, tal y como se aprecia en la Tabla 4.6. La diferencia entre los valores de pH obtenidos en campo y en el laboratorio, radica en que los primeros se midieron con papel pH, mientras que los segundos fue a través de un potenciómetro.

De acuerdo con la carta edafológica San Luis Potosí F14-A84 (CETENAL, 1973), los suelos de la zona de estudio tienen un pH con valores entre 8.0 y 8.6.

Contenido de carbono y materia orgánica

Para conocer el contenido de carbono orgánico y con ello obtener el porcentaje de materia orgánica que contienen las muestras de suelo, se llevó a cabo la determinación del carbono total de las muestras tomadas de los diferentes horizontes. En la Tabla 4.7 se presentan los resultados obtenidos de dicha determinación.

Tabla 4.7 Resultados de la determinación de carbono orgánico, inorgánico y materia orgánica correspondientes a los perfiles MS-S11 y MS-S12

Clave_muestra	% CaCO ₃	% C _{inorgánico}	% C _{orgánico}	% M.O.
MS-S11A	4.033	0.484	1.029	1.774
MS-S11B	2.833	0.340	0.572	0.987
MS-S11C	2.800	0.336	0.222	0.382
MS-S11D	3.300	0.396	0.145	0.250
MS-S12A	2.567	0.308	0.159	0.274
MS-S12B	1.000	0.120	0.208	0.358
MS-S12C	1.567	0.188	0.204	0.351
MS-S12D	0.600	0.072	0.228	0.392

M.O. (Materia orgánica)

Con base en la tabla anterior, se puede apreciar que en general el contenido de CaCO₃ y materia orgánica en el perfil MS-S11 es mayor que en el perfil MS-S12. Por otro lado, en el primer perfil el contenido de materia orgánica disminuye con la

profundidad, mientras que en las muestras del segundo, se registra un ligero aumento en el porcentaje a mayor profundidad.

Así, de acuerdo con los porcentajes obtenidos y con base en los criterios de evaluación de las características de los suelos, establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000, se puede decir que en ambos perfiles el contenido de CaCO_3 es muy bajo, y en el caso de la materia orgánica son bajos.

Es importante mencionar, que de acuerdo con las Tablas 4.5 y 4.6, existe una diferencia entre los valores obtenidos en campo y los determinados en el laboratorio en lo que se refiere al porcentaje de CaCO_3 y M.O. En el primer caso, la diferencia radica en el hecho de que en campo, el contenido de carbonatos se estimó observando la efervescencia de la muestra al adicionar ácido clorhídrico, evaluando el porcentaje con base en una tabla (Siebe et al, 2006), por lo que la cuantificación es aproximada, subjetiva y puede llegar a subestimarse su contenido. Caso contrario ocurre para la determinación en campo del contenido de materia orgánica, donde los porcentajes son mayores que en la determinación en el laboratorio, esto debido a que dicho contenido se estimó considerando la textura, pH y color del suelo, por lo que la valoración en cuanto a su contenido pudo haberse sobrestimado.

Capacidad de intercambio catiónico

Las superficies de los coloides del suelo (arcillas y materia orgánica) tienen cargas electrostáticas predominantemente negativas (Brady y Weil, 2002). Por lo tanto, las cargas en las superficies de los coloides del suelo, tienen la capacidad de intercambiarse con iones cargados positivamente, provenientes de la solución del suelo.

Con base en lo anterior, la capacidad de intercambio catiónico se define como el grado en que un suelo puede mantener e intercambiar cationes, es decir, se refiere a la cantidad de cargas negativas existentes en el suelo. Las partículas de arcilla y materia orgánica presentan una carga residual negativa sobre su superficie, por lo que son intercambiadores catiónicos.

Por otro lado, también es importante tomar en cuenta que, la carga de las partículas que forman el suelo, depende del punto de carga cero (PZC) de las mismas, siendo este el valor de pH al cual un sólido presenta en su superficie, una carga eléctrica neta nula (Appelo y Postma, 1993). Así, cuando el pH del medio es inferior al PZC, los aniones pueden ser retenidos en las superficies de los sólidos vía sorción. Si el pH del medio es superior al PZC, entonces los cationes pueden ser sorbidos en la superficie de los sólidos.

En las Tablas 4.5 y 4.6 se presentan los resultados de la CIC determinada en el laboratorio de ambos perfiles.

En el perfil MS-S11 el horizonte que tiene la capacidad de intercambio catiónico más alta es el MS-S11A con un valor de 27 cmol/kg, la cual disminuye hacia los horizontes sub-superficiales hasta 9 cmol/kg, como en el caso de la muestra tomada del horizonte MS-S11C.

Por otro lado, y a diferencia del perfil anterior, en el perfil MS-S12 la capacidad de intercambio catiónico tiene un valor máximo de 8 cmol/kg obtenido en el horizonte más profundo, mientras que el valor mínimo se registró en el horizonte más superficial con una capacidad de intercambio catiónico de 4.8 cmol/kg.

En lo que se refiere a la evaluación de este parámetro, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, en el perfil MS-S11 el primer horizonte tiene una capacidad de intercambio catiónico alta, mientras que en los tres horizontes restantes es media a

baja. En el caso del perfil MS-S12, en general la capacidad de intercambio catiónico es baja a muy baja.

Composición mineralógica de las muestras de suelo

Con respecto a la composición mineralógica de las muestras de suelo, de las ocho analizadas en la fracción no orientada, todas presentan prácticamente la misma composición, teniendo como minerales más representativos: cuarzo (SiO_2) siendo el mineral más abundante, feldespato potásico tipo sanidino ($\text{Na, K} (\text{Al, Si})_2 \text{Si}_3\text{O}_8$), plagioclasa de composición intermedia ($\text{Ca, Na} (\text{Al, Si})_2 \text{Si}_2\text{O}_8$), y algunas trazas de mica.

En la Figura 4.6 se muestra el difractograma de la muestra MS-S11A con los picos característicos de las fases minerales encontradas en las muestras de suelo de la fracción no orientada.

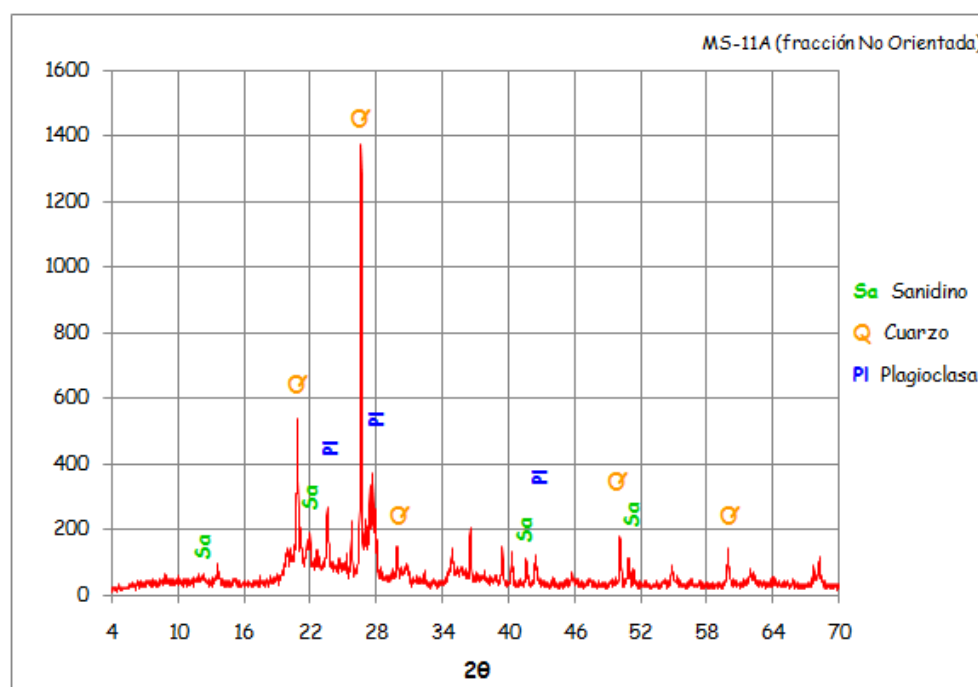


Figura 4.6 Difractograma muestra MS-S11A (fases mineralógicas encontradas)

Para determinar si en las muestras de suelo se tenía la presencia de arcilla, así como identificar el grupo de las mismas, se recurrió a la técnica de difracción para muestra orientada, pero sólo en aquellas muestras en las que de acuerdo con la textura presentaban mayores porcentajes de partículas del tamaño de arcilla (muestras MS-S11B y MS-S11C); los resultados de dicha determinación se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Resultados de los análisis de difracción de rayos X de las muestras orientadas

No_muestra	Sin tratamiento	Glicolada	Calentada (550°C)	Fases Identificadas
MS-S11B	≈ 7Å ≈ 10Å	≈ 7Å ≈ 10Å	X ≈ 10Å	Mineral del grupo del caolín (Halloysita 7Å) Mica
MS-S11C	≈ 7Å ≈ 10Å	≈ 7Å ≈ 10Å	X ≈ 10Å	Mineral del grupo del caolín (Halloysita 7Å) Mica

De acuerdo con lo anterior, en lo que se refiere a las muestras orientadas, en ambas se reporta un pequeño pico a 7Å, que corresponde muy probablemente a pequeñas cantidades de material caolinítico (Halloysita); también se presenta un pico a 10Å que corresponde a la presencia de mica.

Por todo lo anterior, se puede decir que con respecto a la composición mineralógica, en general las muestras de suelo son muy similares entre sí, y que contienen principalmente minerales de origen volcánico. La única diferencia que existe entre ellas, es la proporción relativa en que se presentan las diferentes fases.

En un estudio realizado al sureste de la ciudad de San Luis Potosí, Cortés-Ortiz (2009) llevó a cabo un análisis para determinar la composición mineralógica de muestras de roca y sedimento a través de la técnica de difracción de rayos X, encontrando que ambos tipos de muestras estaban conformadas principalmente por minerales tales como: plagioclasas, cuarzo, ópalo, zeolitas, sanidino, carbonatos y arcilla.

Lo anterior, corrobora la presencia de minerales de origen volcánico en las muestras de suelo analizadas en el presente trabajo, siendo los más abundantes el cuarzo y las plagioclasas. Sin embargo, cabe mencionar que a diferencia del estudio de Cortés-Ortiz (2009) en el que la arcilla es uno de los minerales predominantes, en este trabajo las muestras de suelo reportan muy bajos contenidos de arcilla.

Contenido de elementos mayores

De la determinación de cationes y aniones, analizados a partir de los extractos de la solución del suelo, se elaboraron las gráficas de las Figuras 4.7 y 4.8, en donde se presentan los resultados obtenidos.

Es importante recordar que en cada perfil se definieron cuatro horizontes, mismos que en las gráficas están representados por la profundidad promedio a la cual se encontraba cada horizonte. Por ejemplo, en el perfil MS-S11 el primer horizonte queda definido por los valores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ que están a una profundidad de 12 cm. Por otro lado, para el perfil MS-S12 el tercer horizonte queda definido por los valores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ que están a una profundidad de 45 cm.

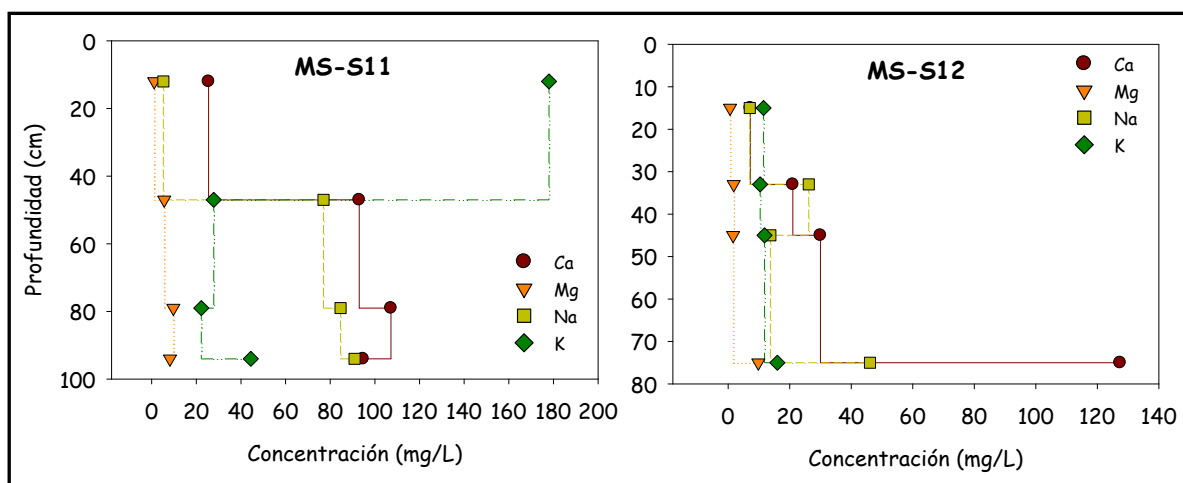


Figura 4.7 Valores de concentración de cationes de los extractos del suelo

De acuerdo con la Figura 4.7, los resultados de la determinación de cationes, indican una gran variabilidad en la composición de las muestras de suelo de cada uno de los horizontes que conforman a los dos perfiles.

En el caso del perfil MS-S11, en el primer horizonte predomina el K^+ con una concentración de 178 mg/L, el Ca^{2+} presenta una concentración de 25 mg/L, mientras que la del Na^+ y el Mg^{2+} es menor a los 6 mg/L. En el segundo, tercero y cuarto horizonte predomina el ión Ca^{2+} con concentraciones de 93 a 107 mg/L así como el Na^+ cuyas concentraciones tienen valores de 77 a 91 mg/L. Por otro lado el ión K^+ disminuye su concentración en los últimos tres horizontes presentando valores entre 22 y 44 mg/L. Finalmente, a lo largo de todo el perfil el ión Mg^{2+} es el que tiene los valores de concentración más bajos (1-8 mg/L).

Para las muestras de extractos del suelo tomadas en el perfil MS-S12, en los cuatro horizontes nuevamente el Mg^{2+} es el que tiene las concentraciones más bajas (0.6-9.8 mg/L), mientras que el Ca^{2+} en general, es el que presenta las mayores concentraciones con valores desde 7 hasta 127 mg/L. Por otro lado, al igual que en el perfil MS-S11 pero en menor proporción, el Na^+ es el segundo ión predominante presentando concentraciones con valores de entre 7 y 46 mg/L. Finalmente el K^+ presenta concentraciones entre 10 y 16 mg/L, siendo éste el que tiene un comportamiento más homogéneo.

Como puede apreciarse en la Figura 4.7, en general el perfil MS-S11 presenta concentraciones más altas comparativamente que las que se tienen en el perfil MS-S12, salvo en el caso del ión Ca^{2+} que en este perfil, a una profundidad de 95 cm, registra la mayor concentración de todas.

Con respecto a los resultados de la determinación de aniones, en la Figura 4.8 se aprecia que tanto en el perfil MS-S11 como en el MS-S12, el ión predominante es

principalmente el HCO_3^- , teniendo en el primer perfil valores de concentración entre 68 y 370 mg/L, mientras que en el segundo tiene concentraciones con valores que van desde 80 mg/L hasta los 616 mg/L.

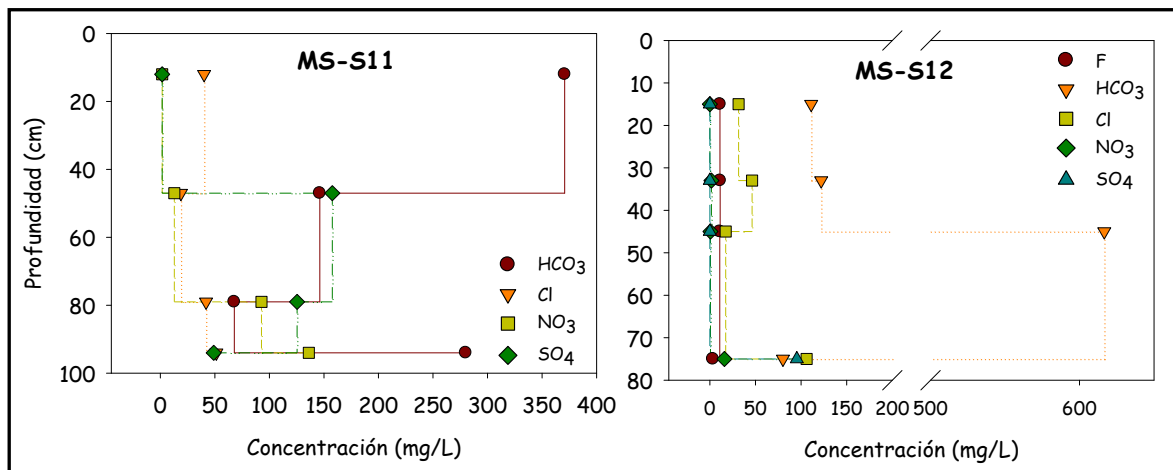


Figura 4.8 Valores de concentración de aniones de los extractos del suelo

Por otro lado, el anión que tiene las concentraciones más bajas es el ión F^- con valores entre 0 y 16 mg/L. En el caso del Cl^- , que está presente en todas las muestras, tiene concentraciones entre 17 y 106 mg/L. Para el ión NO_3^- , en el perfil MS-S11, este aumenta su concentración a profundidad (1.7 a 136 mg/L), mientras que en el perfil MS-S12 tiene valores pequeños (0.1 a 16 mg/L).

Finalmente y contrario al comportamiento del ión NO_3^- , en el perfil MS-S11 el ión SO_4^{2-} disminuye su concentración a profundidad, teniendo valores entre 49 y 158 mg/L, mientras que en el perfil MS-S12 sólo se presenta en el último horizonte con un valor de 95 mg/L.

4.3 Análisis de la composición química de las muestras de agua subterránea

Parámetros de campo

En la Tabla 4.9 se presenta una relación con el número de muestras de agua subterránea recolectadas y sus coordenadas de localización dentro del área de estudio. De igual forma se muestran los resultados de la medición *in situ* de parámetros tales como la temperatura, pH, conductividad eléctrica, alcalinidad total, así como la concentración de NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} y SAAM, medidos con el colorímetro.

De acuerdo con dicha tabla, la temperatura de las muestras de agua subterránea varía entre 16 y 23 °C. El pH tiene valores entre 6.3 y 7.3, mientras que con respecto a la conductividad eléctrica, los valores obtenidos están entre 430 y 3900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Con respecto a la alcalinidad total, la concentración más baja es la que reporta la muestra SLP-12 con 104 mg/L y la más alta la que se obtuvo en la muestra SLP-27 con un valor de 540 mg/L.

En lo que se refiere a los parámetros medidos con el colorímetro, el NH_4^+ tiene concentraciones con valores entre 0.17 y 0.46 mg/L, para el NO_3^- las concentraciones están entre 6 y 56 mg/L, el PO_4^{3-} presenta valores entre 0.1 y 1.3 mg/L, y finalmente la concentración de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) tiene valores entre 0.7 y 6.8 mg/L (ver Tabla 4.9).

Contenido de elementos mayores

Con respecto a la determinación de la concentración de elementos mayores de las muestras de agua subterránea, los resultados se presentan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.9 Relación de muestras y resultados de los parámetros de campo del agua subterránea

No_muestra	UTM_X	UTM_Y	T (°C)	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Alcalinidad Total ($\text{mg}/\text{L CaCO}_3$)	(mg/L)			
							NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{3-}	SAAM
SLP-02	305408	2459859	16.3	6.86	790	160	0.22	29.0	0.4	0.0
SLP-05	307247	2459358	21.5	6.58	770	180	0.24	17.0	0.0	0.0
SLP-08	307246	2458667	20.6	6.66	850	284	0.36	20.0	0.1	0.0
SLP-09	306294	2459566	20.8	6.57	660	140	0.18	20.0	0.3	0.0
SLP-10	305807	2458643	20.4	6.55	910	180	0.22	25.0	0.2	0.0
SLP-11	304777	2458353	21.8	6.56	1290	262	0.26	56.0	1.1	1.5
SLP-12	306928	2459814	19.4	6.98	430	104	0.34	12.0	0.7	2.6
SLP-15	304392	2461724	18.7	7.37	1320	522	0.26	29.0	1.3	2.1
SLP-19	303767	2457462	21.5	6.83	890	124	0.38	22.0	1.3	1.1
SLP-20	304412	2457687	21.7	6.37	1210	264	0.20	33.0	0.4	0.8
SLP-21	305312	2457298	21.3	6.43	1180	200	0.17	> L.D.	0.5	1.9
SLP-24	306545	2459452	22.3	6.61	600	136	0.46	16.0	0.6	0.0
SLP-25	306038	2460113	19.7	6.65	790	140	0.21	9.0	0.5	0.0
SLP-26	306034	2454284	21.4	7.24	1410	400	0.31	26.0	0.7	2.9
SLP-27	306578	2456815	20.6	6.99	1800	540	0.25	10.0	1.0	2.0
SLP-28	300916	2457244	19.6	6.75	2220	464	0.20	20.0	0.4	4.3
SLP-29	300035	2457816	18.9	6.66	1480	352	0.21	13.0	0.1	3.1
SLP-30	302765	2460258	19.1	6.57	600	268	0.43	19.0	0.0	0.0
SLP-31	302117	2457178	19.2	6.38	1400	188	0.29	32.0	0.0	0.7
SLP-32	303427	2456065	19.5	6.78	1600	328	0.35	12.0	0.9	2.0
SLP-33	301897	2458819	23.4	7.10	2200	400	0.35	19.0	0.7	2.7
SLP-34	300284	2456719	19.2	6.78	3900	432	0.36	53.0	1.1	6.8
SLP-35	302474	2458656	20.0	6.61	850	248	0.23	17.0	1.0	5.2
SLP-36	303087	2456381	20.0	6.85	1290	380	0.33	15.0	0.4	2.5
SLP-37	305510	2456043	18.3	6.57	1130	200	0.31	21.0	0.4	3.4
SLP-38	303283	2455423	19.1	6.61	1810	480	0.31	46.0	0.1	3.4

CE= Conductividad eléctrica; SAAM (sustancias activas al azul de metileno); L.D.=Límite de detección

Tabla 4.10 Resultados de la determinación de elementos mayores del agua subterránea

No_muestra	UTM_X	UTM_Y	Zona del área de estudio	Cationes (meq/L)					Aniones (meq/L)					% Error (Balance)	
				Dza(CaCO3)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	F ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻		SO ₄ ²⁻
SLP-02	305408	2459859	agrícola	13.93	4.43	0.69	3.05	0.64	0.14	3.27	1.69	0.72	< L.D.	1.36	10.2
SLP-05	307247	2459358	agrícola	13.33	4.43	0.55	1.86	0.74	< L.D.	3.45	1.61	0.34	0.08	1.03	7.5
SLP-08	307246	2458667	agrícola	17.11	5.27	0.96	2.80	0.71	0.15	4.24	1.86	0.56	0.11	1.41	7.7
SLP-09	306294	2459566	agrícola	14.88	4.16	1.09	1.72	0.62	0.09	3.07	1.99	0.46	0.08	1.06	5.9
SLP-10	305807	2458643	agrícola	17.24	4.99	1.16	1.16	0.84	< L.D.	3.53	2.56	0.41	< L.D.	1.38	1.7
SLP-11	304777	2458353	agrícola	24.40	7.48	1.39	1.45	0.72	< L.D.	5.93	2.87	0.75	< L.D.	1.26	1.0
SLP-12	306928	2459814	agrícola	5.12	1.61	0.27	1.09	0.52	0.11	1.72	1.15	0.22	< L.D.	0.49	-3.0
SLP-15	304392	2461724	agrícola	14.36	4.43	0.80	7.71	0.85	< L.D.	8.95	1.29	0.78	< L.D.	1.68	4.1
SLP-19	303767	2457462	agrícola	17.77	5.27	1.12	1.10	0.82	< L.D.	3.44	2.64	0.54	< L.D.	1.09	3.8
SLP-20	304412	2457687	agrícola	26.92	7.76	1.83	1.29	0.82	< L.D.	5.46	3.21	0.62	< L.D.	1.26	5.2
SLP-21	305312	2457298	agrícola	25.08	7.21	1.72	1.63	0.77	< L.D.	4.89	2.77	0.73	< L.D.	1.91	4.7
SLP-24	306545	2459452	agrícola	11.07	3.60	0.50	1.10	0.72	0.20	3.22	1.57	0.36	< L.D.	0.97	-3.3
SLP-25	306038	2460113	periurbana	15.09	4.43	0.98	1.61	0.61	< L.D.	1.41	3.53	0.30	< L.D.	2.79	-2.6
SLP-26	306034	2454284	agrícola	22.65	7.20	1.13	2.12	0.54	< L.D.	4.80	2.78	0.63	< L.D.	4.17	-5.9
SLP-27	306578	2456815	agrícola	25.97	8.59	1.09	7.81	0.58	< L.D.	11.42	2.83	0.97	< L.D.	2.25	1.7
SLP-28	300916	2457244	periurbana	35.80	10.81	2.13	7.61	0.84	0.28	9.20	3.62	1.44	1.01	3.40	6.0
SLP-29	300035	2457816	periurbana	26.68	8.87	1.10	4.94	0.62	0.19	7.04	2.65	1.17	1.78	1.45	4.2
SLP-30	302765	2460258	agrícola	12.24	3.88	0.62	1.16	0.58	0.12	4.05	0.52	0.42	< L.D.	0.92	1.7
SLP-31	302117	2457178	periurbana	21.93	6.65	1.29	4.21	0.71	< L.D.	4.92	3.34	1.29	< L.D.	1.84	6.0
SLP-32	303427	2456065	periurbana	21.94	6.93	1.12	5.96	0.82	< L.D.	7.14	2.50	1.13	< L.D.	2.25	6.5
SLP-33	301897	2458819	periurbana	31.90	9.15	2.20	6.89	0.87	0.32	8.51	3.52	1.85	0.23	3.84	2.2
SLP-34	300284	2456719	periurbana	82.91	25.22	4.83	15.16	1.46	0.52	8.31	12.21	4.86	5.68	14.18	1.0
SLP-35	302474	2458656	periurbana	22.47	6.37	1.59	3.24	0.98	< L.D.	3.88	3.03	1.00	< L.D.	3.57	3.0
SLP-36	303087	2456381	periurbana	29.54	9.15	1.62	5.62	0.84	0.20	7.75	3.07	1.03	1.83	2.01	4.0
SLP-37	305510	2456043	agrícola	31.16	9.41	1.85	1.79	0.67	< L.D.	2.76	4.75	0.90	< L.D.	4.21	4.2
SLP-38	303283	2455423	periurbana	39.22	12.47	1.96	6.98	1.05	0.29	7.01	5.07	2.55	2.63	2.77	5.0

L.D.=Límite de detección

A partir de los resultados reportados en la Tabla 4.10, y de acuerdo con la Figura 4.9, en lo que se refiere a los cationes, el Ca^{2+} presenta una concentración mínima de 1.6 meq/L y una máxima de 25 meq/L, mientras que para el Na^+ su valor mínimo es de 1.1 meq/L y el máximo de 15.2 meq/L, siendo estos dos iones los que presentan las concentraciones más altas.

Por otro lado el Mg^{2+} tiene una concentración mínima de 0.3 meq/L y la máxima registrada es de 4.8 meq/L, y en el caso del ión K^+ presenta una concentración mínima de 0.5 meq/L y una máxima de 1.5 meq/L. Lo anterior se explica por la presencia de rocas volcánicas de composición intermedia a ácida, de edad Terciaria y que participan en los procesos de interacción agua-roca.

En los últimos 5 años, se ha conservado la tendencia con respecto a los cationes dominantes, presentando concentraciones promedio similares ($\text{Ca}^{2+}=6$ meq/L y $\text{Na}^+=2.5$ meq/L), considerando los datos de Martínez-Banda (2005) para la zona de estudio.

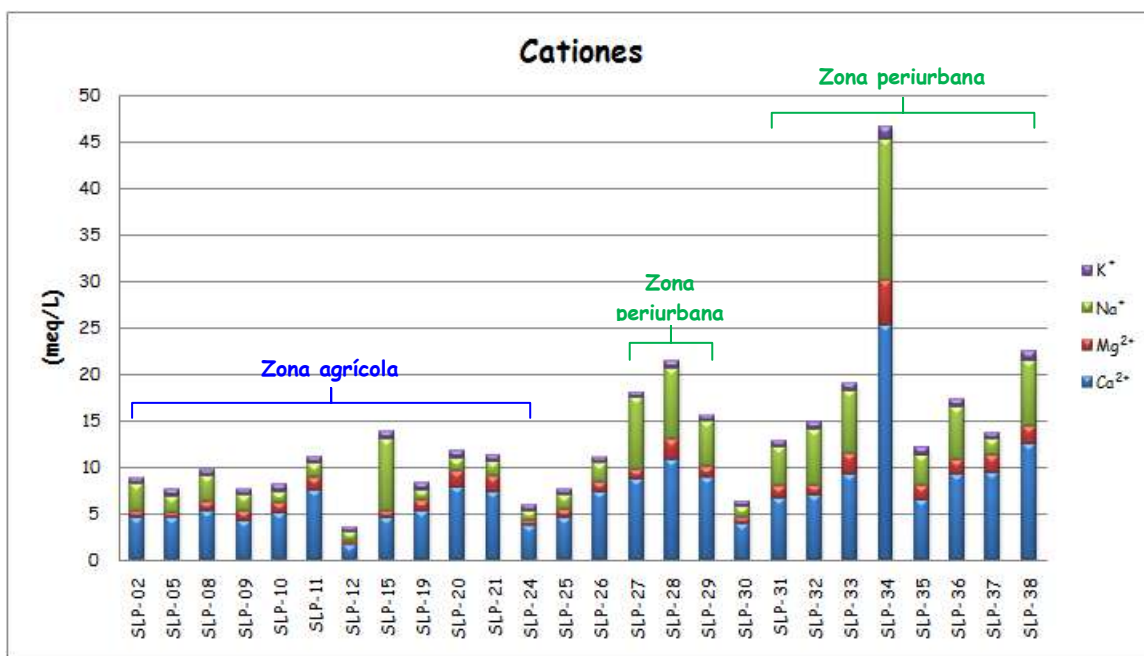


Figura 4.9 Concentraciones de cationes para las muestras de agua subterránea

En la Figura 4.9 se observa que la composición catiónica es sensiblemente menor en la noria SLP-12, ubicada al NE del área de estudio (5 meq/L), siendo ésta la que presenta los valores de concentración más bajos. En cuanto a valores menores a 10 meq/L, se puede formar un grupo conformado por las norias SLP-02, 05, 08, 09, 10, 19, 20, 21, 24 y 30, las cuales se localizan al NE del área de estudio.

Caso contrario ocurre con la noria SLP-34 (ubicada al SW), en la cual se registran los valores de concentración más altos para todos los iones, lo cual puede atribuirse en primera instancia, a que en dicha porción del área de estudio existe mayor influencia del agua residual, sobre todo por la incidencia de descargas clandestinas de aguas residuales de tipo doméstico y sistemas sépticos inapropiados, propios de una zona periurbana.

Con base en lo que establece la NOM-127-SSA1-1994, para el ión Na^+ sólo la muestra SLP-34 sobrepasa el límite de 200 mg/L (8.7 meq/L). Al ser el Na^+ uno de los cationes dominantes en las muestras de agua subterránea, su presencia y relativa abundancia podría atribuirse por un lado, a la influencia del material geológico en el cual se encuentra alojado el acuífero somero, pero también al efecto de procesos antropogénicos inducidos, a partir del agua de infiltración resultante del riego en zonas agrícolas (Hem, 1985), como es el caso de la zona de estudio.

En lo que se refiere a los resultados de la determinación de aniones, la Figura 4.10 muestra que el HCO_3^- es el ión que predomina teniendo una concentración mínima de 1.4 meq/L y una máxima de 11.4 meq/L.

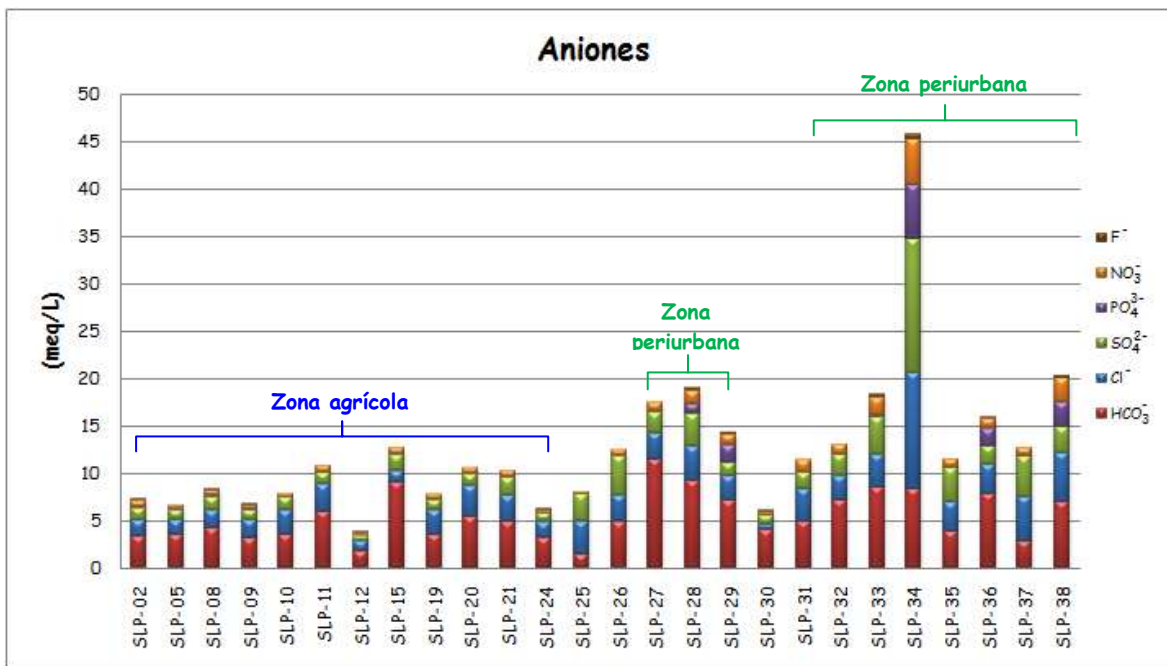


Figura 4.10 Concentraciones de aniones para las muestras de agua subterránea

Otros dos iones relevantes en la composición del agua subterránea son el Cl⁻ con concentraciones entre 0.5 y 12 meq/L y el SO₄²⁻ que presenta valores de concentración que van desde 0.5 meq/L hasta un valor máximo extraordinario que alcanzó los 14 meq/L.

En el caso del ión NO₃⁻, la concentración mínima reportada tiene un valor de 0.2 meq/L y un máximo de 4.9 meq/L. En lo que se refiere al F⁻ este presenta concentraciones altas, teniendo como valor mínimo 0.09 meq/L y un máximo de 0.5 meq/L. Finalmente, para el ión PO₄³⁻ los valores de concentración son muy contrastantes pues la concentración mínima obtenida es de 0.08 meq/L mientras que la máxima es 5.7 meq/L.

De acuerdo con los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, en el caso del ión F⁻ el 46% de las muestras de agua subterránea rebasan el límite de 1.5 mg/L (0.078 meq/L). Para los iones Cl⁻ y SO₄²⁻ cuyo límite es de 250 mg/L (7.05 meq/L) y 400 mg/L (8.33 meq/L) respectivamente, sólo la muestra SLP-34 supera la norma. Con

respecto al ión NO_3^- , el 42% de las muestras superan el límite de 50 mg/L (0.81 meq/L), encontrándose valores de hasta 4.9 meq/L principalmente en las norias localizadas en la porción suroeste del área de estudio (zona periurbana), lo que implica una limitante para su uso como agua potable por esta razón.

Contenido de sílice

Con la finalidad de conocer el contenido de sílice en las muestras de agua, y con ello determinar la influencia del medio geológico en la composición del agua subterránea, se llevaron a cabo los análisis de laboratorio correspondientes, obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 4.11.

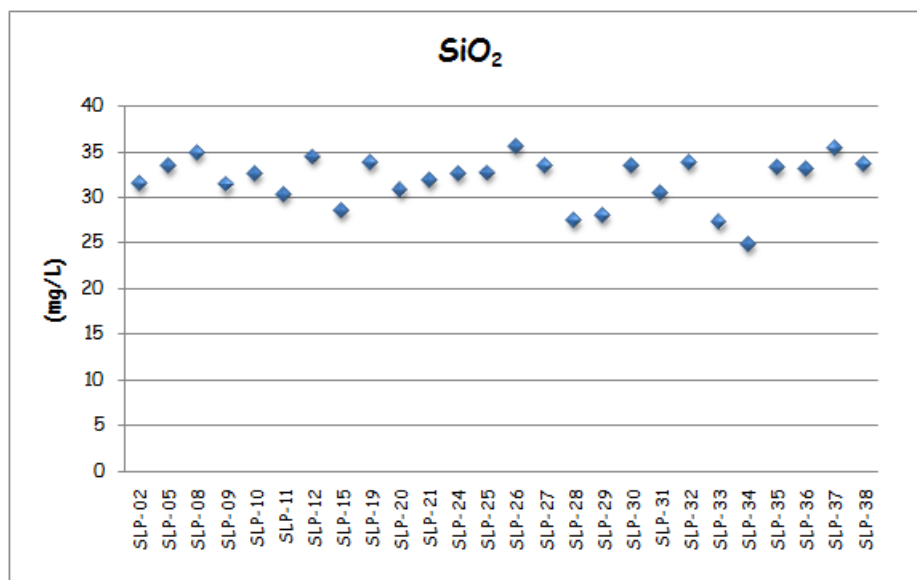


Figura 4.11 Concentración de sílice en las muestras de agua subterránea

Con base en la gráfica de la figura anterior, la concentración de SiO_2 de las muestras varía entre 25 y 35 mg/L, que son valores de concentración menores a los que se tienen en el acuífero profundo (55 - 108 mg/L) tal y como lo han reportado autores como Carrillo-Rivera y Armienta (1989), COTAS-SLP y CONAGUA (2005), Martínez-Banda (2005), Cardona-Benavides (2007) y Cortés-Ortíz (2009).

Con base en lo descrito por Davis (1964), el valor promedio de concentración de sílice comúnmente reportado para las aguas subterráneas es de 17 mg/L; el aumento de las concentraciones de sílice, dependerá entonces de la medida en que éste sea agregado a la solución debido al intemperismo de minerales silicatados presentes en la matriz de la roca en donde se aloja el acuífero (Haines y Lloyd, 1985).

De acuerdo con Cortés-Ortíz (2009), los procesos que se presentan con relación a los altos contenidos de sílice en el agua subterránea del acuífero de SLP son la desvitrificación y alteración hidrotermal de la roca que conforma el acuífero y que producen minerales tales como cuarzo y feldespatos, y consecuentemente la alteración e intemperismo de dichos minerales silicatados.

En este caso, dado que el acuífero somero está formado por material de origen volcánico, se justifica la presencia de altos contenidos de sílice en el agua subterránea de este horizonte acuífero.

Contenido de Cd, Cr, Cu, Fe y Pb

Además de la determinación de elementos mayores, también se llevaron a cabo los análisis correspondientes para determinar el contenido de algunos metales en las muestras de agua subterránea. En la Tabla 4.11 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4.11 Resultados de la determinación de metales de las muestras de agua subterránea

No_muestra	UTM_X	UTM_Y	Zona del área de estudio	(µg/L)				
				Cd	Cr	Cu	Fe	Pb
SLP-02	305408	2459859	agrícola	0.086	0.615	3.18	253.80	0.248
SLP-05	307247	2459358	agrícola	0.039	0.570	1.07	217.41	0.172
SLP-08	307246	2458667	agrícola	0.039	0.485	3.14	293.86	0.232
SLP-09	306294	2459566	agrícola	0.064	0.539	1.57	186.75	0.191
SLP-10	305807	2458643	agrícola	0.087	0.592	1.00	286.15	0.352
SLP-11	304777	2458353	agrícola	0.110	0.432	1.87	342.14	0.472
SLP-12	306928	2459814	agrícola	0.022	0.391	0.53	104.99	0.071
SLP-15	304392	2461724	agrícola	0.038	0.607	4.29	253.09	1.327
SLP-19	303767	2457462	agrícola	0.037	0.542	1.89	248.87	0.281
SLP-20	304412	2457687	agrícola	0.112	0.566	1.37	436.71	0.182
SLP-21	305312	2457298	agrícola	0.020	0.757	2.17	387.15	0.232
SLP-24	306545	2459452	agrícola	0.049	0.589	1.24	180.17	0.354
SLP-25	306038	2460113	periurbana	0.054	0.543	1.48	241.72	0.158
SLP-26	306034	2454284	agrícola	0.026	0.560	1.05	498.78	0.179
SLP-27	306578	2456815	agrícola	0.027	0.567	1.12	389.24	0.170
SLP-28	300916	2457244	periurbana	0.027	0.572	1.88	591.99	0.217
SLP-29	300035	2457816	periurbana	0.021	0.432	0.67	448.59	0.164
SLP-30	302765	2460258	agrícola	0.022	0.514	0.52	189.85	0.074
SLP-31	302117	2457178	periurbana	0.079	0.549	1.11	401.26	0.245
SLP-32	303427	2456065	periurbana	0.013	0.430	0.93	350.50	0.183
SLP-33	301897	2458819	periurbana	0.018	0.443	1.11	492.47	0.129
SLP-34	300284	2456719	periurbana	0.200	1.011	2.20	1331.58	0.487
SLP-35	302474	2458656	periurbana	0.009	0.352	0.91	277.91	0.161
SLP-36	303087	2456381	periurbana	0.018	0.720	1.08	541.22	0.073
SLP-37	305510	2456043	agrícola	0.041	0.320	0.91	433.33	0.058
SLP-38	303283	2455423	periurbana	0.024	0.488	2.60	664.92	0.165
NOM-127				5.0	50.0	2000.0	300.0	10.0

(Valores de la NOM-127-SSA1-1994 en µg/L)

De los cinco metales analizados, el que presenta las concentraciones más altas es el Fe teniendo una concentración mínima de 105 µg/L y una máxima de 1,332 µg/L (Figura 4.12), que es superior al límite permisible de 300 µg/L que marca la norma para agua

potable (NOM-127-SSA1-1994). Cabe mencionar que este es el único elemento que se encontró por arriba de esta norma en el 65% de las muestras de agua subterránea analizadas.

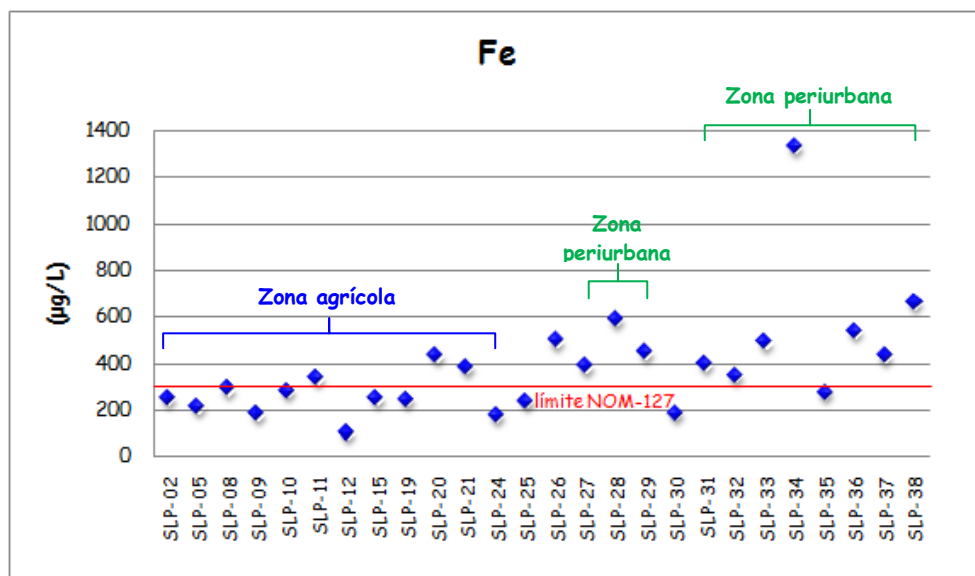


Figura 4.12 Concentración de Fe en las muestras de agua subterránea

Por otro lado, el Cd es el que presenta las concentraciones más bajas con valores entre 0.009 y 0.2 µg/L, le sigue el Pb teniendo concentraciones con valores entre 0.05 y 1.33 µg/L, después el Cr cuyas concentraciones están entre 0.32 y 1.01 µg/L, y finalmente el Cu que tiene una concentración mínima de 0.5 µg/L y una máxima de 4.3 µg/L, tal y como se aprecia en la gráfica de la Figura 4.13.

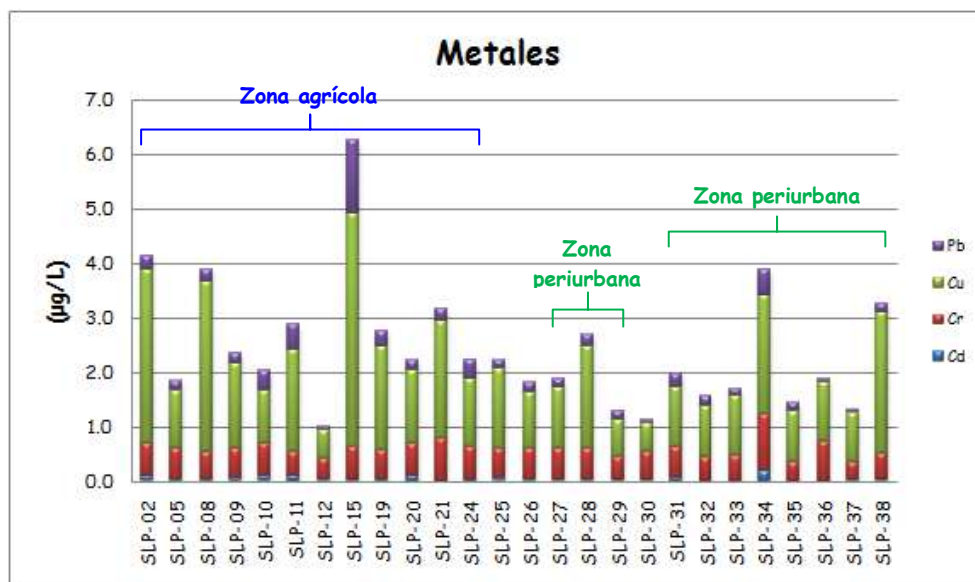


Figura 4.13 Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb en las muestras de agua subterránea

De acuerdo con las gráficas anteriores, con respecto a la concentración de Fe, la muestra que registra el valor más alto es la SLP-34, situación que se repite en el caso del Cd y Cr; esta noria se encuentra en la zona periurbana de San Luis Potosí, lo que implicaría mayor aporte por actividades antropogénicas. Sin embargo, en lo que se refiere a las concentraciones de Cu y Pb, es la muestra con la clave SLP-15 la que presenta los valores más altos, la cual se ubica en la parte norte del área de estudio.

Contenido de coliformes fecales y totales

Como se mencionó en el capítulo 3, durante los trabajos de campo también se tomaron muestras de agua subterránea para la determinación de coliformes fecales y totales, mismas que fueron entregadas al Laboratorio de Calidad del Agua de INTERAPAS en San Luis Potosí, para ser analizadas el mismo día que se recolectaba la muestra.

Cabe aclarar que el análisis realizado a cada una de las 26 muestras de agua subterránea, sólo fue de tipo cualitativo, obteniéndose como resultado que en todos

los casos se reporta positivo para la presencia tanto de coliformes fecales como de coliformes totales.

4.4 Modelo hidrogeológico local del acuífero somero

Como se mencionó en el capítulo 2 de este documento, el acuífero somero del VSLP está conformado por material de origen volcánico (tobas) y depósitos aluviales con limo, arena y grava de aproximadamente 5 a 40 m de espesor. Es un acuífero libre, y de acuerdo con la literatura, la conductividad hidráulica horizontal promedio de este es del orden de 2×10^{-4} m/s.

Para establecer el modelo de funcionamiento hidrogeológico del acuífero somero dentro del área de estudio, se midió la profundidad del nivel estático en algunas de las norias ubicadas dentro del área de estudio. Con dicha información, se obtuvo la elevación del nivel estático, así como la red de flujo subterráneo.

A continuación, se presenta una breve descripción de los resultados obtenidos de la medición del nivel piezométrico y la determinación de la red de flujo subterráneo.

Profundidad del nivel estático

Para conocer la profundidad del nivel freático en el acuífero somero, durante el trabajo de campo del presente estudio, se llevó a cabo la medición del nivel piezométrico en las diferentes norias visitadas. De acuerdo con los datos obtenidos, se tienen valores de profundidad desde 11 hasta 27 m, tal y como se observa en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Relación de norias y niveles piezométricos del agua subterránea

No_muestra	UTM_X	UTM_Y	Altitud (msnm)	NE (m)	ND (m)	Uso_agua
SLP-02	305408	2459859	1839	26.55		Riego legumbres
SLP-05	307247	2459358	1836	21.78	22.05	Abrevadero
SLP-08	307246	2458667	1837	19.54	21.90	Riego
SLP-09	306294	2459566	1838		29.50	Riego hortalizas
SLP-10	305807	2458643	1839		27.30	Riego
SLP-11	304777	2458353	1839		23.41	Riego hortalizas
SLP-12	306928	2459814	1837	23.34	25.04	Riego alfalfa
SLP-15	304392	2461724	1837		12.80	Doméstico, invernadero, riego
SLP-19	303767	2457462	1842	17.41	18.57	Doméstico, abrevadero
SLP-20	304412	2457687	1840	19.20	20.50	Riego alfalfa
SLP-21	305312	2457298	1837	20.54	24.54	Riego (alfalfa, maíz, lechuga)
SLP-24	306545	2459452	1837		29.60	Riego, abrevadero
SLP-25	306038	2460113	1836		32.80	Riego hortalizas
SLP-26	306034	2454284	1839		17.77	Riego alfalfa
SLP-27	306578	2456815	1838		16.97	Riego hortalizas
SLP-28	300916	2457244	1847		9.40	Riego alfalfa
SLP-29	300035	2457816	1847		11.70	Riego hortalizas
SLP-30	302765	2460258	1839		23.65	Riego
SLP-31	302117	2457178	1845		27.02	Riego
SLP-32	303427	2456065	1844		13.44	Riego alfalfa y abrevadero
SLP-33	301897	2458819	1842		19.94	Doméstico y abrevadero
SLP-34	300284	2456719	1851		8.27	Riego hortalizas (brócoli)
SLP-35	302474	2458656	1842		20.02	Riego alfalfa
SLP-36	303087	2456381	1846		14.91	Riego alfalfa
SLP-37	305510	2456043	1840	21.30	21.96	Riego hortalizas
SLP-38	303283	2455423	1845	11.48	12.48	Riego alfalfa

NE (Profundidad del nivel estático); ND (Profundidad del nivel dinámico)

Por otro lado, de acuerdo con la Figura 4.14, los niveles más someros se presentan en la porción S-SW del valle, en las norias ubicadas en los alrededores de los poblados Rivera, Soledad de Graciano Sánchez y El Zapote (zona periurbana), mientras que los niveles más profundos, se presentaron en las norias ubicadas en la porción N-NE del área de estudio (porción norte de la zona agrícola), cerca del poblado Enrique Estrada.

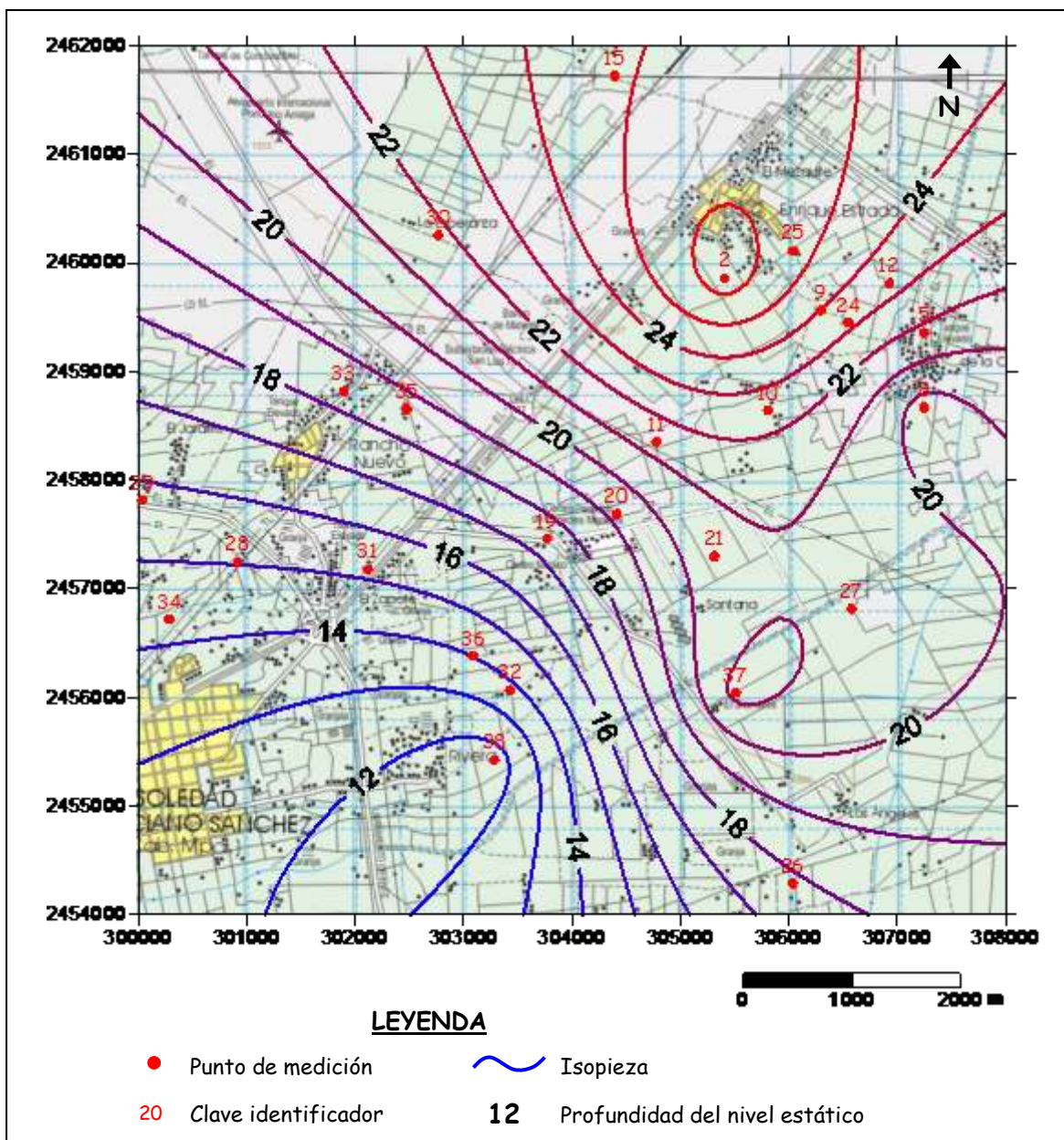


Figura 4.14 Configuración de curvas con isovalores de profundidad del nivel estático (m)

Elevación del nivel estático y red de flujo subterráneo

Con base en los datos de profundidad del nivel del agua y los valores de la elevación del terreno obtenidos para cada una de las norias censadas a partir de la carta topográfica INEGI escala 1:50,000 y los datos del GPS, se elaboró la Figura 4.15 con la configuración de la elevación del nivel estático.

Considerando la información piezométrica y una vez elaborada la configuración de cargas hidráulicas obtenidas a partir del presente estudio, se procedió a definir la dirección de flujo subterráneo del acuífero somero dentro del área de estudio (Figura 4.15), en la cual se considera que el flujo de agua que se mueve a través del medio granular, aún está controlado principalmente por la topografía del terreno, a causa de la baja explotación de agua subterránea del acuífero.

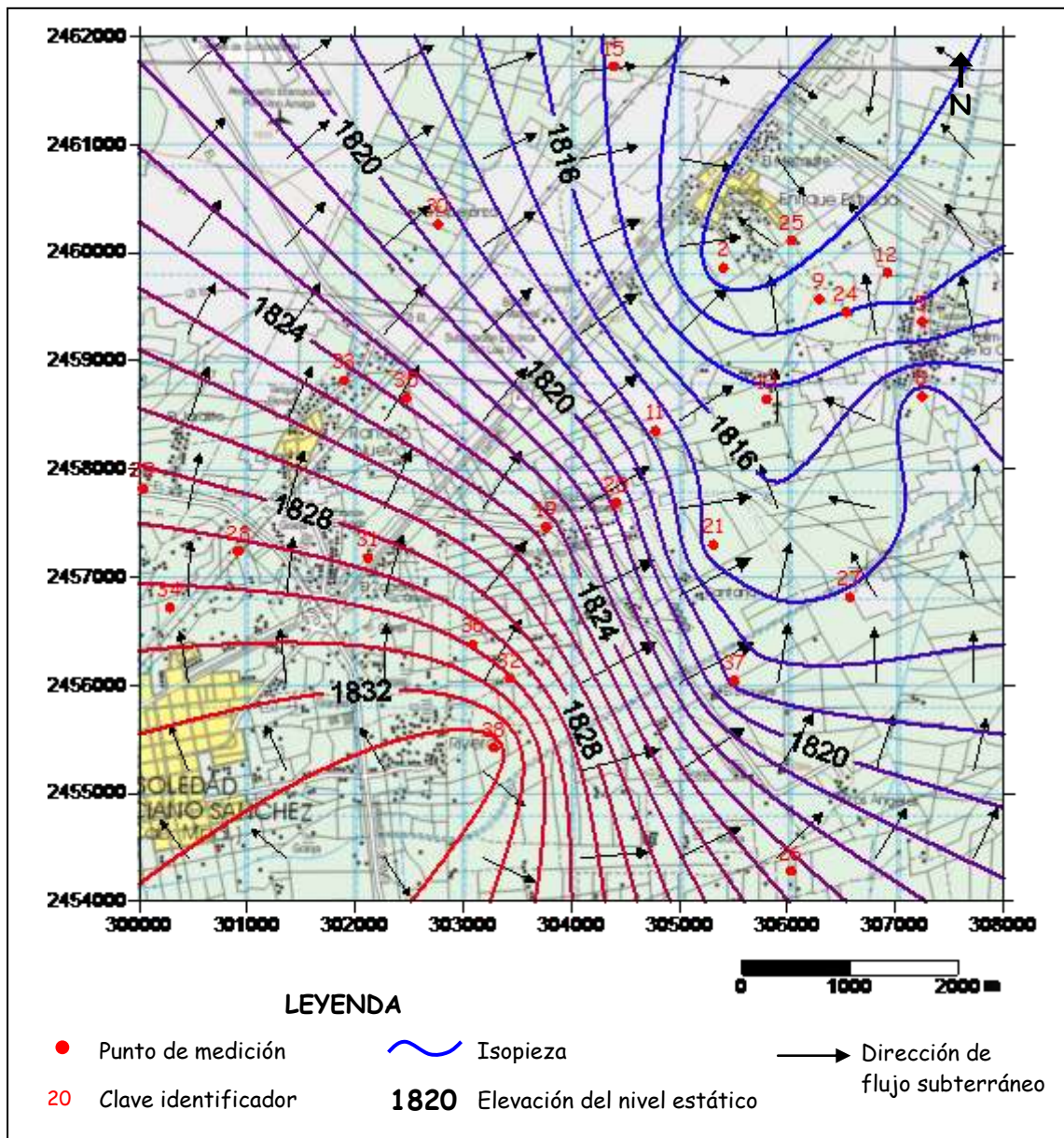


Figura 4.15 Elevación del nivel estático (m) y red de flujo subterráneo

Así, la dirección de flujo subterráneo se establece desde las partes topográficamente más altas, localizadas al suroeste del área de estudio, siguiendo una trayectoria con dirección SW-NE.

A partir de lo anteriormente descrito, se propone el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero somero dentro del área de estudio (Figura 4.16), en donde se establece que en el material aluvial que conforma el acuífero, existe un flujo horizontal con dirección al noreste.

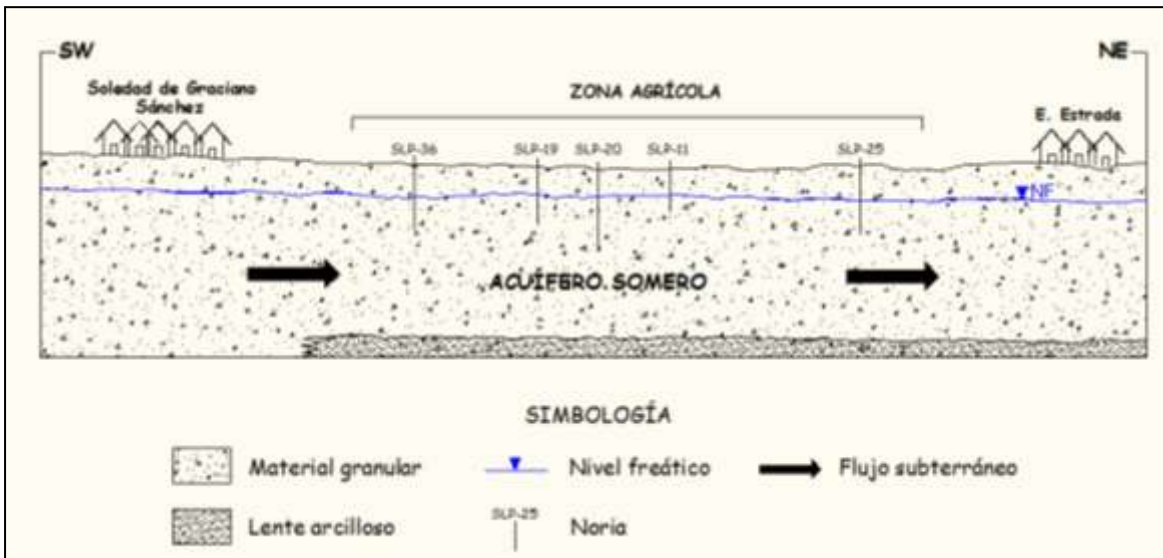


Figura 4.16 Sección esquemática del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero somero

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Interpretación hidrogeoquímica

Después de llevar a cabo el análisis de los resultados de laboratorio, y con ello determinar la composición química tanto de las muestras de agua residual como subterránea, la siguiente actividad consistió en realizar la interpretación hidrogeoquímica, esto con la finalidad de determinar por un lado la familia de agua a la que pertenecen las muestras de acuerdo con el ión dominante, así como para establecer similitudes en cuanto a su composición química de acuerdo con la distribución espacial de las mismas dentro del área de estudio y con ello conocer el comportamiento de los iones analizados en la porción noreste del acuífero.

Para dicha interpretación se utilizaron diferentes métodos gráficos entre los que se encuentran: diagramas triangulares de Piper y diagramas Stiff (Custodio y Llamas, 1983). En el caso de la interpretación del comportamiento espacial de los iones dentro del área de estudio, se hicieron mapas xy con curvas de isoconcentración a través del programa SURFER versión 8 (Golden Software Inc., 2002).

Diagrama de Piper

Con los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio, se empleó el programa AquaChem versión 3.7 (Waterloo Hydrogeologic, 1997) para la elaboración del diagrama de Piper correspondiente para la clasificación de muestras de agua residual y subterránea, mismo que se presenta en la Figura 5.1.

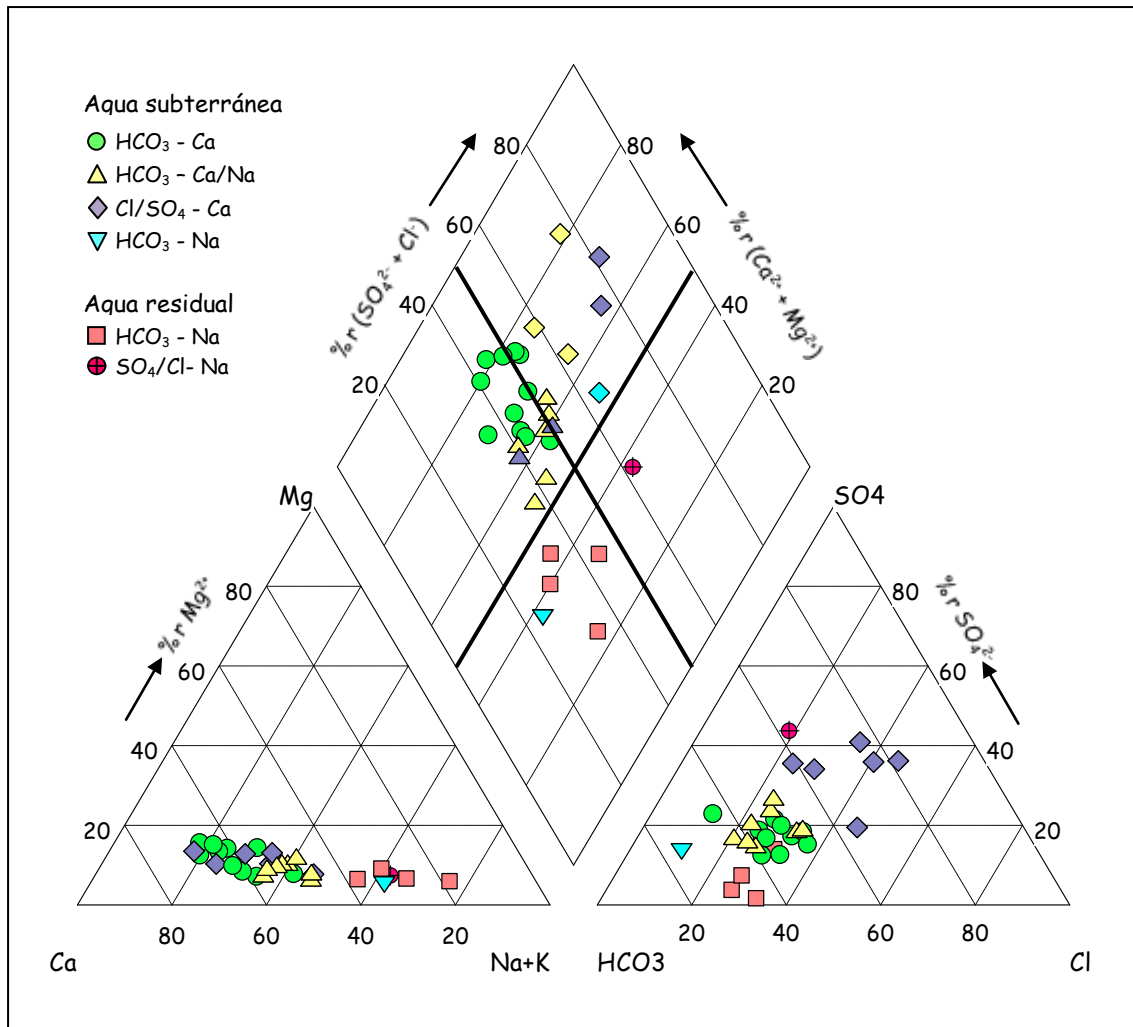


Figura 5.1 Diagrama de Piper para las muestras de agua residual y subterránea

De acuerdo con la figura anterior, y con base en lo descrito anteriormente, para las muestras de agua subterránea se tiene que el 42% de ellas pertenecen a la familia del agua bicarbonatada - cálcica, el 31% pertenece a la familia bicarbonatada - cálcica/sódica, el 23% pertenece a la familia clorurada/sulfatada - cálcica y el 4% restante (muestra SLP-15) pertenece a la familia bicarbonatada - sódica.

En el caso de las muestras de agua residual, y de acuerdo con la figura, cuatro de ellas (AR1, AR3, AR4 Y AR5) pertenecen a la familia de agua bicarbonatada - sódica y sólo la muestra AR2 pertenece a la familia sulfatada/clorurada - sódica.

Con base en el diagrama de Piper, se puede decir que en el caso de las muestras de agua subterránea los iones predominantes son el calcio y el bicarbonato, mientras que para las muestras de agua residual el bicarbonato se mantiene como anión dominante y en el caso de los cationes, ahora es el sodio el que presenta las mayores concentraciones.

Por su distribución dentro del área de estudio, las muestras de agua subterránea de la familia bicarbonatada - cálcica, se localizan principalmente en la porción nor-noreste y central del área, dentro de lo que se considera la zona agrícola, mientras que las muestras pertenecientes a la familia de agua bicarbonatada - cálcica/sódica se ubican principalmente en los alrededores de la zona periurbana (poblados de Rancho Nuevo, Rivera y Soledad de Graciano Sánchez).

Por otro lado, las muestras de agua subterránea de la familia clorurada/sulfatada - cálcica, se localizan relativamente cerca de los canales de distribución de agua residual. Tal es el caso particular de la única muestra de agua subterránea perteneciente a la familia bicarbonatada - sódica (porción norte del área de estudio), la cual tiene una composición muy similar a la de la muestra AR4, lo que podría implicar una marcada influencia del agua residual en la composición química del agua subterránea de esta zona.

Diagramas de Stiff

Se elaboraron los diagramas de Stiff correspondientes a las 26 muestras de agua subterránea y 5 para las muestras de agua residual, mismos que se colocaron en el plano base (Figura 5.2) con la finalidad de identificar, de acuerdo a su forma y distribución dentro de área de estudio, la similitud en cuanto a composición química del agua subterránea y residual.

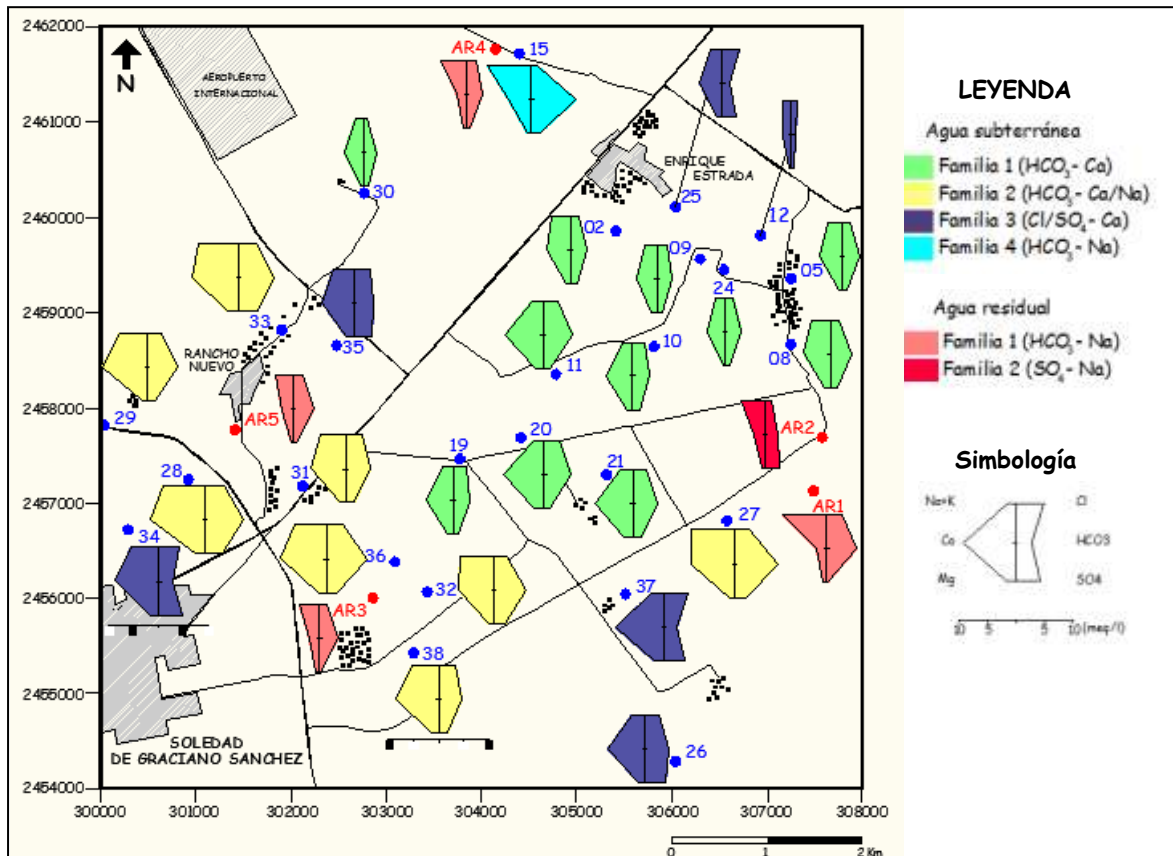


Figura 5.2 Diagramas de Stiff para las muestras de agua residual y subterránea

Como se aprecia en la figura anterior, para las muestras de agua subterránea en general la composición química es muy homogénea, sin embargo se identifican cuatro familias de agua, mismas que se describen a continuación.

- Familia 1. Formada por muestras de agua de composición bicarbonatada - cálcica, con valores de concentración de los iones predominantes entre 5 y 10 meq/L.
- Familia 2. Formada por muestras de agua de composición bicarbonatada - cálcica/sódica, y valores de concentración entre 8 y 15 meq/L de los iones predominantes.

- Familia 3. Formada por muestras de agua de composición clorurada/sulfatada - cálcica y con valores de concentración de los iones dominantes entre 5 y 30 meq/L.
- Familia 4. Formada por una sola muestra de agua (SLP-15), cuya composición es bicarbonatada - sódica.

En el caso del agua residual, las muestras AR1, AR3, AR4 y AR5 presentan una composición bicarbonatada - sódica, sólo que en el caso de la muestra AR1 los valores de concentración de los iones predominantes (Na^+ y HCO_3^-) son mayores a los 5 meq/L, a diferencia de las otras tres muestras en donde los mismos iones presentan valores menores. Con respecto a la muestra AR2, de acuerdo con el diagrama de Stiff, su composición es sulfatada - sódica.

Por otro lado, al igual que en el caso del diagrama de Piper, de acuerdo con su distribución dentro del área de estudio, el agua subterránea de composición bicarbonatada - cálcica se presenta principalmente en la zona agrícola. El contenido de sales aumenta hacia la porción suroeste del área de estudio (zona periurbana), donde el agua subterránea tiene una composición bicarbonatada - cálcica/sódica. En la cercanía de los sitios de descarga de agua residual (muestras AR1-AR5), la composición del agua subterránea aumenta con respecto al contenido de Na^+ , tal es el caso de las muestras SLP-15 y SLP-27.

De acuerdo con lo anteriormente descrito, se corrobora que para las muestras de agua subterránea la composición química predominante es del tipo bicarbonatada cálcica-sódica, lo que concuerda con ser un agua de reciente infiltración, independientemente de la posible afectación antrópica que el acuífero pueda llegar a tener.

Mapas con curvas de isovalores para muestras de agua subterránea

Con la finalidad de entender el comportamiento espacial de los iones contenidos en las muestras de agua subterránea dentro del área de estudio, se elaboraron mapas con curvas de isovalores de concentración (SURFER versión 8.0. Golden Software Inc., 2002) de elementos mayores y metales, así como también de algunos parámetros de campo tales como pH y conductividad eléctrica. A continuación se hace una breve descripción de dicho comportamiento y se presentan sólo algunos de los mapas más representativos.

pH y Conductividad eléctrica

En el caso del pH, los valores más bajos se distribuyen en la parte central y sur occidental del área de estudio, con valores entre 6.4 y 6.7, y que corresponden a las norias ubicadas en la zona agrícola. Por otro lado, los valores más altos se presentan hacia la periferia del área de estudio, en la porción NW, norte y SE con valores desde 6.9 hasta 7.3 (Figura 5.3).

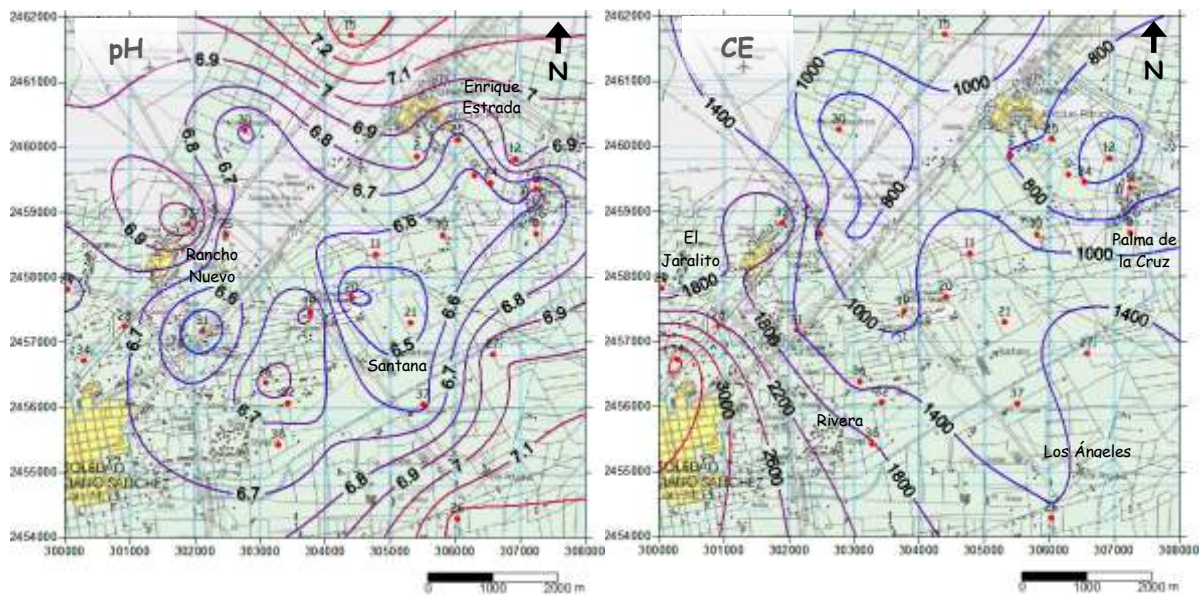


Figura 5.3 Curvas de isovalores de pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Con respecto al comportamiento de la conductividad eléctrica, los valores más bajos se registraron en las muestras correspondientes a las norias ubicadas en la parte N-NE del área de estudio. Existe otra zona con valores intermedios que corresponde a la porción central y sur oriental, representada por las norias localizadas en la zona agrícola, y finalmente la zona con los valores más altos que se encuentra al SW, en las norias ubicadas alrededor de Soledad de Graciano Sánchez y el poblado de Rivera.

De acuerdo con la Figura 5.3, dentro del área de estudio la conductividad eléctrica aumenta en dirección al suroeste, lo cual puede explicarse debido a que, como se presentó en el mapa de diagramas de Stiff, la composición química del agua subterránea aumenta su contenido de sales en dicha dirección.

Cationes

Con respecto a los cationes, de acuerdo con su distribución dentro del área de estudio, el comportamiento espacial de las concentraciones tiene una tendencia muy similar.

Por un lado, los valores de concentración más bajos se localizan en la porción noreste, en los alrededores de los poblados Enrique Estrada y Palma de la Cruz principalmente, salvo en el caso del ión Na^+ en donde los valores bajos se prolongan hasta la porción media del valle (rancho Santana), y del ion K^+ cuyos valores también son bajos en las cercanías del rancho Los Ángeles (porción sureste del área de estudio).

En la porción central del valle, y siguiendo una línea con orientación SE-NW, se localiza la zona de valores intermedios, ubicada principalmente en la zona agrícola y cerca de los poblados Rancho Nuevo, La Esperanza, Santana y Los Ángeles, tal y como se observa en la Figura 5.4.

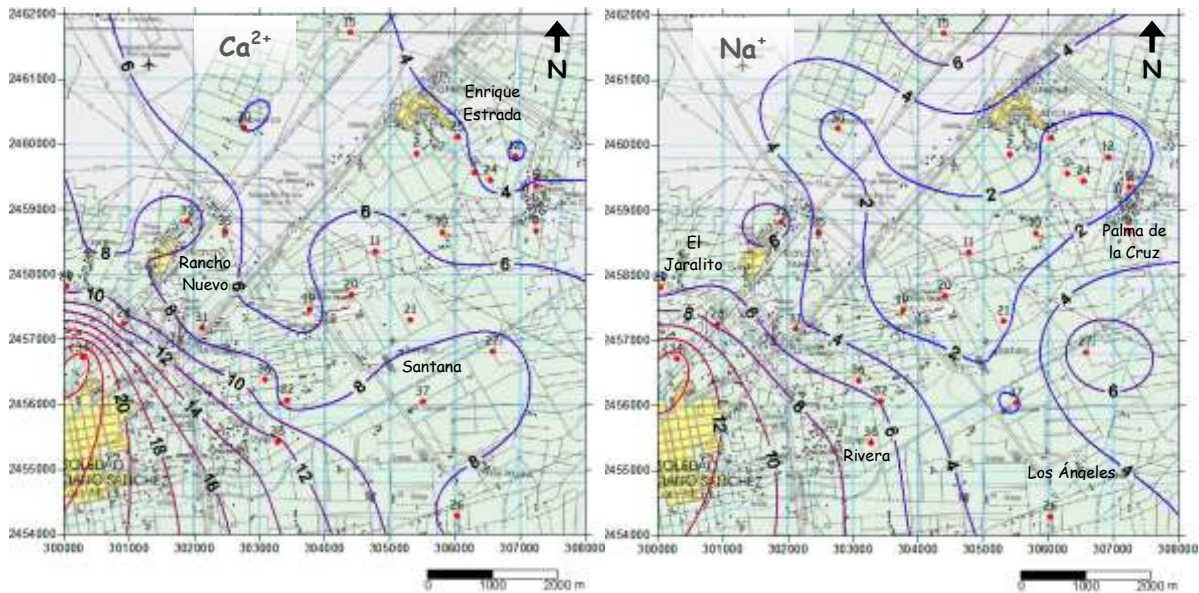


Figura 5.4 Curvas de isovalores de concentración de Ca^{2+} y Na^+ (meq/L)

Finalmente, los valores de concentración más altos se distribuyen a lo largo de la porción suroeste del área de estudio, en los alrededores de las comunidades El Jaralito, El Zapote y Rivera, pero principalmente en las cercanías del poblado de Soledad de Graciano Sánchez.

Con base en lo anteriormente descrito, y dado que en general la distribución de las concentraciones de cationes tiene este patrón de comportamiento, se puede decir que existe una tendencia en el aumento de los valores de las mismas, en una dirección con orientación NE-SW.

Aniones

En lo que se refiere a los aniones, en términos generales la mayoría de las configuraciones tienen un comportamiento similar a las de los cationes. Las concentraciones más bajas se localizan en la zona N-NE del área de estudio, en los alrededores de los poblados de Enrique Estrada, Palma de la Cruz y el rancho La Esperanza (Figura 5.5).

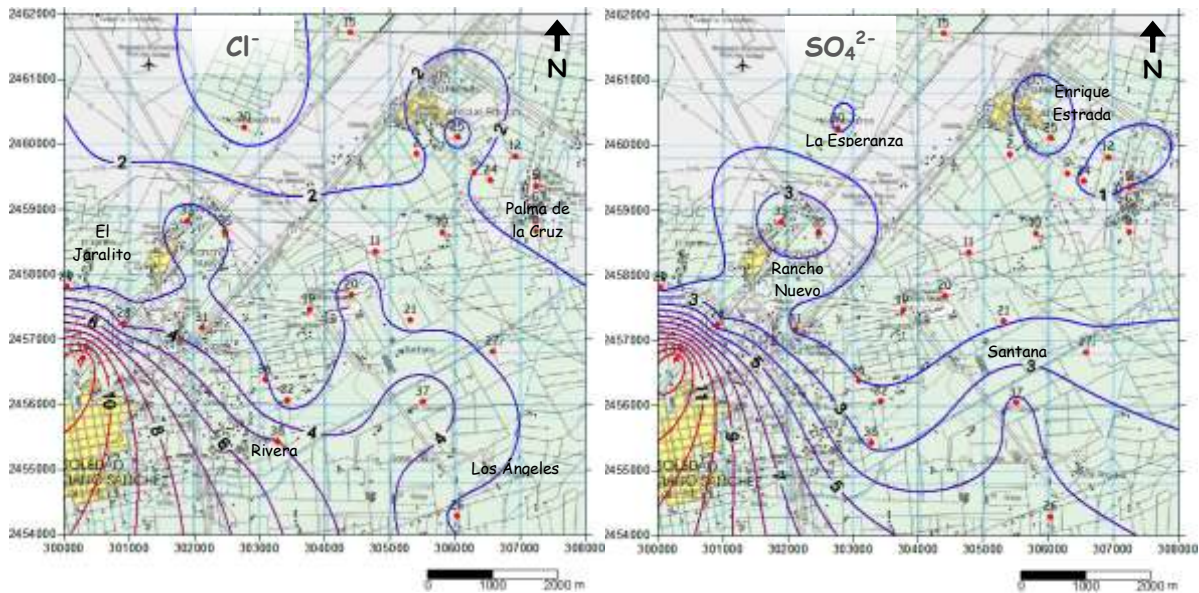
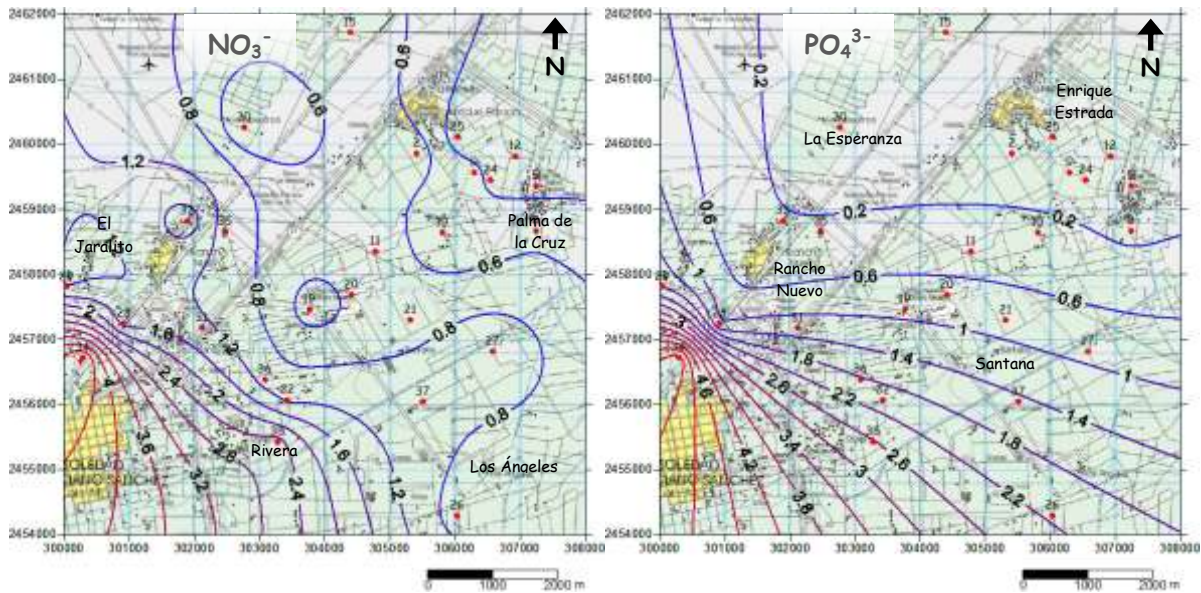


Figura 5.5 Curvas de isovalores de concentración de Cl^- y SO_4^{2-} (meq/L)

Las concentraciones con valores intermedios se presentan en parte de la zona agrícola (porción central del valle), y en los alrededores del poblado Rancho Nuevo, ranchos Santana y El Diamante y el poblado Los Ángeles.

Por otro lado, las concentraciones más altas se presentan nuevamente en la zona suroeste del área de estudio, en las cercanías de las comunidades El Jaralito, El Zapote, Rivera y Soledad de Graciano Sánchez, siendo esta última la zona en donde se concentran los valores más altos.

Para mostrar que el comportamiento de los aniones es muy similar en la mayoría de los iones analizados, en la Figura 5.6 se presenta la configuración de isovalores de concentración de NO_3^- y PO_4^{3-} . En ambos casos se observa que los valores de concentración bajos, se localizan hacia la porción noreste y central del área de estudio y que corresponde principalmente con la zona agrícola, mientras que los valores de concentración más altos se encuentran ubicados en la periferia de los centros de población (zona periurbana del poblado de Soledad de Graciano Sánchez).



5.6 Curvas de isovalores de concentración de NO_3^- y PO_4^{3-} (meq/L)

Si se considera que una de las principales fuentes antropogénicas de fosfatos son los jabones y detergentes (Meybeck, 1982), entonces resulta congruente obtener dichos valores en los alrededores de zonas de mayor actividad humana, y servicios de drenaje deficientes o inclusive inexistentes.

Finalmente, al igual que en el caso de los cationes, de acuerdo con el comportamiento espacial de los aniones dentro del área de estudio, es posible establecer que existe un aumento en las concentraciones con dirección NE-SW.

Metales

Con respecto al comportamiento de los metales, en lo que se refiere al Cd, Cr y Fe, al igual que en el caso de los cationes y aniones, las concentraciones más bajas se presentan en la porción N-NE del área de estudio, cerca de los poblados Enrique Estrada, Palma de la Cruz y el rancho La Esperanza.

Por otro lado, los valores intermedios se tienen en la porción central del valle (parte de la zona agrícola), mientras que las concentraciones más altas se presentan al SW

del área de estudio, cerca de la comunidad Rivera, rancho El Jaralito y el poblado de Soledad de Graciano Sánchez (Figura 5.7).

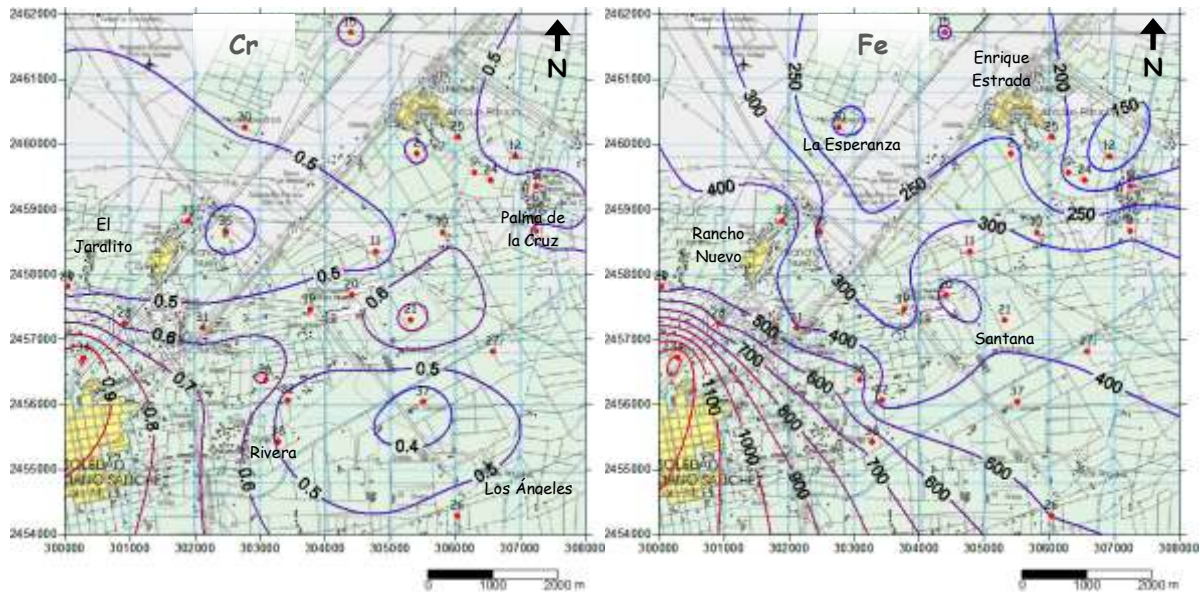


Figura 5.7 Curvas de isovalores de concentración de Cr y Fe ($\mu\text{g/L}$)

Para los metales Cu y Pb, el comportamiento de las concentraciones es diferente. En el caso del cobre las concentraciones más bajas se presentan en una franja con orientación NW-SE que atraviesa el rancho La Esperanza y llega hasta los alrededores del rancho El Diamante.

Las concentraciones con valores altos se ubican en tres zonas, la primera de ellas se localiza en la porción SW, en los alrededores de los poblados Rivera y Soledad de Graciano Sánchez, la segunda se presenta al sur de Palma de la Cruz y la tercera se localiza al norte del área de estudio, en los alrededores de Enrique Estrada.

En el caso del plomo (Figura 5.8), reporta las concentraciones más bajas en casi toda la porción centro-sur del área de estudio en lo que corresponde a la zona agrícola, mientras que los valores más altos se presentan al norte de la zona de estudio (noria SLP-15).

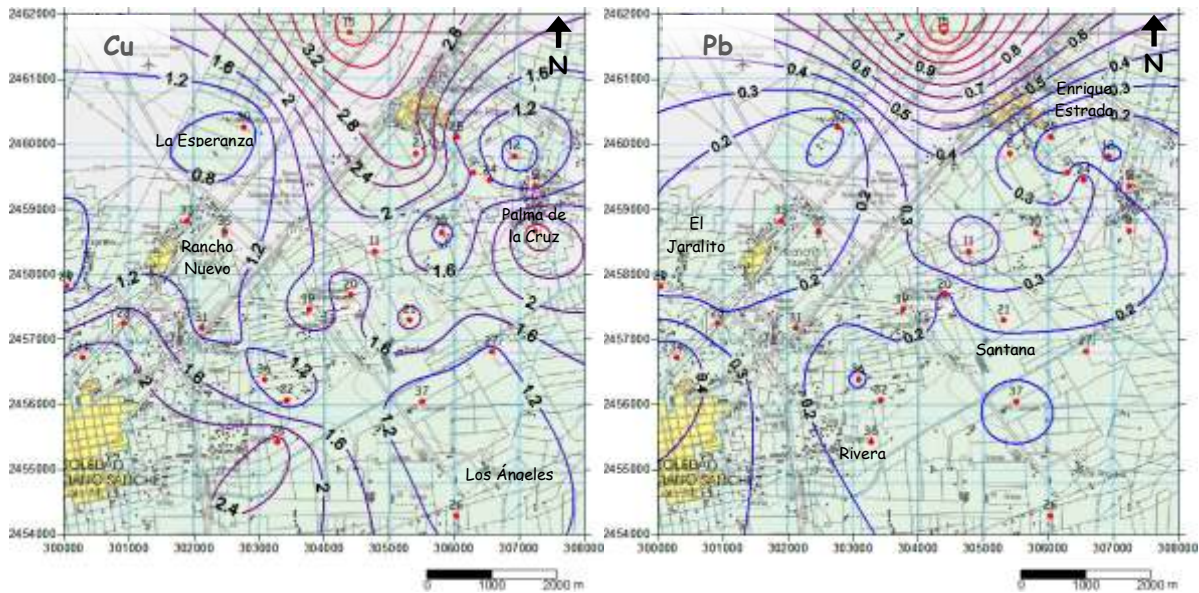


Figura 5.8 Curvas de isovalores de concentración de Cu y Pb ($\mu\text{g/L}$)

Como puede apreciarse en las Figuras 5.4 a 5.8, en general el sentido en el que aumentan las concentraciones tiene una orientación con dirección NE-SW, contrario a lo que podría esperarse con base en lo establecido en el modelo hidrogeológico conceptual local, en donde se obtuvo que la dirección de flujo subterráneo tiene una orientación SW-NE.

Este comportamiento, generalizado para la mayoría de los iones, podría explicarse debido a que es probable que en la zona noreste del área de estudio, se estén llevando a cabo procesos de precipitación generados a partir de las reacciones entre el agua subterránea y el material que forma el acuífero, considerando además que el pH del agua subterránea en dicha zona, tiene valores entre 7.0 y 7.3, mientras que al suroeste disminuye hasta 6.5.

Por otro lado, se debe considerar que el nivel piezométrico de la porción NE tiene mayor profundidad que en la zona SW, dando la posibilidad de que en la recarga vertical, el agua que se infiltra tenga mayor interacción con la zona no saturada y se lleven a cabo procesos de precipitación e intercambio iónico con el medio.

5.2 La función del sistema suelo como filtro de contaminantes

A fin de evaluar el comportamiento del suelo como participante en los procesos de retención de contaminantes, se realizó la evaluación ecológica de los mismos, con base en la información obtenida a partir de los resultados de la determinación en campo y laboratorio de parámetros físico-químicos de las muestras de suelo, y otros tales como la capacidad de aireación (*CA*), capacidad de agua disponible (*dCC*), capacidad de campo (*CC*), y conductividad hidráulica (*Kf*), calculados a través de tablas y nomogramas contenidos en el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al.*, 2006).

Así, se tiene que el suelo de la porción noreste del área de estudio (perfil MS-S12), presenta una textura franco arenosa y un pH entre 6.4 y 7.2, mientras que hacia la zona suroeste (perfil MS-S11) el suelo tiene una textura franco arcillosa a franco arenosa y un pH entre 6.7 y 8.2. Esto en general se traduce en un tipo de suelo neutro a moderadamente alcalino y bien aireado (Brady y Weil, 2002).

Por otro lado, y de acuerdo con la evaluación ecológica realizada a partir de la caracterización de los perfiles, se obtuvo lo siguiente:

- Dado que la capacidad de campo (*CC*), representa la cantidad de agua que puede ser retenida por el suelo contra la fuerza de gravedad (Siebe *et al.*, 2006), y en esta agua también se pueden encontrar sustancias en solución, de igual forma representa entonces una medida de la capacidad de retención de estas sustancias evitando que sean lixiviadas al subsuelo.

La *CC* del suelo dentro del área de estudio es media, por lo tanto algunas sustancias en solución podrían ser retenidas y otras translocadas al acuífero.

- La conductividad hidráulica (K_f) es una propiedad del suelo que lo capacita para transmitir agua. Esta puede estimarse considerando la textura y densidad aparente del suelo (Siebe *et al.*, 2006).

En el caso del presente trabajo se estimó con los cálculos correspondientes, que en la zona noreste del área de estudio (perfil MS-S12) esta tiene un valor medio, con lo cual el paso de sustancias en solución contenidas en el agua de riego tendría una velocidad intermedia, dando cierta posibilidad de que dichos solutos puedan interactuar con el suelo. Para la porción suroeste del área de estudio (perfil MS-S11), la conductividad hidráulica es alta en los primeros centímetros y baja a mayor profundidad, permitiendo que el agua que se infiltra tenga mayor tiempo de interacción con el suelo.

- De la capacidad de intercambio catiónico (CIC), las sustancias atraídas, son principalmente cationes tales como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y Al^{3+} , pero también pueden ser atraídos aniones tales como Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} (Brady y Weil, 2002).

En los suelos predomina principalmente la CIC, y es menor en las muestras del perfil MS-S12 (Tabla 4.6), ubicado al noreste del área de estudio, por lo que en esta zona el suelo no tiene capacidad retener y adsorber en las partículas de arcilla y materia orgánica los metales tales como Cd, Cr, Cu, Fe y Pb. En el caso de las muestras obtenidas del perfil MS-S11, la CIC es alta en los primeros centímetros y media a mayor profundidad, teniendo entonces en la zona suroeste del área de estudio, un suelo con mayor capacidad para retener cationes.

Cabe mencionar que adicional a la CIC, como se mencionó anteriormente el pH del suelo dentro del área de estudio es neutro a moderadamente alcalino, lo cual contribuye a que bajo dichas condiciones los cationes tiendan a precipitar, limitando así la movilidad de metales pesados.

También es importante tomar en cuenta que suelos arenosos, generalmente tienen bajos contenidos de material coloidal (Brady y Weil, 2002). Tal es el caso del tipo de suelo presente dentro del área de estudio (Xerosol háplico), el cual en general reporta contenidos muy bajos de materia orgánica (0.25 a 1.8%; Tablas 4.5 y 4.6), así como también bajos contenidos de arcilla, según lo obtenido en las determinaciones realizadas por difracción de rayos X (Tabla 4.8).

Para el intercambio aniónico, aunque este no se determinó en el presente trabajo, al igual que en el caso de los cationes, los aniones son retenidos por coloides del suelo con superficies cargadas positivamente (p.e. óxidos de Fe y Al, caolinita y alofano), los cuales atraen aniones tales como SO_4^{2-} y NO_3^- .

De acuerdo con la determinación de la composición mineralógica por DRX, en las muestras de suelo se observó la presencia de pequeñas cantidades de material caolinítico (halloysita), el cual pudo llegar a formarse por la alteración de feldespatos y otros minerales silicatados de origen volcánico. Sin embargo, dado que la caolinita es una arcilla cuya carga depende principalmente del pH del medio, de acuerdo con su PZC y el pH neutro del suelo dentro del área de estudio, está cargada negativamente (Appelo y Postma, 1993), por lo que no tiene la posibilidad de contribuir en la retención de aniones aportados a través del riego con agua residual.

Por otro lado, en lo que se refiere a la presencia de óxidos e hidróxidos de Fe y Al, no fue posible identificarlos a través de la técnica de DRX, debido a que su límite de detección es muy bajo (0.5%). En suelos con bajo desarrollo y clima predominantemente seco, el contenido de minerales de carga variable es muy escaso, por lo tanto la posibilidad de que se lleven a cabo mecanismos de retención por adsorción de iones cargados negativamente (SO_4^{2-} y NO_3^-) es limitada, de tal forma que se descarta este proceso.

Sin embargo, en lo que se refiere al contenido de Fe, Vargas-Olvera (1999) reportó contenidos entre 900 y 1120 mg/Kg en el suelo de una zona ubicada al sureste de la ciudad de San Luis Potosí, en los alrededores del Tanque Tenorio, aún cuando en dicha zona no se aplica riego con agua residual, por lo que estos contenidos podrían asociarse a un aporte natural del medio geológico, aunque se desconoce si dicho Fe se presenta en forma de óxidos e hidróxidos.

Con respecto al contenido de elementos mayores de los extractos del suelo, en general las concentraciones de los diferentes iones analizados tienden a aumentar con la profundidad a lo largo del perfil, sin embargo sólo el NO_3^- tiene concentraciones con valores superiores a los establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

Además, es importante mencionar que al igual que ocurre en las muestra de agua subterránea, en las muestras de los extractos del suelo se obtuvieron valores de NO_3^- bajos en el perfil ubicado al noreste del área de estudio (MS-S12), mientras que en el perfil ubicado en la porción suroeste (MS-S11), las concentraciones alcanzan valores de hasta 130 mg/L (Figura 4.8).

Así, finalmente se evaluó la capacidad filtro y amortiguadora del suelo dentro del área de estudio, en lo que se refiere a la presencia de sustancias contaminantes aportadas por el agua residual aplicada para riego, que pueden encontrarse suspendidas o disueltas en la solución del suelo, y que podrían ser translocadas al subsuelo, y en consecuencia al acuífero somero. Esta filtración se puede llevar a cabo físico-químicamente, cuando las sustancias pueden ser adsorbidas sobre las superficies activas de las partículas más finas del suelo (arcilla y materia orgánica), a lo cual se le conoce como capacidad de amortiguamiento.

Se realizó el cálculo de la filtración de partículas suspendidas gruesas en los dos perfiles de suelo analizados (MS-S11 Y MS-S12), a través de una primera

aproximación que considera la suma de la capacidad de agua disponible (dCC), y una tercera parte de su capacidad de aireación (CA), de acuerdo con la siguiente ecuación (Blume, 1990; tomado de Siebe *et al.*, 2006).

$$dCC + 1/3 CA (\% \text{ Vol}) \dots(3)$$

A partir de dicha ecuación, se obtuvo que la capacidad amortiguadora del suelo es muy baja en la zona del perfil MS-S11 y media en la zona del perfil MS-S12.

Con base en todo lo anteriormente descrito, y de acuerdo con la información disponible obtenida a partir de los resultados de la determinación de parámetros físico-químicos de laboratorio, se puede decir que el suelo en la porción noreste del área de estudio (MS-S12) al presentar una CIC en general baja, y tener bajos contenidos de materia orgánica y arcilla, podría no tener la capacidad de retener cationes, como es el caso de los metales Cd, Cr, Cu, Fe y Pb contenidos en el agua residual utilizada para el riego de la zona agrícola.

Sin embargo, se debe considerar que en esta zona se obtuvo una capacidad de amortiguamiento media, además de que la profundidad del nivel freático del acuífero está entre 20 y 25 m, lo que implica la existencia de una zona no saturada (ZNS) de gran espesor, lo cual podría permitir una mayor interacción entre el agua de riego y el medio a través del cual se infiltra. Todo lo anterior podría verse reflejado en la presencia de valores de concentración menores en esta porción del área de estudio.

Por otro lado, en la porción suroeste (perfil MS-S11), la CIC es alta en los primeros centímetros del suelo y media a profundidad, el contenido de materia orgánica y arcilla es bajo, y la capacidad amortiguadora obtenida es muy baja. Con estas características, es probable que el suelo en esta zona tenga cierta capacidad para retener cationes, tales como los metales pesados contenidos en el agua residual. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que en esta porción del área de estudio, el nivel

piezométrico es menos profundo, por lo que la zona no saturada tiene menor espesor, lo que se traduce en una menor interacción entre el agua de infiltración (agua residual) y el medio por donde atraviesa.

En el caso de los aniones tales como Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} , las muestras de suelo del perfil MS-S11 presentan cierto contenido de arcillas del grupo del caolín (halloysita), sin embargo debido al pH del suelo, su superficie está cargada negativamente, por lo que no tiene la capacidad de retener aniones.

Por todo lo anteriormente mencionado, se puede establecer que el suelo dentro del área de estudio, tiene cierta capacidad de retener cationes como es el caso de los metales analizados (Cd, Cr, Cu, Fe y Pb), además de que al pH neutro del medio estos pueden precipitar.

En lo que se refiere a la existencia de procesos geoquímicos que propicien la retención de aniones, por el carácter neutro a ligeramente alcalino del suelo esto es poco probable, pues se sabe que dichos procesos se llevan a cabo a pH más bajos.

5.3 Relación entre la composición química del agua residual y subterránea

A partir del análisis de la composición química de las muestras de agua residual y subterránea, y con base en la información obtenida de la interpretación hidrogeoquímica, es posible determinar si existe una relación entre la composición química de ambos tipos de agua, y con ello establecer si el riego con agua residual en la zona agrícola ha influido en la calidad del agua del acuífero somero del VSLP. Todo lo anterior, sin olvidar el papel que juega el suelo como el medio a través del cual se infiltra el agua que alimenta el acuífero.

Por un lado tenemos el agua residual, tomada de cuatro canales de distribución de diferente procedencia. Las muestras AR2, AR3, AR4 y AR5, fueron tomadas de los canales Río Santiago, General 3 y 4 y San Felipe respectivamente, mismos que conducen agua residual de origen exclusivamente municipal, es decir conformadas por desechos urbanos entre los que se encuentran excretas domésticas, aceites, grasas, detergentes, solventes, sustancias orgánicas y sintéticas (Cirelli, 2004).

En cambio, la muestra AR1 fue tomada del canal Industrias II, el cual conduce agua residual de origen industrial que de acuerdo con Cirelli (2004), dentro del área de estudio la conforman la industria alimenticia, textil, fabricación de papel y celulosa, vidrio, química, eléctrica, minera, metalúrgica, manufacturera y automotriz.

Con respecto a su composición, el agua residual es principalmente del tipo bicarbonatada - sódica, presentando concentraciones que se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

En lo que se refiere al contenido de los metales Cd, Cr, Cu, Fe y Pb, el que presenta las concentraciones más altas es el Fe; sin embargo, en todos los casos dichos metales se mantienen con concentraciones por debajo de los límites de la NOM-001-ECOL-1996.

Algunos trabajos realizados previamente dentro del área de estudio, han incluido el estudio y análisis de la composición del agua residual. Tal es el caso del *"Plan integral de saneamiento para el reuso de aguas residuales"* (Comisión Estatal del Agua de San Luis Potosí, 2001) en el cual se incluyen resultados de los análisis realizados al influente del Tanque Tenorio, ubicado al SE de la ciudad de San Luis Potosí.

Los parámetros analizados en este estudio contemplan: conductividad eléctrica, F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , sustancias activas al azul de metileno (SAAM), Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, entre otros. Los valores de los resultados obtenidos de dichos parámetros, en su mayoría son superiores a los obtenidos en la presente tesis, excepto en el caso de los parámetros conductividad eléctrica, fluoruros, cloruros, nitratos y sustancias activas al azul de metileno, en donde los valores son similares en orden de magnitud.

Por su parte Martínez-Banda (2005), realizó análisis a muestras de agua residual también tomadas del Tanque Tenorio, sin embargo en este estudio no se contemplan las determinaciones de elementos mayores y sólo se hace referencia al contenido de algunos metales, entre los que se encuentran Cd, Cr, Cu y Pb; en este caso los valores de concentración obtenidos, son similares a los que resultan en el presente trabajo.

Con respecto al agua subterránea de esta región del valle, de acuerdo con los resultados, ésta tiene una composición bicarbonatada - cálcica/sódica principalmente, aunque también se tienen algunas muestras cuya composición es del tipo clorurada/sulfatada - cálcica.

De las concentraciones reportadas, sólo una muestra supera los límites máximos establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 en lo que se refiere a los iones Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} ; sin embargo en el caso del F^- y NO_3^- más del 40% de las muestras superan el límite máximo establecido en dicha norma.

En lo que se refiere al contenido de los metales analizados, el Fe es el que registra las mayores concentraciones, además de ser el único que supera el límite máximo permisible de la NOM-127-SSA1-1994 en más del 60% de las muestras analizadas.

Con la finalidad de determinar la posible relación entre el agua residual y subterránea, las Figuras 5.9 a 5.12 muestran los valores máximo, mínimo y promedio para cada uno de los iones mayores y metales, de cada una de las familias de agua subterránea definidas a partir de los diagramas de Piper (Figura 5.1) y Stiff (Figura 5.2).

En el caso del agua residual, las concentraciones de las 5 muestras se agruparon en una sola barra considerando igualmente el valor máximo, mínimo y promedio de cada ión analizado.

Con base en lo anteriormente descrito, en el caso de los cationes, para el Ca^{2+} y Mg^{2+} (Figuras 5.9a y 5.9b) las concentraciones del agua subterránea son mayores que las del agua residual, mientras que para el Na^+ y K^+ las concentraciones en ambos tipos de agua tienen un rango con valores similares (Figuras 5.9c y 5.9d).

En lo que se refiere al comportamiento del Ca^{2+} y el Mg^{2+} , la diferencia en los valores de concentración entre los dos tipos de agua, puede deberse a que en el agua residual estos cationes no son los principales constituyentes, mientras que en el agua subterránea son aportados por el suelo y el medio geológico de manera natural, con base en la composición mineralógica del material que forma el acuífero.

Con respecto al Na^+ y el K^+ , su comportamiento se ve influenciado por el material geológico (material volcánico de composición intermedia a ácida) que conforma el acuífero, pero también por los aportes del riego con agua residual, que como se ha descrito anteriormente, su carga catiónica es principalmente de tipo sódica.

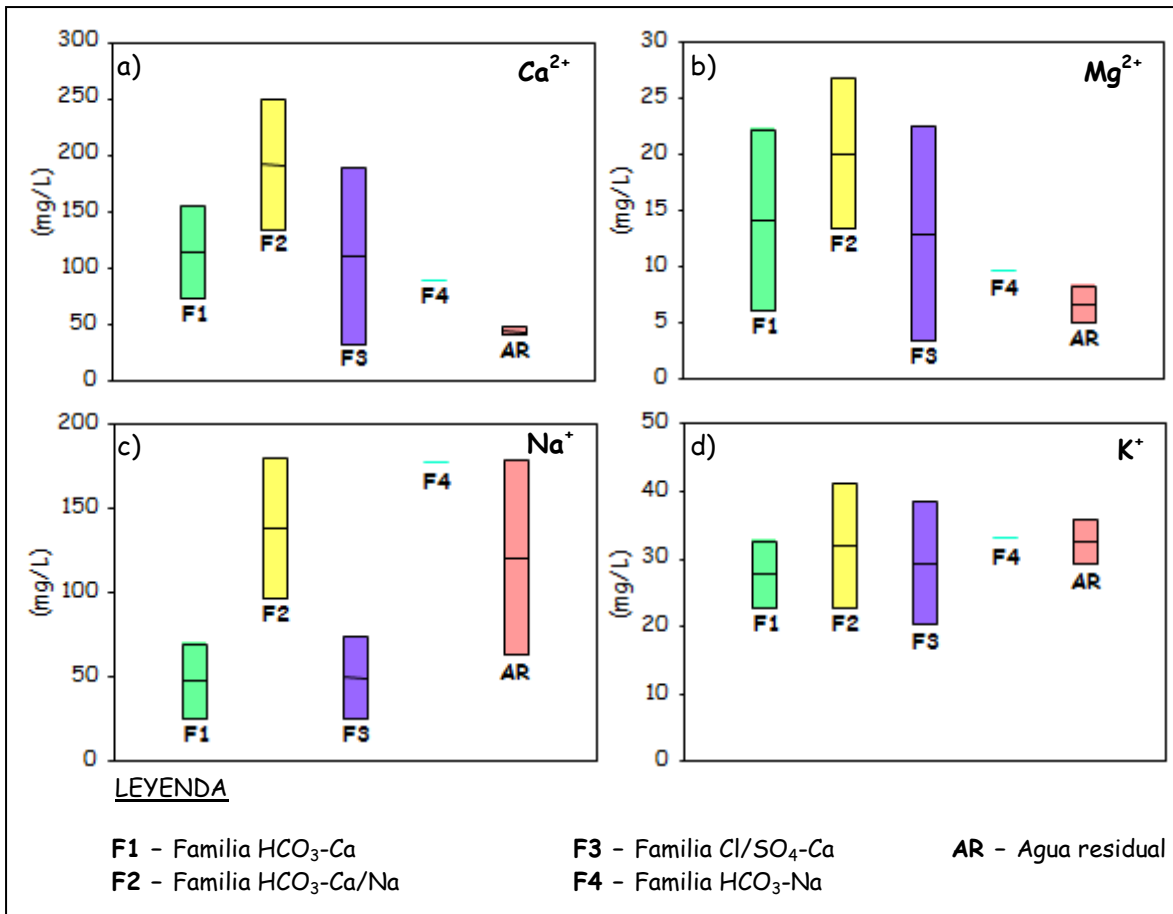


Figura 5.9 Gráfica comparativa de la concentración de cationes del agua residual vs. agua subterránea

En el caso de los aniones, de acuerdo con la figura 5.10, el F⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻ y PO₄³⁻ tienen concentraciones mayores en el agua subterránea que en el agua residual, mientras que para los iones Cl⁻ y SO₄²⁻ los valores de concentración en ambos tipos de agua son similares en magnitud.

Para el F⁻, la diferencia entre las concentraciones del agua subterránea y residual (figura 5.10a), puede deberse a que en la primera de ellas se dé un proceso de acumulación. Este proceso puede ser generado por los aportes del agua residual utilizada para riego, cuyo contenido de flúor está dado por ser aguas de desecho que tienen como fuente de abastecimiento el agua del acuífero profundo, la cual tiene

altas concentraciones de dicho ión (Carrillo y Armienta, 1989), así como por el contenido intrínseco de flúor que tiene el agua subterránea del acuífero somero.

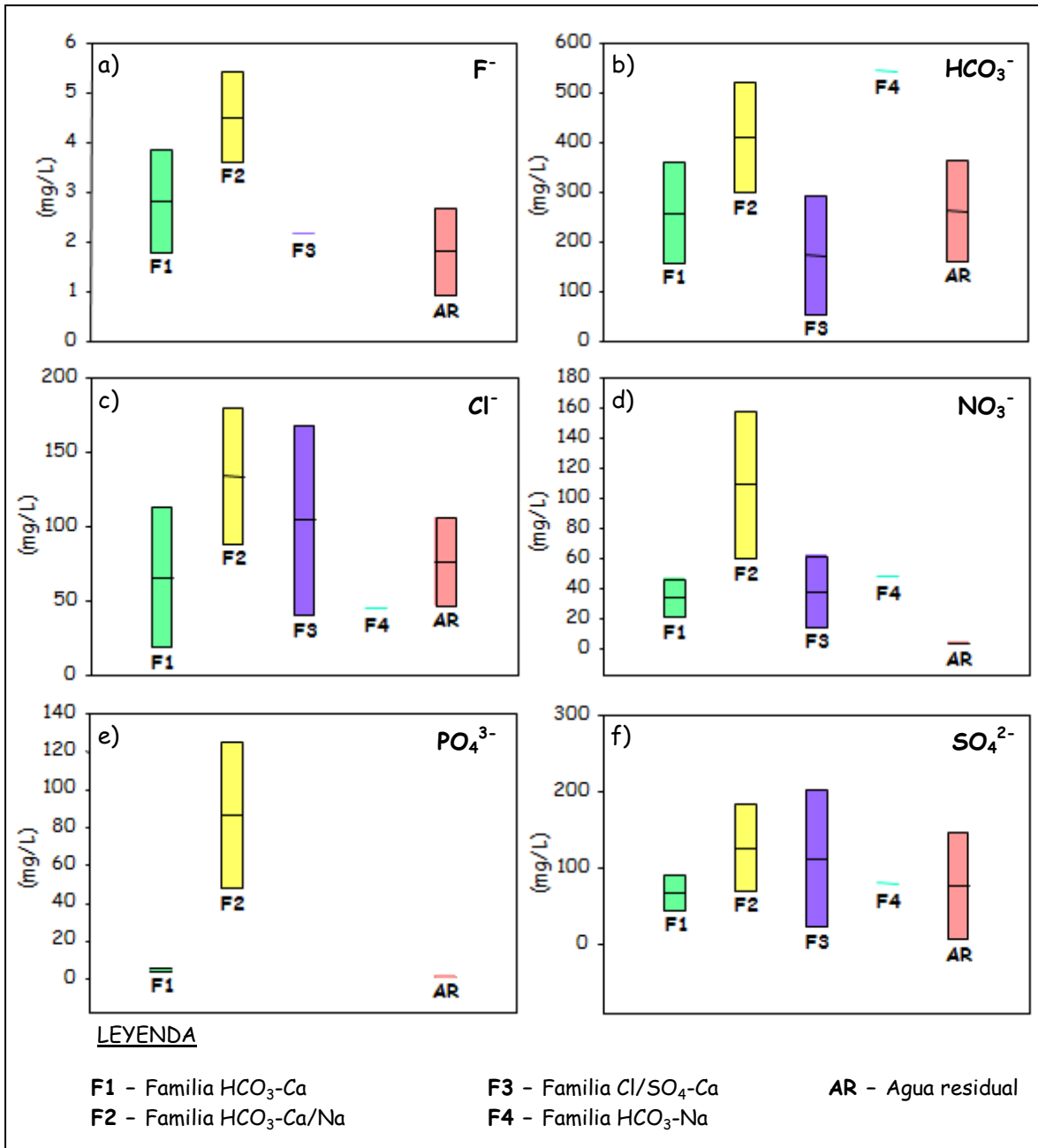


Figura 5.10 Gráfica comparativa de la concentración de aniones del agua residual vs. agua subterránea

En lo que se refiere al HCO_3^- , la información permite establecer que dicho ión se presenta en concentraciones sensiblemente mayores en el agua subterránea (Figura 5.10b), que podrían estar correlacionadas con la presencia de nitratos aportados como resultado de la infiltración de aguas residuales (Carrillo y Armienta, 1989).

Con respecto al comportamiento de las concentraciones de NO_3^- , los valores de concentración en el agua subterránea son mayores que los del agua residual (Figura 5.10d). Esto se debe principalmente por que el nitrógeno presente en el agua residual generalmente está en forma del ión NH_4^+ (Kass *et al.*, 2005). Una vez que el agua entra en el suelo, inicia el proceso de nitrificación en el cual el NH_4^+ es transformado a NO_2^- y este a su vez en NO_3^- por la actividad de bacterias aerobias de tipo *nitrobacter*.

Este proceso de nitrificación se realiza mejor en un medio neutro o ligeramente alcalino y en un suelo aireado, condiciones que de acuerdo con los análisis físico-químicos de las muestras de suelo y la geología local dentro de la zona, son similares a las que se presentan en nuestro caso de estudio, por lo que resulta lógico encontrar valores tan bajos de NO_3^- en el agua residual y altos en el agua subterránea (Foppen, 2002).

En el caso de los iones Cl^- y SO_4^{2-} (figuras 5.10c y f), presentan concentraciones similares en el agua subterránea y residual, lo que se asocia con aportes de provenientes de actividades antropogénicas (Kass *et al.*, 2005). Se infiere que tienen un comportamiento conservativo, ya que no pueden ser retenidos por procesos de intercambio iónico o de adsorción en la ZNS, la cual de acuerdo con los resultados obtenidos de las muestras de suelo, está formada principalmente por material arenoso con contenidos bajos de materia orgánica y minerales arcillosos.

Adicionalmente, el agua que circula exclusivamente por rocas ígneas, posee concentraciones bajas de Cl^- (Davies y DeWiest, 1966), mientras que las aguas residuales de tipo doméstico tienen concentraciones de 20 a 50 mg/L (Carrillo y Armienta, 1989), lo que sumado a los efectos de concentración en el medio geológico a causa del clima subárido, también produce un aumento considerable en el contenido de dicho ión en el agua subterránea.

Con respecto al contenido de metales, de acuerdo con sus valores de concentración, en el caso del Cd, Cr y Pb el agua residual tiene valores mayores que los del agua subterránea (Figura 5.11).

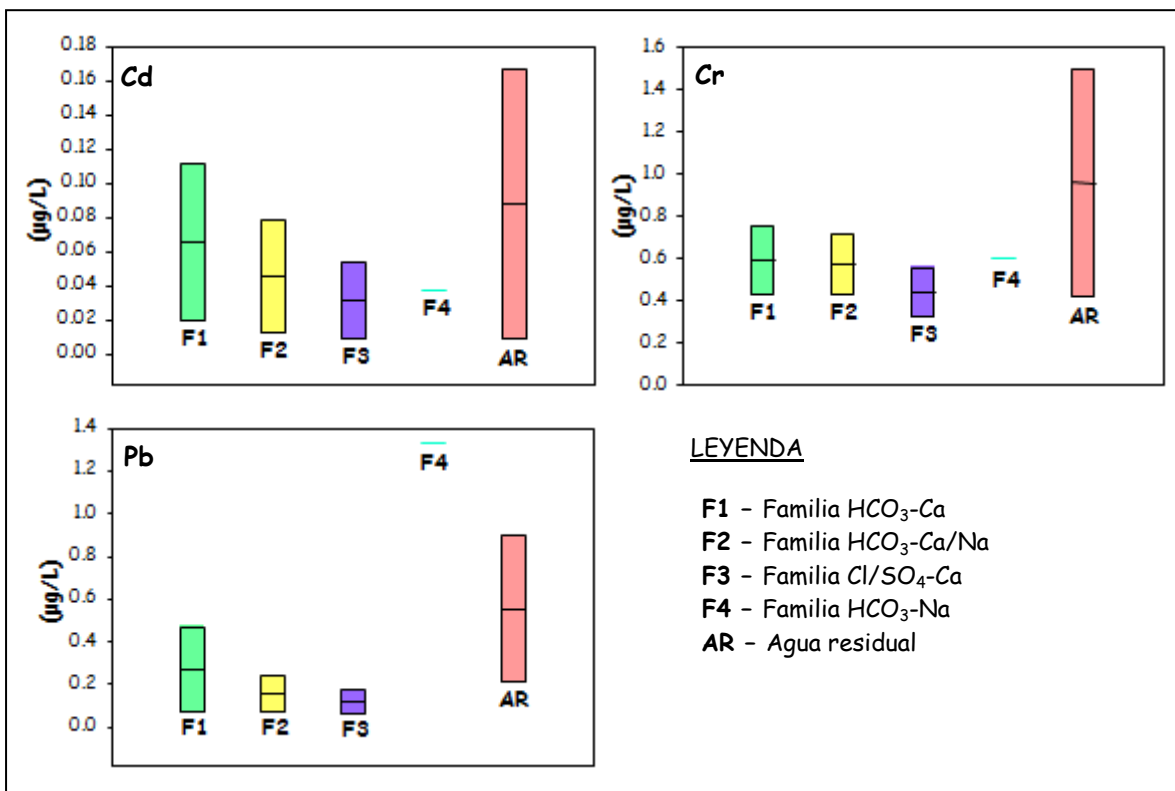


Figura 5.11 Gráfica comparativa de la concentración de Cd, Cr y Pb del agua residual vs. agua subterránea

Para los metales considerados en la figura anterior, el hecho de que la concentración del agua residual sea mayor que la del agua subterránea, puede explicarse debido a

que las concentraciones registradas en el agua residual muestran la influencia de aportes de tipo industrial, sobre todo si se considera que una de las muestras proviene del canal Industrias II.

Por otro lado, en el caso del agua subterránea, los valores de concentración son menores, como resultado de la función amortiguadora del suelo, que como se ha mencionado anteriormente, posee propiedades físico-químicas que le confieren cierto porcentaje de retención de iones cargados positivamente. Dicha función amortiguadora adquiere relevancia, sobre todo si se considera que en el presente trabajo sólo se estudio el suelo a una profundidad máxima de 1.5 m, mientras que de acuerdo con la piezometría, la ZNS dentro del área de estudio tiene un espesor aproximado de 12 a 25 m, lo que brindaría oportunidad para el desarrollo de procesos de retención de contaminantes.

En el caso del Cu y Fe, es el agua subterránea la que presenta mayores concentraciones, en particular para el Fe en donde tres de las cuatro familias presentan valores superiores a los límites de la NOM-127-SSA1-1994 (Figura 5.12).

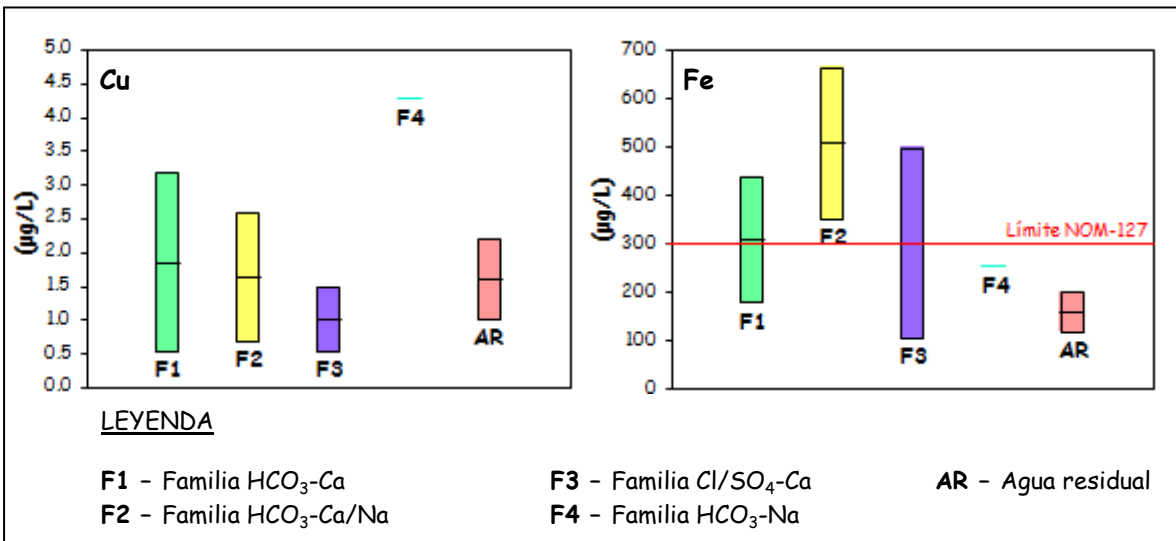


Figura 5.12 Gráfica comparativa de la concentración de Cu y Fe del agua residual vs. agua subterránea

En un estudio realizado para determinar la afectación de suelos regados con agua residual en los alrededores del Tanque Tenorio (Vargas-Olvera, 1999), se midieron los contenidos de varios metales entre los que se encontraba el Fe. Además de los sitios regados con agua residual, se consideraron otros tres de control en donde no se regó con este tipo de agua, obteniéndose como resultado que aún en dichos sitios, las concentraciones de Fe presentaban valores entre 900 y 1120 mg/kg, comparados con los valores de 1000 a 1300 mg/kg de los sitios regados con agua residual.

Existe la posibilidad de que las altas concentraciones de Fe encontradas en las muestras de agua subterránea, se deban a que dicho metal estaba presente como partículas de tamaño coloidal, por lo que al filtrar la muestra, el Fe logró atravesar la membrana de 0.22 μm y ponerse en solución al disminuir a un pH de 2 la muestra para su conservación y futuro análisis en el laboratorio.

Otra posibilidad es que, debido a que en el valle de San Luis Potosí han existido zonas de riego con agua residual con diferentes periodos de aplicación, al pasar de los años ha habido disminución en el área irrigada. Es decir, que existen zonas de cultivo en donde hace 50 años se practicaba el riego con agua residual, que en los últimos 10 años ha dejado de realizarse dicha práctica, y aunque en la actualidad no se utiliza este tipo de agua para riego, podría existir una acumulación de metales en el suelo.

Con respecto a las concentraciones de Cu, las familias de agua subterránea F1 a F3, presentan concentraciones similares a las del agua residual, mientras que la familia F4 (muestra SLP-15) tiene una concentración mayor, lo cual puede deberse a la cercanía de dicha noria con uno de los canales de distribución de agua residual que atraviesan el área de estudio.

Carrillo y Armienta (1989), también reportan valores altos de Cu (<0.06 mg/L) al norte de la ciudad de San Luis Potosí por efecto del uso de aguas de desecho

industrial, pero que no son significativas por encontrarse por debajo de los límites establecidos en la norma de calidad del agua para uso y consumo humano.

De acuerdo con todo lo anteriormente descrito, se puede establecer que sí existe una relación entre la composición química del agua residual y subterránea, si bien no en todos los iones, si en el caso del Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cd , Cr , Cu , Fe y Pb .

De igual forma, se pone de manifiesto la función amortiguadora del suelo, el cual de acuerdo con sus propiedades físico-químicas, en la porción noreste del área de estudio (zona agrícola) tiene una capacidad de amortiguamiento media, además de que la ZNS tiene un espesor aproximado de 20 a 25 m, dando oportunidad a que el agua que se infiltra tenga mayor tiempo de interacción con el medio por donde atraviesa, permitiendo que exista una mayor posibilidad de que se presenten procesos tales como el intercambio iónico y la precipitación.

Tal es el caso de los metales Cd , Cr , y Pb en donde al pH neutro a moderadamente alcalino que tiene suelo dentro del área de estudio, dichos metales tiendan a precipitar. Lo anterior, podría explicar el por qué del comportamiento de las concentraciones de los diferentes iones, los cuales en general presentan las menores concentraciones en la porción noreste del área de estudio

Para los aniones, dados los valores de concentración obtenidos de dichos iones (especialmente del NO_3^-) y las propiedades del suelo, se considera que este último no tiene las características necesarias para retenerlos, por lo que pueden ser translocados al acuífero.

En lo que se refiere a la porción suroeste del área de estudio, el suelo tiene una capacidad de amortiguamiento baja, sin embargo su CIC es intermedia, por lo que de acuerdo con lo anterior, y considerado que el pH del suelo en esta zona también es neutro, puede presentarse la precipitación de metales pesados como los analizados en

este trabajo. Por otro lado, al igual que en el caso de la porción noreste, al no contar con las propiedades físicas necesarias para la retención de aniones, el suelo de la porción suroeste no tendría la capacidad de filtrar iones como el NO_3^- , permitiendo la lixiviación de los mismos, logrando generar afectación al acuífero.

Lo anterior puede apreciarse, en el comportamiento espacial de los diferentes iones dentro del área de estudio, en donde la generalidad de isoconcentraciones tienden a aumentar hacia la porción suroeste, y en el caso particular de aniones tales como F^- y NO_3^- , estos manifiestan valores superiores a los límites permitidos en la NOM-127-SSA1-1994 en más del 40% de las muestras.

5.4 Evaluación de parámetros ambientales

En lo que se refiere a los parámetros ambientales, en este apartado se consideran aquellos que afectan la calidad del agua subterránea. Para tal efecto, y con base en los resultados obtenidos durante el análisis de la composición química de las muestras de agua subterránea y residual, se establecen como parámetros indicadores a los iones Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , así como también algunos parámetros determinados en campo entre los que se encuentran las sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y la conductividad eléctrica (CE).

A lo largo de este capítulo, ya se ha abordado el tema de los valores de concentración y el comportamiento que presentan dentro del área de estudio los iones Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} . Sin embargo, en ningún caso dichos iones superan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, caso contrario o a lo que ocurre con el NO_3^- , el cual como se comentó anteriormente, sí superó los límites de dicha norma en el 42% de las muestras, por lo que a continuación se presenta un análisis más detallado de su comportamiento dentro del área de estudio.

De acuerdo con la Figura 5.13, las concentraciones más bajas se localizan al este, noreste y porción central del área de estudio, mientras que las concentraciones más altas se presentan al oeste y suroeste.

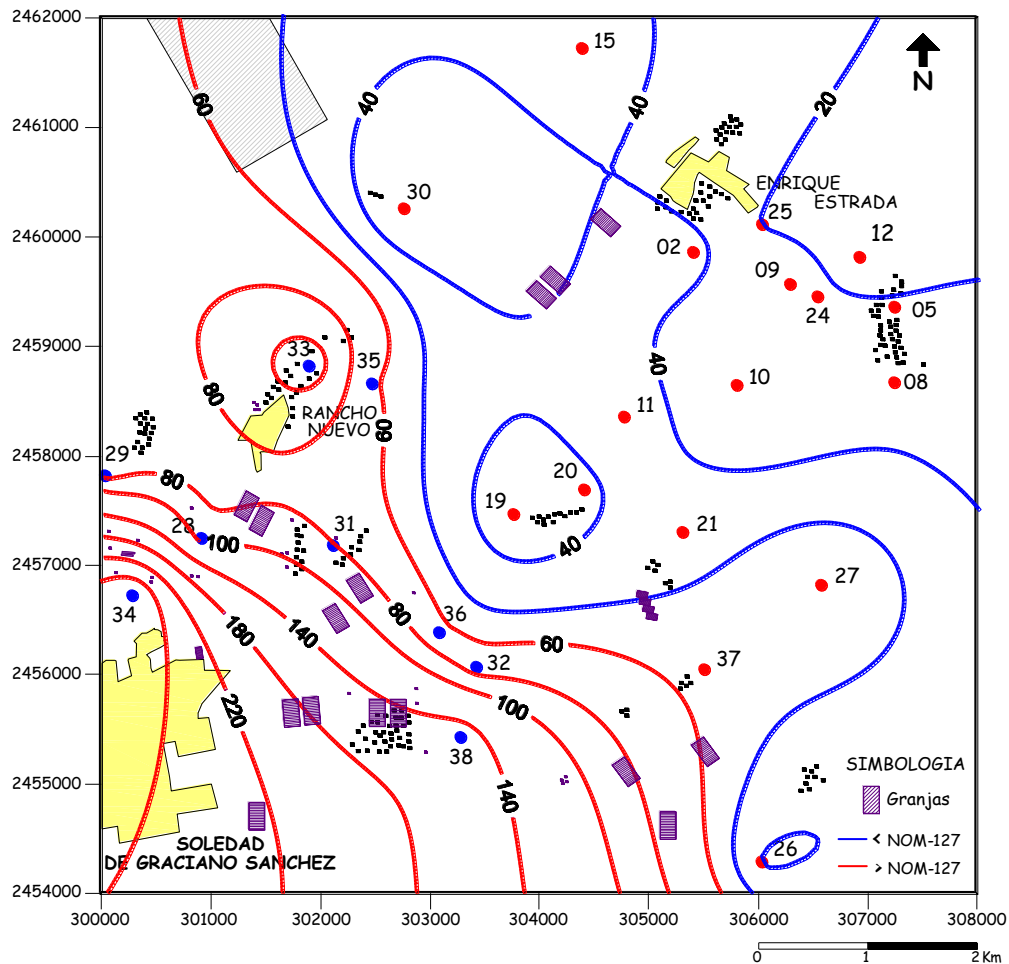


Figura 5.13 Curvas de isovalores de concentración de NO_3^- (mg/L) y distribución de granjas dentro del área de estudio

Estudios previos del acuífero somero realizados en todo el valle de SLP, Carrillo-Rivera y Armienta (1989), encontraron que las concentraciones de NO_3^- ya presentaban valores máximos de 80 mg/L, mientras que Martínez-Banda (2005) y Cardona-Benavides (2007) reportaron valores cercanos a 120 mg/L. En especial, una parte de la zona de estudio de éste último, coincide con la de la presente

investigación, por lo que en comparación con los valores registrados en el 2008, muestran un incremento en las concentraciones.

Como se observa en la Figura 5.13, la zona en donde se presentan las concentraciones con valores inferiores al límite máximo permisible, coincide con la zona agrícola, siendo esta una de las regiones del área de estudio en donde más se utiliza el agua residual para riego. Sin embargo, la razón por la cual podría explicarse este comportamiento, puede deberse al hecho de que en dicha zona agrícola el espesor de la ZNS tiene entre 20 y 25 m, dando mayor oportunidad a que el agua que se infiltra tenga más tiempo de contacto con el medio por donde pasa, y con ello abrir la posibilidad de que exista cierto porcentaje de retención de NO_3^- . Además, al ser esta una zona de cultivo, se debe considerar, que las plantas absorben parte de este nitrógeno, mismo que se transloca hacia la biomasa aérea (Brady y Weil, 2002).

Por otro lado se tiene que las concentraciones más altas se presentan al SW, lo cual podría explicarse, debido a que las norias localizadas en ésta porción del área de estudio se encuentran ubicadas en una zona periurbana cercana al municipio de Soledad de Graciano Sánchez, por lo que es muy probable que en dicha zona no existan sistemas sépticos apropiados, e incluso descargas clandestinas, para el desalojo de aguas residuales de origen doméstico (Agrawal, 1999; Foppen, 2002; Dzwireo, 2006).

Cabe mencionar que aunado a esta situación, en esta misma zona del área de estudio se ubican varias granjas de ganado vacuno, porcino y de aves de corral (Figura 5.13), en las que muy probablemente se generen cantidades considerables de residuos líquidos y sólidos (urea y estiércol), y cuyo desalojo se lleve a cabo a través de prácticas inapropiadas de disposición de residuos (Jang-Cheon *et al.*, 2000).

Otro parámetro a considerar es la concentración de SAAM (sustancias activas al azul de metileno) que involucra algunos compuestos orgánicos, sustancias fosfatadas y

detergentes. Este parámetro tiene un comportamiento similar al de los demás parámetros analizados, presentando los valores más bajos en la porción NE del área de estudio, mismos que van incrementándose hacia el SW. De acuerdo con la norma oficial NOM-127-SSA1-1994 que establece un límite máximo permisible de 0.5 mg/L, el 70% de las norias presentan problemas de afectación por SAAM, tal y como se muestra en la Figura 5.14.

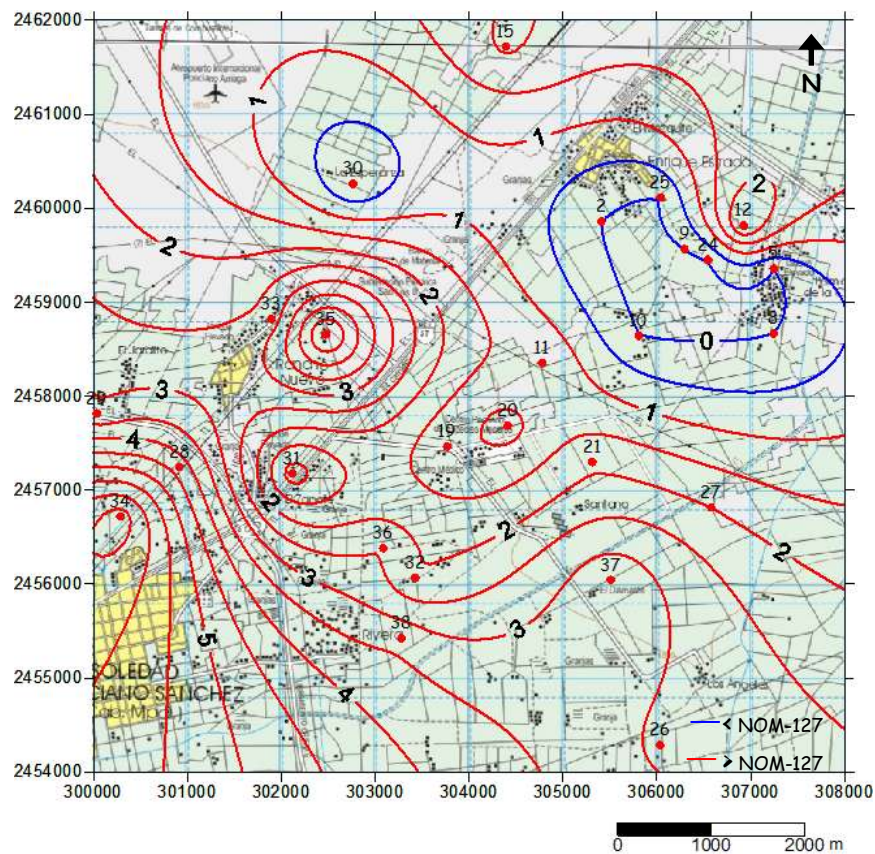


Figura 5.14 Curvas de isovalores de concentración de SAAM (mg/L) en muestras de agua subterránea

Como se observa en la figura anterior, la distribución de curvas de isovalores de concentración de SAAM presenta en general un patrón de comportamiento similar al de la mayoría de los iones analizados, teniéndose que las concentraciones aumentan del noreste al suroeste. Este comportamiento podría explicarse por un lado, como

resultado de los efectos del riego con agua residual en las zonas de cultivo (zona NE y porción central del valle), pero también como consecuencia de la influencia de actividades antropogénicas que se desarrollan en la zona periurbana del municipio de Soledad de Graciano Sánchez (porción oeste-suroeste del área de estudio). Dichas actividades contemplan: almacenamiento y disposición de residuos líquidos y sólidos de granjas, sistemas sépticos inapropiados para la disposición de aguas residuales de origen doméstico, así como canales de distribución de agua residual sin revestimiento que atraviesan por dicha zona.

6. CONCLUSIONES

En la zona conurbada de San Luis Potosí - Soledad de Graciano Sánchez, uno de los principales problemas que enfrenta el acuífero somero, es la degradación del agua subterránea en términos de calidad, debido a que en esta región se ha desarrollado la costumbre histórica de utilizar para irrigación de la zona agrícola, las aguas residuales sin tratamiento generadas por la zona urbana.

Se realizó el estudio de cómo el riego con agua residual ha influido en la composición química del agua subterránea, así como del papel que tiene el suelo en el transporte de contaminantes, encontrándose lo siguiente:

Agua residual

La composición del agua residual depende en gran parte de la fuente de donde proviene, es decir que su composición difiere dependiendo si ésta tiene un origen doméstico o industrial. De las cinco muestras de agua residual analizadas, cuatro de ellas (muestras AR2, AR3, AR4 Y AR5) fueron tomadas de canales que conducen agua residual de origen exclusivamente municipal, tal y como lo evidencian los bajos contenidos de metales. La muestra AR1 en cambio, fue tomada de un canal que conduce agua residual de origen industrial.

Con respecto a su composición química, el Na^+ y el HCO_3^- son los iones que presentan las concentraciones más altas (7.8 y 6.0 meq/L), siendo estos los valores máximos obtenidos en la muestra tomada del canal de origen industrial (AR1). Por lo anterior, se clasificó como un agua residual de composición bicarbonatada - sódica principalmente. Por otro lado, de acuerdo con su carga iónica, puede considerarse como un agua de concentración **media a fuerte**, con respecto a parámetros tales como Cl^- y SO_4^{2-} .

En lo que se refiere al contenido de los cinco metales analizados, los valores máximos de concentración obtenidos se consideran bajos, Cd (0.17 µg/L), Cr (1.5 µg/L), Cu (2.21 µg/L), Fe (201.22 µg/L) y Pb (0.9 µg/L), ya que éstos se encuentran por debajo de los límites permisibles establecidos en la NOM-001-ECOL-1996. Por lo anterior, puede decirse que en ningún caso la concentración de dichos metales en el agua residual, representa un riesgo ambiental.

Suelo

El tipo de suelo dentro del área de estudio es un Xerosol háplico, poco evolucionado. De acuerdo con los dos sitios de muestreo descritos y analizados, se encontraron diferencias con respecto a sus propiedades físico-químicas.

En el perfil MS-S11, localizado en la porción suroeste del área de estudio, el pH del suelo tiene valores entre 6.7 y 8.2, su textura es franco arcillosa, lo que contribuye a que éste tenga una conductividad hidráulica baja y malas condiciones de aireación. El contenido promedio de materia orgánica es del 0.85% y su capacidad de intercambio catiónico tiene un valor promedio de 17.36 cmol/kg. De acuerdo con los criterios de evaluación establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000, en esta zona del área de estudio el pH del suelo es neutro a moderadamente alcalino, el contenido de materia orgánica es bajo y la capacidad de intercambio catiónico es media.

Por otro lado, en el perfil MS-S12, localizado al noreste del área de estudio, el pH del suelo tiene valores entre 6.4 y 7.2, su textura es franco arenosa, conductividad hidráulica media y mejores condiciones de aireación que las del perfil de la zona suroeste. El contenido promedio de materia orgánica es del 0.34% y su capacidad de intercambio catiónico tiene un valor promedio de 5.8 cmol/kg. Con base en los criterios de evaluación de la NOM-021-RECNAT-2000, en la zona noreste el suelo

tiene un pH neutro, el contenido de materia orgánica es muy bajo y la capacidad de intercambio catiónico es baja.

En lo que se refiere a la composición química de los extractos del suelo, ésta difiere en cuanto a la concentración entre un perfil y otro. Para el perfil localizado en la zona suroeste (MS-S11), cationes como el Na^+ y K^+ alcanzan concentraciones de hasta 90 y 180 mg/L respectivamente, y para aniones como NO_3^- y SO_4^{2-} ambos tienen concentraciones de hasta 150 mg/L. Por otro lado, en el perfil de la zona noreste (MS-S12), los valores de concentración son menores. El Na^+ tiene un valor máximo de 46 mg/L y el K^+ de 16 mg/L, mientras que para el NO_3^- es de 16 mg/L y de 95 mg/L para el SO_4^{2-} .

Lo anterior podría explicarse debido a que en la porción suroeste del área de estudio, a pesar de que la actividad agrícola disminuye, se desarrollan actividades antropogénicas que influyen en la calidad del agua que se infiltra en el suelo, mientras que en la porción noreste, al ser una zona agrícola, los cultivos absorben una parte de los nutrientes y elementos contenidos en la solución del suelo.

A partir de los resultados de la determinación mineralógica por DRX, se tiene que el suelo está constituido principalmente por minerales silicatados (cuarzo, feldespato-K y plagioclasas de composición intermedia a ácida), lo que corrobora su origen volcánico, pero principalmente establece que, al ser suelos formados en un clima predominantemente árido, éstos tienen procesos pedogenéticos incipientes que no favorecen la transformación del material parental, dando como resultado suelos poco evolucionados.

Por otro lado, se identificaron pequeñas cantidades de arcilla del grupo del caolín (halloysita), cuya carga en superficie depende principalmente de su PZC y del pH del medio. Así que dadas las características del suelo dentro del área de estudio, en

donde el pH obtenido es neutro a moderadamente alcalino, la halloysita adquiriría una carga negativa, dando la posibilidad a que dicho suelo pueda retener cationes, como el caso de los metales analizados. Además, considerando dicho pH, otro proceso que puede presentarse es la precipitación, pues se sabe que en medios básicos como el caso del presente estudio, los metales pesados tienden a precipitar, limitando así la movilidad de los mismos y su posible migración al acuífero.

De acuerdo con lo anteriormente descrito, se evaluó la capacidad filtro y amortiguadora del suelo para sustancias contaminantes aportadas por el agua residual aplicada para riego, las cuales pueden encontrarse suspendidas o disueltas en la solución del suelo, y que podrían ser translocadas al subsuelo, y en consecuencia al acuífero. La filtración puede ser puramente mecánica en el sistema poroso del suelo, pero también puede ser físico-química, si las sustancias son adsorbidas sobre las superficies activas de las partículas más finas del suelo (arcilla y materia orgánica), o química si se forman precipitados insolubles en agua.

Así, la valoración de la capacidad filtro-amortiguadora del suelo se hizo, con base en los resultados de parámetros como el pH del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica y arcilla, y el cálculo de la filtración de partículas suspendidas gruesas, encontrándose que en la zona suroeste del área de estudio (perfil MS-S11) dicha capacidad es muy baja, mientras que en la zona noreste (perfil MS-S12) la capacidad de amortiguamiento es media. Sin embargo, en ambos casos, se debe considerar que el pH del suelo es neutro a ligeramente alcalino, por lo que pudiera presentarse el proceso de precipitación, limitando así la movilidad de iones como en el caso de los metales analizados.

Los resultados muestran que los procesos encontrados en el suelo a una profundidad de 1.5 m, podrían desarrollarse a lo largo de toda la zona no saturada, presentándose así un proceso de retención de los iones contenidos en el agua que se infiltra a través

de ella. Por lo anterior, se debe tomar en cuenta que en la zona noreste del área de estudio, el espesor de la ZNS es de 20 a 25 m, lo cual contribuiría a que el agua que se infiltra tuviera mayor tiempo de interacción con el medio, propiciando una mayor retención de sustancias potencialmente contaminantes, mientras que en la porción suroeste dicho espesor disminuye teniendo entre 12 y 16 m, que es justamente la zona en donde se presentan las concentraciones más altas.

Con base en lo anterior, se concluye que dentro del área de estudio el sistema suelo tiene características y propiedades físico-químicas para retener cationes como en el caso del Cd, Cr, Cu, Fe y Pb, sobre todo en la porción noreste.

En cuanto a la función filtro-amortiguadora para la retención de aniones, por el carácter neutro a ligeramente alcalino del suelo, es poco probable que se presenten procesos que propicien su retención, pues se sabe que dichos procesos se llevan a cabo a pH más bajos. No encontrándose otros parámetros afines en la caracterización realizada, su capacidad filtro-amortiguadora sería evaluada en función del espesor de la ZNS.

Agua subterránea

El modelo hidrogeológico conceptual del acuífero somero propuesto para el área de estudio, establece una dirección de flujo subterráneo con orientación SW-NE.

Con respecto a la química del agua subterránea, esta tiene una composición principalmente bicarbonatada - cálcica/sódica, con valores de concentración de los iones dominantes HCO_3^- (11.4 meq/L), Ca^{2+} (25.2 meq/L) y Na^+ (15.2 meq/L) como valores máximos. Es importante mencionar, que dentro del área de estudio se distinguen dos zonas en cuanto a la distribución de las norias muestreadas, la primera de ellas conformada por las muestras de agua subterránea tomadas en las norias que

se localizan dentro de la zona agrícola, y la segunda conformada por las norias que se ubican en los alrededores de la zona periurbana. En las norias que se encuentran dentro de la zona agrícola, los valores de concentración de los diferentes iones analizados son bajos, si se comparan con los valores de concentración de las norias ubicadas en la zona periurbana, en las cuales el contenido de sales aumenta de manera considerable.

La calidad del agua subterránea del acuífero somero, se ha visto disminuida debido al uso de agua residual para el riego de las zonas de cultivo, tal y como lo demuestra la presencia de coliformes fecales y totales en las muestras de agua subterránea, así como también por los valores de concentración de NO_3^- medidos, los cuales alcanzan valores de hasta 4.9 meq/L (300 mg/L), cuando el límite máximo permisible es de 50 mg/L según lo que establece la NOM-127-SSA1-1994.

La presencia del NO_3^- en el agua subterránea a tan altas concentraciones, se asocia a la influencia del agua residual aplicada para el riego de la zona agrícola. El nitrógeno presente en el agua residual generalmente está en forma del ión NH_4^+ . Una vez que el agua entra en el suelo, inicia el proceso de nitrificación en el cual el NH_4^+ es transformado a NO_2^- y este a su vez en NO_3^- por la actividad de bacterias aerobias de tipo *nitrobacter*. Este proceso de nitrificación se realiza mejor en un medio neutro o ligeramente alcalino y en un suelo aireado, condiciones que de acuerdo con los análisis físico-químicos de las muestras de suelo y la geología local de la zona, son similares a las que se presentan en nuestro caso de estudio.

Otro parámetro que pone de manifiesto la influencia del riego con agua residual, son los valores de concentración de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) presentes en el agua, los cuales en el 70% de los casos superan el límite de 0.5 mg/L de la NOM-127-SSA1-1994.

Con respecto al contenido de los cinco metales analizados, los valores máximos de concentración del Cd (0.2 µg/L), Cr (1.01 µg/L), Cu (4.3 µg/L) y Pb (1.3 µg/L), se consideran bajos, ya que se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, por lo que no representan un riesgo para el uso y consumo humano.

Caso contrario ocurre con el Fe, el cual presenta valores de concentración de hasta 1,332 µg/L, siendo este el único metal en el que el 65% de las muestras analizadas los valores de concentración superan el límite permisible de 300 µg/L que marca la NOM-127-SSA1-1994, representando así un riesgo a la salud humana.

En lo que se refiere al comportamiento de los iones dentro del área de estudio, el aumento de las concentraciones de la generalidad de los parámetros analizados es en dirección NE-SW, tal y como se observó en las gráficas de curvas con isovalores de concentración presentadas en el capítulo de interpretación de resultados.

Lo anterior podría explicarse por un lado, debido al efecto amortiguador del suelo, que en la porción noreste del área de estudio es mayor que en la zona suroeste. Esto como resultado de sus características físico-químicas, como por ejemplo un pH neutro en el cual se promueve la precipitación de metales pesados, pero sobre todo por el espesor de la ZNS, el cual es mayor al noreste, permitiendo mayor tiempo de interacción del agua de riego con el medio a través del cual se infiltra, que al suroeste en donde dicha ZNS tiene menor espesor.

Por otro lado, en la porción suroeste del área de estudio, los valores de las concentraciones de los diferentes iones se ven influenciadas no sólo por el uso de agua residual, sino también como consecuencia de la influencia de actividades antropogénicas que se desarrollan en la zona periurbana del poblado de Soledad de Graciano Sánchez, como lo son: el almacenamiento y disposición de residuos líquidos y

sólidos de granjas avícolas, porcícolas y de ganado vacuno ubicadas en dicha porción del área de estudio, así como también por la influencia de sistemas sépticos inapropiados para la disposición de aguas residuales de origen doméstico.

De acuerdo con lo anterior, y con base en los resultados obtenidos en el presente estudio, es posible establecer que sí existe una influencia del riego con agua residual, en la composición y calidad del agua subterránea del acuífero somero, si bien no en todos los iones, sí en el caso del Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cd , Cr , Cu , Fe y Pb .

Dicha influencia se ve reflejada principalmente, en el contenido de coliformes fecales y totales, así como por las altas concentraciones de NO_3^- y SAAM encontradas en el agua, mismas que superan por mucho los límites establecidos en la norma oficial mexicana de calidad del agua para uso y consumo humano, razón por la cual los resultados encontrados en este trabajo adquieren gran importancia, sobre todo si se consideran las implicaciones y afectaciones a la salud producidas por dichos componentes.

Tomando en consideración lo obtenido a partir de la realización del presente trabajo, en donde se aprecia una sensible afectación de la calidad del agua subterránea del acuífero somero por efecto del riego con agua residual y el desarrollo de actividades antropogénicas, de no cambiar dichas prácticas, este acuífero no podrá ser considerado a futuro como una fuente alterna de abastecimiento para la ciudad de San Luis Potosí y su zona conurbada.

REFERENCIAS

- Agrawal G. D., 1999. Diffuse agricultural water pollution in India: *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 3, pp. 33-47.
- Aguirre-Hernández M., 1992. *Geología del subsuelo de las cuencas geohidrológicas del Valle de San Luis Potosí y de Villa de Reyes, en el estado de San Luis Potosí*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología. Folleto Técnico No. 116.
- American Society for Testing and Materials, 1994. *Annual book of Standards*.
- APHA AWWA WPCF, 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21th ed. Centennial ed., Washington, DC.
- Appelo C. A. J., Postma D., 1993. *Geochemistry, groundwater and pollution*. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Brady N. C., Weil R. R., 2002. *The nature and properties of soils*. 13th Ed. Prentice Hall, New Jersey, 960 p.
- British Geological Survey (BGS) and Comisión Nacional del Agua (CNA), 1995. *Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, México*. Phase 1 Report - February 1995. NERC, Keyworth, Nottinghamshire.
- Cardona Benavides A., Martínez Hernández J., Alcalde Aldrete R., Castro Laragoitia J., 2006. La edad del agua subterránea que abastece la región de San Luis Potosí. *Revista Universitarios Potosinos*. Año 2 (7), 20-25.
- Cardona-Benavides A., 2007. *Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local, resultado del marco geológico en la Mesa Central: Reacciones, procesos y contaminación*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Doctorado, 238 p.
- Carrillo-Bravo J., 1971. La Plataforma Valles-San Luis Potosí. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, Vol. 23, 102 p.
- Carrillo-Rivera J. J., Armienta M. A., 1989. Diferenciación de la contaminación inorgánica en las aguas subterráneas del valle de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México. *Geofísica Internacional*, Vol. 28 (4), pp. 763-783.

- Carrillo-Rivera J. J., 1992. The hydrogeology of the San Luis Potosí Area, México. Ph.D. Thesis. University of London, U.K., 203 p.
- Carrillo-Rivera, J. J., 2000. Application of the groundwater balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two drainage basins, Mexico. *Hydrogeology Journal*, Vol. 8, 503-520.
- Carrillo Rivera, J. J., Cardona A., Ángeles Serrano G., Hert T., 2002. Is the San Luis Potosi basin a case of overexploitation?. *Geological Society of America, Annual Meeting, Denver, Col. Paper 70-12.*
- CETENAL, 1973. Carta edafológica San Luis Potosí F14-A84 S.L.P.
- Chapela-Lara M., 2011. Variación temporal en el contenido de metales pesados en suelos regados con aguas residuales. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra. Tesis de Maestría, 102 p.
- Cirelli C., 2004. Agua desechada, agua aprovechada. Cultivando en las márgenes de la ciudad. Colección Investigaciones. El Colegio de San Luis, SLP, México.
- Comisión Estatal del Agua de San Luis Potosí (CEA), 2001. Plan Integral de Saneamiento: Reuso de las aguas residuales tratadas, de la ciudad de San Luis Potosí y su zona conurbada de Soledad de Graciano Sánchez.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 1996. Actualización geohidrológica del Valle de San Luis Potosí, México. Reporte técnico, 6p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero San Luis Potosí, estado de San Luis Potosí.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2009. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2411) San Luis Potosí, estado de San Luis Potosí.
- Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2005. Estudio técnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 "San Luis Potosí" en el estado de San Luis Potosí. Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero de Valle de San Luis Potosí, 74 p.
- Cortés-Ortiz M. C., 2009. Presencia y correlación de fases mineralógicas en agua subterránea y en materiales geológicos en el valle de San Luis Potosí. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Tesis de Licenciatura, 108 p.

- Custodio E. y Llamas M. R., 1983. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega S.A., Barcelona, España. Tomos I y II, 1157 p.
- Davis S. N., 1964. Silica in streams and groundwater. *American Journal of Science*, Vol. 262, p. 870-891.
- Davies S. N., R. J. M. DeWiest, 1966. *Hydrogeology*. John Wiley and Sons, Inc. London, G. B., 463 p.
- Dzwairo B., Hoko Z., Love D., Guzha E., 2006. Assessment of the impact of pit latrines on groundwater quality in rural areas: A case study from Marondera district, Zimbabwe: *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 779-788.
- Equihua L. O., Carrot L., Kuhn A., 2006. BOT Contracts in Mexico and San Luis Potosi case study: Wastewater reuse for agricultural and industrial applications. Degremont S.A. de C.V.
- FAO, 2000. Base Referencial Mundial del Recurso del Suelo. Principales suelos del mundo, 402 p.
- Flores S., Alcalá A., Hernández M., 1990. Características geohidrológicas en el área de la central termoeléctrica de San Luis Potosí. CFE, Subdirección de Construcción, Gerencia de Ingeniería Civil, 109 p.
- Foppen J. W. A., 2002. Impact of high-strenght wastewater infiltration on groundwater quality and drinking water supply: the case of Sana'a, Yemen: *Journal of Hydrology*, 263, 198-216.
- Fortanelli-Martínez. J., 1999. El suelo y los problemas de su uso en el estado de San Luis Potosí. *Acta Científica Potosina* 14 (1):66-84.
- Freeze, R. A., Cherry J. A., 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, N. J., U.S.A., 604 p.
- Golden Surfer Inc., 2002. Surfer V.8.0. Surfer Mapping System.
- Haines T. S., Lloyd J. W., 1985. Controls on silica in groundwater environments in the United Kingdom. *Journal of Hydrology*, 81, p. 277-295.
- Hem John D., 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3th Ed. U. S. Geologycal Survey Water-Supply paper 2254, 263 p.
- IMTA, 2000. ERIC II. Extractor Rápido de Información Climatológica.

- INEGI, 1999. Carta topográfica San Luis Potosí F14-A84.
- INEGI, 2000. Anuario Estadístico del Estado de San Luis Potosí. XII Censo General de Población y Vivienda.
- INEGI, 2002. Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí. Primera Edición. México, 124 p.
- Jang-Cheon C., Hong-Baek C., Sang-Jong K., 2000. Heavy contamination of a subsurface aquifer and a stream by livestock wastewater in a stock farming area, Wonju, Korea: *Environmental Pollution*, 109, 137-146.
- Kass A., Gavrieli I., Yechieli Y., Vengosh A., Starinsky A., 2005. The impact of freshwater and wastewater irrigation on the chemistry of shallow groundwater: a case study from the Israel Coastal Aquifer: *Journal of Hydrology*, 300, 314-331.
- Labarthe-Hernández G., Tristán-González M., Aranda-Gómez J., 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí, SLP, México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología. Folleto Técnico 85, 208 p.
- LaMotte, 2001. Smart 2 Colorimeter Reagent Systems. Test Instructions. v.2.3 1/7.
- Martínez-Banda L. F., 2005. Identificación de la contaminación difusa en el acuífero somero de la ciudad de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. Tesis de Licenciatura, 106 p.
- Metcalf and Eddy, 1996. Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición, Vol. 1. McGraw Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Meybeck M., 1982. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, Vol. 282, 401-450.
- Nieto-Samaniego A., Macías-Romo M., Alanís-Álvarez S., 1996. Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central de México. *Revista de Ciencias Geológicas*, 13 (1), 117-122.
- NOM-001-ECOL-1996, 1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México, Diario Oficial/23-04-2003.

- NOM-021-RECNAT-2000, 2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México, Diario Oficial/31-12-2002, 85 p.
- NOM-127-SSA1-1994, 1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México, Diario Oficial/30-11-1995.
- NOM-181-SSA1-1998, 1998. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que deben cumplir las sustancias germicidas para tratamiento de agua, de tipo doméstico.
- Noyola Medrano M. C., Ramos Leal J. A., Domínguez Mariani E., Pineda Martínez L. F., López Loera H., Carbajal N., 2009. Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 26, No. 2, 395-410.
- Ramos Leal J. A., Martínez Ruiz V. J., Rangel Méndez J. R., Alfaro de la Torre M. C., 2007. Hydrogeological and mixing process of waters in aquifers in arid regions: a case study in San Luis Potosí Valley, Mexico. *Environmental Geology* 53, 325-337.
- Servicio Geológico Mexicano, 1998. Carta Geológico-Minera San Luis Potosí F14-4. S.L.P., Zac., Ags., Jal. Y Tamps. Secretaría de Economía.
- Siebe C., Jahn R., Stahr K., 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Segunda edición. Instituto de Geología, UNAM.
- SPSS Inc., 2001. SigmaPlot V.7.0.
- Stretta E. J., Del Arenal R., 1961. Carta geohidrológica provisional de la Cuenca de San Luis Potosí, S.L.P., México. Instituto de Ciencia Aplicada, Sección de Hidrología y Misión de Geohidrología de la UNESCO, Instituto de Geología, UNAM.
- Tristán-González M., 1986. Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes, en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México. Instituto de Geología, UASLP. Folleto técnico No. 107.
- US. EPA., 1999. Contaminant persistence and mobility factors. Appendix E.
- Vargas-Olvera. M. C., 1999. Especiación de metales pesados en los suelos regados con aguas residuales industriales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía, 188 p.

Waterloo Hydrogeologic, 1997. *AquaChem V.3.7. Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting.*