



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

**CARACTERIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS
SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA
PORCIÓN CENTRO-SUR DE LA MESA CENTRAL, MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
LILIANA A PEÑUELA ARÉVALO

TUTOR:
Dr. J Joel Carrillo Rivera
Instituto de Geografía, UNAM

MÉXICO, D. F. ABRIL 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y Posgrado en Geografía, por la educación recibida y las diversas experiencias que condujeron a mi crecimiento profesional y personal.

Al CONACYT, por la beca otorgada durante esta etapa de estudios doctorales, sin la cual no habría sido posible el desarrollo y culminación de la presente investigación.

A mi asesor, Dr. J. Joel Carrillo Rivera, quien me ha guiado continuamente por el trayecto del agua subterránea.

A los doctores Rafael Huizar, María Perevochtchikova, Lorenzo Vásquez, Gustavo Garza y Juan Reynerio Fagundo, por sus valiosas observaciones al presente trabajo con base en sus respectivas áreas de conocimiento, mismas que permitieron mayor interdisciplinariedad y mejora de la investigación.

A mis amigos que colaboraron de algún modo para el desarrollo del presente estudio: Ana Godoy, María de la Paz Orta, Orfely María Rueda y, en especial, a René Álvarez. Así como a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron con la elaboración de este estudio.

A mi madre y hermanas, quienes siempre me brindan apoyo incondicional.

A mi padre, quien me acompañó y colaboró de manera muy activa en trabajo de campo.

Y finalmente a Juanjo, por su amor, paciencia, apoyo, ejemplo de esfuerzo y trabajo.

CARACTERIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA PORCIÓN CENTRO-SUR DE LA MESA CENTRAL, MÉXICO

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	iii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	4
1.2. Justificación de la investigación.....	9
1.3. Hipótesis de trabajo.....	11
1.4. Contribución científica de la presente investigación.....	11
1.5. Objetivos	11
1.5.1. Objetivo general.....	11
1.5.2. Objetivos específicos.....	12
1.6. Organización del trabajo de investigación	12
1.7. Referente teórico y metodológico.....	12
1.7.1. Balance hídrico.....	12
1.7.2. Métodos geológicos	14
1.7.3. Hidrogeoquímica	14
1.7.4. Isótopos estables	15
1.7.5. Métodos geofísicos de superficie.....	16
1.7.6. Sistemas de Información Geográfica (SIG), superposición de polígonos.....	16
1.7.7. Teoría de los sistemas de flujo.....	17
2. MARCO DE REFERENCIA	21
2.1. Lineamientos geográficos	21
2.1.1. Área de estudio.....	21
2.1.2. Clima.....	22
2.1.3. Geomorfología.....	24
2.1.4. Hidrología superficial	29
2.1.5. Suelo y Vegetación	31
2.2. Referente geológico.....	37
2.2.1. Estratigrafía general	37
2.2.2. Estructura Geológica.....	43
2.3. Referente hidrogeológico.....	47
3. MATERIALES Y MÉTODOS	51
3.1. Trabajo de gabinete inicial.....	51
3.1.1. Recopilación de información física del área de estudio	51
3.1.2. Procesamiento de información digital	52
3.1.3. Análisis hidroquímico de información existente de química del agua.....	52
3.2. Trabajo de campo	52
3.2.1. Toma de muestras de agua lluvia para análisis fisicoquímico e isotópico.....	52
3.2.2. Toma de muestras de agua de pozo (análisis fisicoquímico e isotópico).....	54

3.3.	Trabajo de gabinete posterior y fase de análisis	59
3.3.1.	Determinación de la alcalinidad.....	59
3.3.2.	Manejo de datos químicos	60
3.3.3.	Análisis hidrogeoquímico	61
3.3.4.	Definición de los sistemas de flujo	61
4.	RESULTADOS.....	63
4.1.	Análisis de indicadores superficiales	63
4.1.1.	Tipo de suelo	63
4.1.2.	Vegetación.....	65
4.1.3.	Elevación topográfica	68
4.1.4.	Litología.....	70
4.1.5.	Hidrología histórica	72
4.1.6.	Definición de zonas de recarga y descarga a través de indicadores superficiales ..	82
4.2.	Caracterización del agua subterránea	83
4.2.1.	Evaluación de la calidad química del agua para el área de estudio	83
4.2.2.	Facies hidroquímicas y grupos de agua.....	85
4.2.3.	Vulnerabilidad del agua subterránea a la variación en la precipitación	99
4.2.4.	Cálculo de la temperatura mínima de equilibrio del agua subterránea con geotermómetros.....	102
4.2.5.	Análisis comparativo regional.....	106
4.3.	Análisis isotópico	108
4.3.1.	Agua de lluvia	108
4.3.2.	Agua subterránea	110
4.4.	Definición de zonas de recarga	113
4.4.1.	Cálculo de la distancia de recorrido del agua subterránea	114
4.4.2.	Análisis de indicadores superficiales a escala nacional.....	121
4.4.3.	Integración de la información cartográfica y superposición de polígonos ..	121
4.5.	Definición de zonas de descarga de agua subterránea	123
4.6.	Los sistemas de flujo y su trayectoria	124
	CONCLUSIONES.....	130
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138

ANEXOS

1. Ejemplo de formato para el estudio de isótopos
2. Hojas de campo
3. Cálculo de la alcalinidad
4. Datos fisicoquímicos de las muestras de agua subterránea
5. Calidad del agua
6. Facies hidroquímicas
7. Diagramas Stiff por grupo de agua
8. Índice de madurez
9. Cálculo de la distancia de recorrido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Rocas Terciarias en la República Mexicana.....	4
Figura 1.2. Sistemas de flujo desarrollados en una cuenca hidrogeológica regional.	18
Figura 2.1. Ubicación de la Provincia Fisiográfica Mesa Central.	21
Figura 2.2. Localización del área de estudio.....	22
Figura 2.3. Tipo de clima en el área de estudio.....	23
Figura 2.4. Provincias fisiográficas en el área de estudio.....	25
Figura 2.5. a) Relieve sombreado del área de estudio, b) Modelo de unidades de relieve en zonas áridas (Zuidam, 1985), c) Ejemplo de relieve predominante en el área de estudio, región de El Tule.....	28
Figura 2.6. Regiones y cuencas hidrológicas en el área de estudio.....	30
Figura 2.7. Tipo de suelo presente en el área de estudio	32
Figura 2.8. Uso de suelo y vegetación en el área de estudio	36
Figura 2.9. Cantidades porcentuales de uso del suelo y vegetación en el área de estudio	37
Figura 2.10. Unidades estratigráficas que afloran en el área de estudio	39
Figura 2.11. Columnas estratigráficas para diversas porciones del área de estudio.....	40
Figura 2.12. Estructuras mayores en el área de estudio.....	45
Figura 2.13. Sección esquemática mostrando la configuración hidrogeológica de la Cuenca de San Luis Potosí..	48
Figura 3.1. Localización de las estaciones de toma de muestras de agua de lluvia	53
Figura 3.2. Ubicación de sitios de toma de muestras	58
Figura 3.3. Ejemplo metodológico de la titulación de Gran	59
Figura 4.1. Zonas potenciales de recarga y descarga en el área a partir de tipo de suelo.	65
Figura 4.2. Zonas potenciales de recarga y descarga en el área a partir de la vegetación	69
Figura 4.3. Zonas potenciales de recarga y descarga en el área a partir de la elevación topográfica	70
Figura 4.4. Permeabilidad de las unidades litológicas asociadas con posibles zonas de recarga	72
Figura 4.5. Localización de diversas familias indígenas	73
Figura 4.6. Mapa del estado de Aguascalientes, 1857.....	75
Figura 4.7. Manantiales de agua termal de México, década de los setenta.....	76
Figura 4.8. Manantiales termales en México, CFE	77
Figura 4.9. Zonas potenciales de descarga con base en información histórica.....	79
Figura 4.10. Elevación de superficies piezométricas en el área de estudio	80
Figura 4.11. Distribución representativa de la elevación de superficie piezométrica para el acuífero profundo, Ciudad de San Luis Potosí. Enero 1987.....	82
Figura 4.12. Localización de zonas de recarga y descarga de agua subterránea en el área a partir del análisis de diversos indicadores superficiales	83
Figura 4.13. Cantidad de muestras que sobrepasan el límite permisible de calidad para agua potable para determinados elementos.	84
Figura 4.14. Relación de NO ₃ (como N) con Cl ⁻ en las muestras del área de estudio	85
Figura 4.15. Diagrama Piper mostrando las facies hidroquímicas para el agua subterránea del área.....	88
Figura 4.16. Distribución de las facies hidroquímicas (del agua) en el área de estudio	89
Figura 4.17. Agua presente en el área de estudio	90

Figura 4.18. Definición de grupos de agua a través del análisis de su temperatura, conductividad eléctrica, cloruro, sodio, litio, potasio, magnesio, y calcio.....	91
Figura 4.19. Relación de: a) sodio y cloruro, b) temperatura y estroncio para los diferentes grupos.	93
Figura 4.20. Localización de los diferentes grupos de agua definidos en la presente investigación y aquellos definidos previamente por Molina-Maldonado (1996) para el estado de Aguascalientes.....	95
Figura 4.21. a) Grupos definidos para las muestras del 2010 a través del análisis hidroquímico; y b) su ubicación espacial.....	96
Figura 4.22. Comparación química entre las muestras de agua de 1999 y 2010.	98
Figura 4.23. Zonificación de la vulnerabilidad del agua subterránea a la variación en la precipitación.....	103
Figura 4.24. Diagrama triangular Giggenbach teórico	104
Figura 4.25. Diagrama triangular Giggenbach para las muestras de agua de: a) 1999 y b) 2010	104
Figura 4.26. Comparación hidroquímica entre las muestras de agua analizadas en el presente estudio y algunas representativas de las regiones de: Cuenca de México, Aguascalientes, San Luis potosí, Lerma	107
Figura 4.27. Líneas meteóricas locales definidas para el estado de SLP.	109
Figura 4.28. Relación entre elevación topográfica y contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en la lluvia, estaciones SLP	110
Figura 4.29. Relación $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de: a) muestras del área de estudio donde se aprecia el proceso de evaporación que presenta la muestra 101 Salinas para los años 1999 y 2010; b) grupos de agua definidos para las muestras de 1999 junto con muestras representativas de las cuencas de México, Alta Lerma y otros de SLP.	112
Figura 4.30. Reconstrucción de la temperatura global para aprox. 10,000 años atrás.	112
Figura 4.31. Relación del $\delta^{18}\text{O}$ con respecto a la temperatura, sodio, litio y Ca+Mg.....	113
Figura 4.32. Distancia de recorrido del agua subterránea calculada para el pozo M-3 perteneciente a un flujo "regional"	119
Figura 4.33. Distancia de recorrido del agua subterránea calculada para el pozo M-14 perteneciente a un flujo intermedio	119
Figura 4.34. Relación de la edad del agua con: a) litio, b) sodio, c) temperatura y d) cloruro	120
Figura 4.35. Indicadores evaluados para la definición de zonas de recarga. a) altitud, b) vegetación.....	122
Figura 4.36. Posibles zonas de recarga de flujos "regionales" incorporando un análisis litológico, hidrogeoquímico y geomorfológico.....	122
Figura 4.37. Posibles zonas de recarga de flujos intermedios incorporando un análisis litológico, hidrogeoquímico y geomorfológico.....	123
Figura 4.38. Posibles zonas de descarga de flujos regional e intermedio(?)	124
Figura 4.39. Sección hidrogeológica esquemática regional	126
Figura 4.40. Ubicación de posibles zonas de recarga, descarga y trayectoria de flujo para flujos regionales.....	127
Figura 4.41. Ubicación de posibles zonas de recarga, descarga y trayectoria de flujo para flujos intermedios.....	128

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Tipos de clima en el área de estudio	23
Tabla 2.2. Comparación de unidades del modelo de relieve en zonas áridas y aquellas presentes en el área de estudio.....	29
Tabla 2.3. Regiones hidrológicas y cuencas hidrológicas en el área de estudio.....	29
Tabla 2.4. Principales grupos y subgrupos de suelo presentes en el área de estudio	33
Tabla 3.1. Requerimientos de volumen para el análisis fisicoquímico e isotópico de agua (de lluvia).....	54
Tabla 3.2. Resumen del trabajo de campo de los puntos de toma de muestras.....	57
Tabla 3.3. Control de calidad por parte del laboratorio, datos de muestras duplicadas.....	61
Tabla 4.1. Principales características del suelo en zonas de recarga y descarga	63
Tabla 4.2. Asociación tipo de suelo-zona de recarga/descarga.....	64
Tabla 4.3. Asociación tipo de vegetación-zona de recarga/descarga	68
Tabla 4.4. Permeabilidad (relativa) de las unidades litológicas del área de estudio	71
Tabla 4.5. Límite permisible de diversos elementos para agua potable.....	84
Tabla 4.6. Diferencias en la facie hidroquímica de acuerdo con la metodología empleada	87
Tabla 4.7. Porcentaje de presencia de las diversas facies hidroquímicas existentes en el área de estudio	88
Tabla 4.8. Principales características fisicoquímicas por grupo de agua en el área de estudio.....	90
Tabla 4.9. Comparación entre las muestras de agua de 1999 y 2010.....	97
Tabla 4.10. Vulnerabilidad de los sistemas de flujo por la variación en la precipitación ..	102
Tabla 4.11. Muestras de agua subterránea con índice de madurez mayor a dos.....	104
Tabla 4.12. Temperatura mínima de equilibrio para las muestras de agua tipo regional.	105
Tabla 4.13. Profundidades determinadas por otros autores para agua termal en el área de estudio.....	106
Tabla 4.14. Valores de isótopos ambientales.....	111
Tabla 4.15. Edades del agua subterránea para SLP	115
Tabla 4.16. Posibles distancias de recorrido obtenidas para flujos de tipo "regional"	116
Tabla 4.17. Posibles distancias de recorrido obtenidas para flujos de tipo intermedio	117
Tabla 4.18. Posibles distancias de recorrido obtenidas para pozos de SLP	118
Tabla 4.19. Distancias de recorrido con base en las velocidades reportadas por Kohn (2009).....	120
Tabla 5.1. Indicadores superficiales de zonas de recarga/descarga para el área de estudio	131
Tabla 5.2. Valores promedio para temperatura y profundidad mínima alcanzada por el agua	133

LISTA DE FOTOS

Foto 3.1. Estación Valles	53
Foto 3.2. Estación Sierra Álvarez-Microondas.....	53
Foto 3.3. Estación Venado	53
Foto 3.4. Pozo 30 Agua Clara, municipio San	58
Foto 3.5. Pozo cercano al 33 P-RDEL, municipio de Dolores Hidalgo.....	58
Foto 3.6. Pozo cercano al punto 47, Localidad de La Pachona	58
Foto 3.7. Pozo que parece corresponder con el punto 93 P-PRIMAI-II	58

RESUMEN

El continuo crecimiento poblacional junto con las condiciones climáticas existentes en la República Mexicana, en especial donde prevalece el clima árido y semiárido, conllevan a una gran dependencia con el agua subterránea; no obstante, es lamentable que aún se soslaye la importancia real que ésta juega en el funcionamiento de la naturaleza pues en muchos estudios hidrológicos y/o ambientales se limitan al análisis del agua superficial sin tener en cuenta la estrecha relación que ésta tiene con el agua subterránea. Por su parte, la mayoría de estudios hidrogeológicos o que incorporan aspectos relacionados con el agua subterránea aplican la técnica del "balance hídrico" debido a que es la única metodología que la entidad administradora del agua (CONAGUA) plantea para determinar la denominada "disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Sin embargo, se observa que la implementación de tal método debería realizarse en conjunto con otras metodologías que permitan definir la dinámica de funcionamiento del agua subterránea, incluyendo el análisis de los diversos procesos que se generan en el subsuelo, los cuales en muchas ocasiones son los responsables de determinada calidad del agua, así como de las características físicas y biológicas específicas observadas en la superficie.

El agua subterránea es uno de los elementos que mayor impacto negativo ha tenido desde la última mitad del siglo XIX debido principalmente al incremento en la extracción de agua por pozos que se produjo con una falta de conocimiento general del funcionamiento del sistema involucrado. Estos impactos no han sido analizados, ya que posiblemente corresponden con elementos casi imperceptibles en la superficie, lugar este último donde los impactos son comparativamente fácilmente detectables por el ser humano, especialmente a corto plazo.

En la presente tesis se busca demostrar la importancia de estudiar la dinámica del agua subterránea incorporando conjuntamente el carácter hidrológico y los elementos del paisaje para finalmente realizar una adecuada gestión del agua y la naturaleza en sí. El análisis del agua subterránea, al igual que los demás componentes del ambiente, debe realizarse desde un punto de vista sistémico e integrador, para que de esta manera las medidas y acciones que se planteen en programas ambientales estén acorde con el funcionamiento del ambiente, obteniendo así el mayor beneficio de la naturaleza y reduciendo impactos negativos.

Así, la metodología que se propone en esta tesis se basa en una aplicación de la teoría de los sistemas de flujo con la que finalmente se obtiene una aproximación del funcionamiento del flujo de agua subterránea, delimitando sus zonas de recarga y descarga. La definición de estas zonas se realiza con base en sus características distintivas, asociadas con procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en cada una de ellas provocando la presencia de evidencias naturales en superficie como respuesta a esa dinámica. Características más fáciles de detectar cuando se tienen flujos regionales debido a que éstos presentan mayor distancia de recorrido por el subsuelo, factor que les otorga propiedades como por ejemplo las fisicoquímicas (i.e., mayor salinidad y temperatura) con componentes acordes con la litología y profundidad por donde circulan.

La metodología que se aplica en esta investigación se hace confiable debido a que está constituida por diversas técnicas cuyos resultados pueden ser corroborados ya que deben ser concordantes entre sí. A grandes rasgos, las técnicas empleadas son: 1) el análisis de indicadores superficiales de parámetros físicos que considera el suelo, vegetación, elevación topográfica, referente litológico, entre otros; 2) hidrogeoquímica, que incluye la definición de grupos químicos de agua, el uso de isótopos estables y el cálculo de la profundidad mínima alcanzada por el agua mediante geotermómetros; y 3) análisis de parámetros hidráulicos -tales como conductividad hidráulica, porosidad, etc.- a pesar que este tipo de información no es fácil de obtener o encontrar en la literatura, como es el caso para la extensa área de estudio del presente trabajo; sin embargo, es importante señalar su relevancia y utilidad para el desarrollo de estudios hidrogeológicos.

La selección de la extensa área de estudio de la presente tesis se debe a la posible conexión hidráulica en la región entre cuencas superficiales a través de las rocas volcánicas del Terciario que se señala en diversos estudios. El área corresponde con la porción centro-sur de la provincia fisiográfica Mesa Central e incorpora partes de los estados de Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosí y Guanajuato.

En la presente tesis se determinaron las zonas de recarga y descarga de agua subterránea en el área a través del análisis de indicadores superficiales; sin embargo, se encontró que las zonas de recarga definidas no estaban asociadas con el agua que se extrae por medio de pozos en el área (pertenecientes a flujos intermedio y regional). Al realizar el análisis hidrogeoquímico y un cálculo general de las distancias de recorrido del agua de flujos regional e intermedio se determina que sus zonas de recarga se encuentran más allá del límite establecido del área de estudio. De este modo se obtuvo que, al parecer, el agua de flujos regional e intermedio de la porción oeste del área proviene de la Sierra Madre Occidental y aquella que se extrae al este del área proviene del Cinturón Volcánico Transmexicano, alcanzando mínimo 50-300 km los flujos regionales y 15-100 km los flujos intermedios. Esta situación refleja la importancia de aplicar diversas técnicas en un mismo estudio con el fin de aumentar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

ABSTRACT

The great population growth and climate conditions of the country where arid and semi-arid climatic conditions prevail have created groundwater dependence. Regrettably, groundwater has not been given the importance it represents in functioning of the environment. A lot of hydrological and environmental studies include only an analysis of surface water disremembering its close relation to groundwater. On the other hand, most of the hydrogeological studies or those that includes groundwater aspects apply the "hydrological balance" because it is the methodology used by the water administration agency (CONAGUA) to calculate the called: "annual average availability of national waters". However, the application of that technique should be performed in combination with other methodologies that allow to establish the groundwater dynamics including the analysis of several processes generated in the subsoil which many times are the responsible of a particular water quality and specific physical characteristics at surface.

Groundwater is a component that has suffered a great negative impact since the second half of the XIX century due mainly to the increase of water extraction through wells without knowledge of the functioning of the system. These impacts have not been studied possibly because groundwater is an element almost imperceptible at the surface where impacts are comparatively easier to be detected by humans, especially in the short term.

The present thesis looks to demonstrate the importance of studying the groundwater dynamics incorporating the hydrological character and the elements of the landscape to finally make an adequate management of groundwater and the surrounded nature. Analysis of groundwater and the other components of nature must be done from a system and integrative perspective. This way, decisions and actions proposed in environmental programs will agree with how nature functions obtaining the most benefit and reducing negative impacts.

Thus, proposed methodology is based on the groundwater flow systems theory which is used to obtain an approximation of groundwater functioning and the definition of the recharge and discharge areas. These areas are established according to their distinctive characteristics associated with physical, chemical and biological processes which allow the presence of natural evidence at the surface as response of such dynamics. Those characteristics are easier to recognize where regional flows are present because they move along the largest distance, so the water gets specific physicochemical properties (i.e. more salinity and temperature) according to lithology and circulation depth.

The applied methodology in the present investigation is considered reliable. It consists of techniques whose results may be validated independently, because they must be congruent among themselves. In general, the techniques applied are: 1) analysis of surface indicators (soil, vegetation, topographic elevation, lithology, etc.); 2) hydrogeochemical analysis that includes the definition of chemical water groups, the use of stable isotopes and the calculation of the minimum depth attained by water through geothermometers; and 3) analysis of hydraulic parameters like hydraulic conductivity, porosity, etc. This kind of information is not easy to be found in reports or to be acquired as in the case of the present study area but it is important to remark its significance and usefulness for any hydrogeological analysis.

The size of the study area was selected because the reported underground hydraulic connection in the region among surface basins through Tertiary volcanic rocks in different studies. The study area is located in the central-south portion of the physiographical province Mesa Central and includes segments of the Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosí and Guanajuato states.

Recharge and discharge areas for the study area were defined in this investigation through the analysis of surface indicators. However, these areas were found not to be related with the water extracted by wells in the area (of regional and intermediate flows). In this way, a hydrogeochemical analysis and a general calculation for the travel distance of regional and intermediate flow systems were made as to obtaining the location of their recharge areas to be beyond the borders of the study area. Results display the Sierra Madre Occidental as the recharge area of water of regional and intermediate flows for the west portion of the study area and the Cinturón Volcánico Transmexicano for the water extracted at the east, reaching at least 50-300 km for the defined regional flows and 15-100 km for those of intermediate hierarchy. This situation highlights the importance of applying several techniques in groundwater studies to increase the reliability of obtained results.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

EL ESTUDIO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN MEXICO.- En la actualidad se aprecia con mayor claridad el efecto negativo del crecimiento demográfico sobre el ambiente debido al aumento de sus necesidades básicas y las asociadas con el desarrollo económico, lo cual se ha manifestado en un uso excesivo de los elementos naturales. Un ejemplo claro en la ciudad de México es la invasión de la superficie forestal para la construcción de viviendas en las sierras Chichinautzin, Las Cruces, Nevada y Ajusco, generando la pérdida de ecosistemas, aumento de escorrentía, incremento de erosión, disminución del volumen potencial de agua para su recarga al subsuelo, cambio del microclima, reducción en la calidad del aire, entre otros. Esto sin contar lo que implica desde la perspectiva ambiental la instalación adicional de servicios básicos relacionados con agua y luz. Muchos de los impactos generados son visibles pero algunos, como el caso de efectos al agua subterránea, son imperceptibles esencialmente al corto y mediano plazo; por esto, es necesario tomar conciencia de lo importancia de cada componente del ambiente para mantener un buen funcionamiento e interacción entre ellos.

En la mayor parte de la superficie de la República Mexicana predominan las condiciones climáticas áridas y semiáridas, por lo que el agua subterránea es una fuente importante de abastecimiento. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011), el 37% del volumen total de agua concesionado para uso consuntivo en el territorio nacional es de origen subterráneo. Sin embargo, estas cifras no reflejan la dependencia al agua subterránea de los diversos territorios cuyas características climáticas y geomorfológicas no permiten la presencia de agua pluvial o de escorrentía superficial suficiente, o bien cuando el crecimiento demográfico y económico ha superado la capacidad natural que suministraba el agua superficial antaño asequible. En general, esto último ha llevado al aumento en la extracción por pozos, los cuales se perforan cada vez a mayor profundidad. Un ejemplo claro, está relacionado con la Ciudad de México, cuya expansión ha ocasionado una búsqueda continua de fuentes para satisfacer su creciente necesidad de agua; circunstancia que se ve reflejada en un elevado uso de agua donde la subterránea es prioritaria (~73%) para su abastecimiento (CONAGUA, 2011).

En el área de estudio, destacan la ciudad de San Luis Potosí, donde un 92% del total del agua utilizada para su desarrollo proviene de fuentes subterráneas y un 8% es de origen superficial (Contreras y Galindo, 2008); otro caso es el estado Aguascalientes donde 71.4% del agua que se consume proviene del subsuelo (Desde la red, 2011).

Debido a la gran dependencia que se tiene en el territorio nacional con el agua subterránea es muy importante fomentar el interés por conocer cómo funciona. Esto es de vital importancia debido a los impactos ambientales que actualmente se presentan en relación con el agua subterránea (contaminación y salinización de las fuentes, subsidencia, descenso del nivel freático, aumento de procesos de erosión, desaparición de lagos y manantiales, eliminación de vegetación, etc.), los cuales son, resultado de un manejo ineficiente del agua subterránea por extracción excesiva o de ignorar la relación entre ésta con otras componentes del ambiente lo que redundará en su uso inadecuado a través de campos de pozos, con una carencia en la identificación y protección hacia zonas de recarga, así como de descarga. Aquí es importante indicar que erróneamente las zonas de

recarga usualmente se presumen como conocidas y definidas desde la perspectiva hidrogeológica; y las de descarga son ignoradas.

En México, la mayoría de los estudios sobre agua subterránea se limitan al cálculo del balance hídrico, es decir, no incorporan el funcionamiento del agua de manera integral, como tampoco los procesos involucrados y su inter-relación con otras componentes del ambiente. El balance hídrico es una herramienta útil para obtener volúmenes involucrados siempre y cuando el área implicada sea de pequeñas dimensiones, se encuentre con instrumentación adecuada para medir directamente las variables involucradas, que exista una densidad apropiada de una red de monitoreo y continuidad de registro de datos que permita una base histórica confiable, y primordialmente, se aplique a un área con límites naturales acordes con los cálculos a realizar, esto es una cuenca hidrológica cerrada más no hidrográfica, es decir, que los límites físicos de superficie se presenten también en el subsuelo. Sin embargo, debido a las condiciones hidrogeológicas imperantes en México (*ie.* la Sierra Madre Occidental tiene formaciones geológicas con características acuíferas de extensión regional que incorpora varias cuencas superficiales y con espesor mayor a 2,000 m) se considera que aplicar dicha metodología en gran parte de la República Mexicana no es apropiado. Esto es avalado por los impactos ambientales relacionados con el uso de agua subterránea identificados al presente, evidentes por la actual inadecuada gestión del agua, ya que los efectos negativos sobre el ambiente se están viendo en la actualidad (Carrillo-Rivera *et al.*, 2008).

Una técnica que ha demostrado ser de gran utilidad para la definición del comportamiento del flujo subterráneo es la teoría de los sistemas de flujo (Tóth, 2000), la cual considera al agua subterránea como elemento dinámico (balance hídrico lo considera estático) e incorpora su análisis en tres dimensiones incluyendo sus características físicas y químicas, así como las condiciones hidricas, geológicas, edáficas y biológicas del medio por donde circula. Por tanto, para la aplicación de tal teoría es necesario utilizar otras herramientas de tipo hidrogeoquímico, hidráulico, geofísico, biológico, edafológico, entre otras, para así obtener una aproximación más cercana a las condiciones reales del sistema. Una ventaja de esto es que muchas de las limitaciones de la información se pueden subsanar con el uso de datos de bajo costo como tipo de vegetación, tipo y salinidad de suelo, el contenido de humedad, entre otros, la cual suministra valiosa información. De este modo, es una metodología que, a través de la unión de diversas herramientas, permite la verificación de resultados ya que éstos deben ser concordantes entre sí, al contrario del balance hídrico que son sólo números que no reflejan procesos, pero que usualmente se toman como datos absolutos, reales y "confiables".

La Teoría de los sistemas de flujo se puede aplicar tanto en áreas de gran extensión como pequeñas, no obstante, es de mayor utilidad y facilidad de aplicación en sistemas regionales haciendo comparación y estableciendo contrastes entre flujos, ya que la definición de un sistema de flujo de agua subterránea es en cierta medida subjetivo y depende en parte de la escala de trabajo (Alley *et al.*, 1999).

Aquí se establece la necesidad de formación de futuros hidrogeólogos con este tipo de enfoque para que participen en estudios del agua subterránea del país, así como en la gestión y legislación del agua. Es importante destacar que la situación actual del agua subterránea en el país se debe a la toma de decisiones basadas exclusivamente en los

números del balance hídrico que repercute directamente en la naturaleza de la respuesta. Hay que recordar que tales números se obtienen con pocas estaciones de observación y por ende, no son representativos de las condiciones existentes en el territorio nacional. Teniendo en cuenta la problemática actual, se requiere de estudios holísticos e interdisciplinarios para disminuir efectos negativos y en lo posible mejorar las condiciones ambientales en el país.

A pesar que existen estudios de hidroquímica e hidráulica subterránea desde la década de los sesenta, se aprecia que no se les ha dado continuidad; peor aún, cada vez se hacen menos por parte de las entidades administradoras del agua en el gobierno. Un ejemplo, es un estudio realizado a través de un convenio entre la Comisión Nacional del Agua y el Instituto de Geografía (UNAM) a finales de la década de los noventa para parte de la Mesa Central, cuya primera etapa consistió en recopilación de información y el cual se pretendía iba a continuar para finalmente obtenerse el funcionamiento del flujo subterráneo. Sin embargo, la segunda fase no se culminó pero generó gran cantidad de información de aprovechamientos de agua subterránea. Es así como se origina el presente trabajo, el cual pretende aprovechar dicha información recopilada y generada para tal estudio.

OBJETIVO y ÁREA DE ESTUDIO.- En consecuencia, el objetivo de la presente investigación consiste en buscar desde una perspectiva regional, definir el funcionamiento del flujo de agua subterránea, identificando posibles zonas de recarga a través de su descarga asociada implementando la teoría de los sistemas de flujo en la parte centro-sur de la provincia fisiográfica Mesa Central, incorporando parte de los estados de Aguascalientes, sureste de San Luis Potosí, norte de Guanajuato, noreste de Jalisco y sureste de Zacatecas.

La selección de esta extensa área se basa en aspectos geológicos ya que según el trabajo de la SARH (1978) en el Terciario se formaron sobre gran extensión de lo que hoy es el territorio nacional, gruesos espesores de sedimentos lacustres y aluviales que se encuentran intercalados con espesores importantes de derrames de rocas ígneas y depósitos piroclásticos producto de la intensa actividad volcánica registrada en ese período. Por tal razón el trabajo lo titularon "*Acuíferos regionales en cuencas Terciarias*", más no se dice ni se documenta la existencia de uno o varios acuíferos de gran tamaño interconectados en las rocas del Terciario. En la figura 1.1 se aprecia la superficie que cubren las rocas Terciarias en la Mesa Central, las cuales se considera que permiten la conexión hidráulica subterránea intracuenca, razón por la cual se debe tener cuidado cuando se aplica el cálculo del balance hídrico así como para definir una cuenca hidrológica, esto último hace referencia a que actualmente se le denomina cuenca hidrológica a una región que se encuentra dividida por un parteaguas; sin embargo, no se incorpora su configuración en el subsuelo la cual en muchas ocasiones, especialmente en México, permite el flujo del agua subterránea a través de diferentes cuencas hidrográficas (nombre correcto).

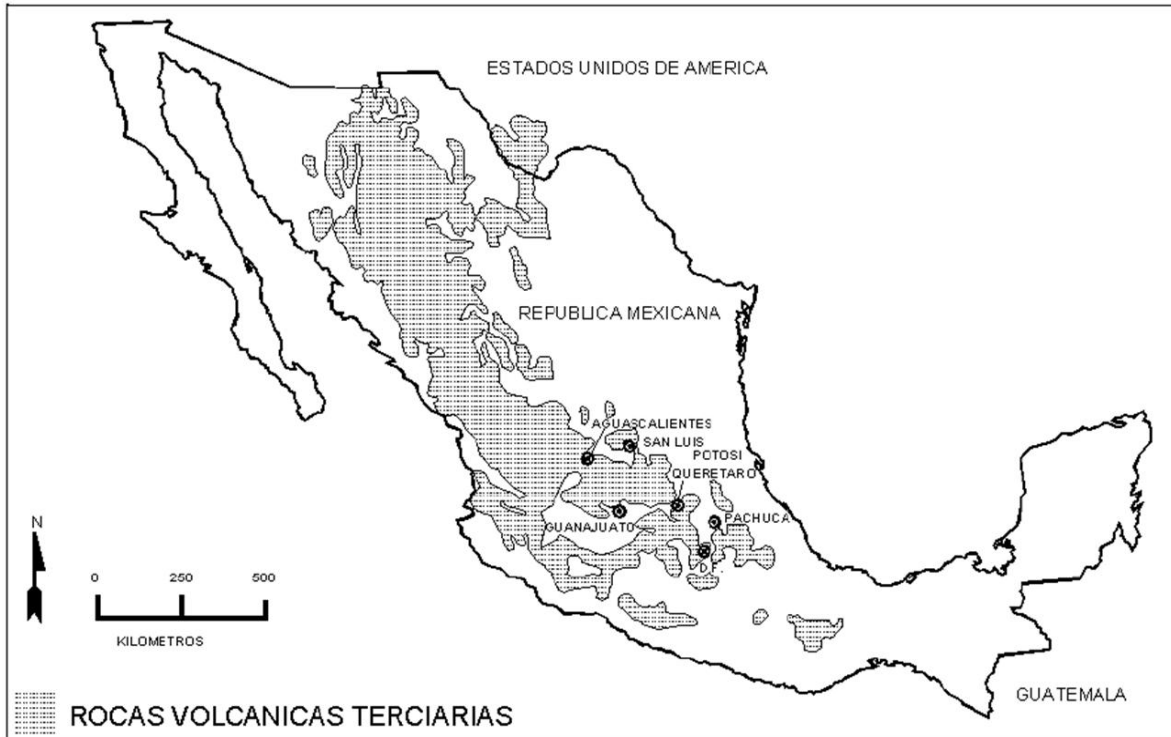


Figura 1.1. Rocas Terciarias en la República Mexicana (Fuente: CNA, 2000)

1.1. Antecedentes

1.1.1. Internacional

De acuerdo con D'Andrimont (1906, citado por Tóth, 2009), posiblemente la primera publicación conocida relacionada con la jerarquía de los sistemas de flujo es aquella de Fourmarier en su obra "hydrogéologie" de 1939. Sin embargo, en 1955 es publicada la denominada secuencia de Chevotareb, la cual establece que a pesar de las diversas reacciones y procesos que se generan en el subsuelo, se observa que el agua subterránea con menor tiempo de permanencia e interacción con la litología es generalmente bicarbonatada, luego predomina el sulfato, y el agua más salina es clorurada (Kehew, 2001). En 1962, Tóth publica que la descarga de agua subterránea no se concentra en el fondo del valle, como solía creerse en esa época desde la publicación realizada por Hubbert's en 1940 (Tóth, 2009). Es así que a partir de la postulación de los sistemas de flujo gravitacionales a escala regional, y aportaciones de Domenico (1972), Freeze y Cherry (1979), entre otros, se desencadenó mayor interés en la temática (Tóth, 2009).

Existen numerosos estudios relacionados con el análisis de los sistemas de flujo para diferentes partes del mundo, algunos son: de Hungría (Mádl-Szőnyi y Tóth, 2009; Simon *et al.*, 2011), Canadá (Tóth, 1962; Lemieux *et al.*, 2008), Australia (Coram *et al.*, 2000; Walker *et al.*, 2003), Estados Unidos (Winograd, 1962; Winter, 1999), Cuba (Fagundo *et al.*, 2008), entre muchos otros. Desafortunadamente, para el caso de México (especialmente las entidades gubernamentales administradoras del agua y elementos ambientales), no se cuenta aún con una visualización sistémica del ambiente y mucho

menos la existencia de una jerarquía de sistemas de flujo de agua subterránea, lo que ha permitido la continuidad en impactos al agua, al ambiente e incluso al ser humano. A continuación se señalan algunos de los estudios que contemplan, ya sea explícita o implícitamente, los sistemas de flujo para el área de estudio.

1.1.2. Área de estudio

La mayoría de trabajos existentes en la República Mexicana relativos al agua subterránea corresponden con estudios denominados *geohidrológicos*, los cuales se enfocan principalmente al cálculo del balance hídrico, censos de aprovechamientos y evaluación de acuíferos con limitación específica (CONAGUA, 2002; CONAGUA, 2005;). De esto último es relevante resaltar la delimitación de acuíferos que la Comisión Nacional del Agua estableció en la República Mexicana, la cual no se basa en límites físicos naturales sino en aspectos sociopolíticos, situación que no permite una evaluación correcta del funcionamiento del flujo subterráneo, y por esto, es necesario corregir dicha delimitación. Existen diversos estudios de carácter hidrológico-hidrogeológico para diferentes áreas de los estados de San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Zacatecas y Jalisco realizados desde la década de los cuarenta. Una buena reseña histórica de dichas investigaciones se tiene en el trabajo de Cardona (1990) y en el informe de CNA (1999). Algunos estudios que destacan son los siguientes:

- Streta y del Arenal (1961). Documentan la existencia de dos acuíferos, uno somero y otro profundo, sin embargo, no señala la frontera entre ellos. Realiza análisis de calidad química del agua, establece la región de Villa Arriaga como zona de recarga para Villa de Reyes y San Luis Potosí. Asimismo, considera que la descarga en la zona de Ojo Caliente proviene de Tepetate (al oeste de San Luis Potosí).
- Martínez y Cuellar (1979). Dan información respecto a la continuidad hidráulica de acuíferos sin importar el límite superficial de cuencas hidrológicas. Se indicó la continuidad del denominado acuífero del valle de San Luis Potosí hacia el valle de Bocas, Moctezuma y Venado, contrario a lo que había establecido Medina en 1977 quien indicó que el agua subterránea termal de SLP provenía del flujo principal de Villa de Reyes.
- Martínez (1997) define con precisión la configuración geológica del denominado valle de San Luis Potosí con base en 65 cortes litológicos de pozos perforados desde la década de los setenta hasta 1996. Sus resultados más relevantes son la identificación de dos depresiones tectónicas: una hacia la zona de Peñasco y la otra en San Luis.

Respecto a información hidroquímica histórica de México existen las cartas de aguas subterráneas de la Dirección General de Estudios del Territorio Nacional-DETENAL (1979, actualmente Instituto Nacional de Estadística y Geografía-INEGI); sin embargo, los parámetros considerados en las cartas son básicos y obtenidos de estudios de la CNA. Carecen de datos físicos relevantes como profundidad del nivel del agua en pozos, perfil estratigráfico detallado, caudal de extracción, etc. Para el agua en sí, no hay datos de temperatura, oxígeno disuelto, pH, Eh, conductividad eléctrica. No reportan valores de litio, fluoruro, arsénico, vanadio entre otros elementos traza que son de gran utilidad para evaluar el flujo del agua subterránea en determinado lugar. Adicionalmente, cuando ésta información existe no se tiene certeza de su calidad ya que se desconoce el tipo de procedimiento (protocolo) seguido en la toma de la muestra de agua, preservación,

transporte, almacenamiento y tipo de análisis de laboratorio; por último, tampoco se reporta tipo y forma de manejo de datos.

A continuación se resumen algunos de los estudios más relevantes relacionados con los aspectos hidrológicos e hidrogeológicos del área de estudio:

Carrillo (1985): Estudio realizado por la Comisión Federal de Electricidad con el fin de determinar un caudal de extracción por medio de pozos en la región de Villa de Reyes, SLP, sin que se afecte el funcionamiento hidrológico. A partir de un análisis geológico, perforación de tres pozos de exploración, registros geofísicos, piezometría, propiedades hidráulicas y fisicoquímicas del agua, se estableció que el caudal que puede producir esa área es de 700 l/s. A pesar que no se realizó un análisis estricto de los sistemas de flujo de agua subterránea se identificaron zonas de recarga y descarga, y la facies hidroquímica (principalmente sódico-bicarbonatado, con excepción de una muestra que es sódico-sulfatada). Por último, se generó una importante cantidad de información fisicoquímica (85 muestras), que a pesar de no contar con ubicación sirve de base para comparación en la presente investigación.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos – SARH (1988): Al igual que otros trabajos más antiguos se señala que existen dos acuíferos en la región de SLP (Stretta y del Arenal, 1961; Consultores SA, 1977; Martínez y Cuellar, 1979; fuentes bibliográficas tomadas de Cardona, 1990) uno superficial tipo libre que se alimenta de agua de lluvia alrededor de la planicie y otro profundo tipo confinado sin comunicación hidráulica importante entre ambos. La recarga de este último acuífero se considera es por: i) un flujo subterráneo horizontal pequeño, del orden de $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$, procedente del norte y noreste de la cuenca, ii) agua termal profunda ($>1.3 \text{ m}^3/\text{s}$) en una faja que va desde la zona industrial hasta más allá del límite norte de la ciudad de SLP. Adicionalmente, se identificó flujo vertical recalando la importancia de determinar este tipo de componente para así evaluar de manera real el caudal de entrada del sistema. Con el uso de geotermómetros se estimó que la temperatura del agua del acuífero profundo en la zona termal varía entre 40 y 200°C. A través de la hidrogeoquímica identifican que la zona de Peñasco se comporta como una subcuenca independiente.

Cardona (1990): Diferenció ocho grupos de agua subterránea, de los cuales siete corresponden con agua del acuífero profundo. Aquella agua subterránea con temperatura más elevada de 33°C (catalogada termal) se estableció que circula por rocas volcánicas mientras que el agua con menor temperatura (25-28°) se asocia con el material granular de relleno de la fosa tectónica. Empleando geotermómetros de calcedonia y Na-K-Ca determina las temperaturas mínimas de equilibrio de 70 a 80°C para el agua termal y supone que esa agua alcanzó una profundidad entre 1.5 y 1.9 km. Asimismo, se realizaron diversos análisis hidroquímicos para identificar el origen de los diferentes constituyentes disueltos y determinar las proporciones de mezcla de aguas. La región de las localidades de Ojo Caliente-Santa María del Río (hacia Villa de Reyes, SLP) fue catalogada como zona de descarga natural del agua del acuífero profundo de SLP, mientras que el agua fría ($\sim 15\text{-}20^\circ\text{C}$) se establece que descargan en forma de manantiales y evapotranspiración en las estribaciones de la Sierra San Miguelito, ubicada al sur de la ciudad de SLP.

Carrillo-Rivera (1992): A partir de un análisis geológico, geomorfológico, hidrogeoquímico, isotópico, geofísico e hidráulico documenta la dinámica del agua en el área de San Luis Potosí, e incorpora posibles procesos generados en el subsuelo (interacción agua-roca), así como la definición de zonas de recarga. Con base en las curvas de abatimiento contra tiempo obtenidas a través de algunas pruebas de bombeo se establece que el acuífero profundo está constituido por tres medios: material granular, medio fracturado y de doble porosidad. Los análisis hidrogeoquímicos condujeron a la identificación de cuatro grupos principales de agua para el acuífero profundo: i) agua termal (regional), ii) agua fría (local), iii) agua de mezcla (grupos i y ii), iv) Peñasco; asimismo, se definió uno para el acuífero somero, de carácter local. De sus resultados más importantes es la inclusión de la componente de flujo vertical, teniendo en cuenta que para ese entonces aún no se contemplaba por el sector oficial que administra el agua la inducción de flujos más profundos durante la extracción de agua en pozos. Estos flujos regionales inducidos (o mezcla) son responsables de la alta temperatura y concentración de diversos elementos en el agua de la región, entre ellos el fluoruro que ocasiona diversos problemas de salud.

Carrillo-Rivera et al. (1996) establecieron que en SLP: i) la calidad del agua profunda (termal) es totalmente diferente a aquella somera (local), ii) la mayoría del agua termal se encuentra en áreas relacionadas con fallas regionales, iii) la extracción intensiva y sin control de la parte superior del acuífero induce el movimiento ascendente de agua de flujo regional, la cual se mezcla con flujos más someros ocasionando el cambio en la calidad del agua que se extrae en los pozos. Hace hincapié que esta situación de bombeo descontrolado alterará el flujo subterráneo y aumentará la contaminación del agua subterránea, tanto por fuente antropogénica como natural (interacción agua-roca). El análisis hidrogeoquímico permitió establecer una posible conexión hidráulica subterránea entre cuencas superficiales, donde la recarga de agua termal para el acuífero profundo de SLP se origina fuera del límite superficial de la cuenca hidrográfica correspondiente.

Molina-Maldonado (1996). Analiza los sistemas de flujo para una zona que comprende la ciudad de Aguascalientes y sus alrededores en un radio de 25 km. Con base en la composición química y propiedades físicas de 56 muestras de agua realizó un análisis hidrogeoquímico que condujo a diferenciar diferentes sistemas de flujo, que son: i) regional oriental, ii) regional occidental, iii) intermedio y iv) mezcla entre flujos regional e intermedio. Asimismo, se determinó la profundidad mínima de circulación a través del uso de geotermómetros, la cual oscila entre 1.6 y 2.2 km para el sistema regional oriental.

CNA (2000). Debido a diversos impactos ambientales identificados en el año 2000 la CONAGUA realizó una investigación semidetallada para establecer una visión y métodos alternativos para identificar los flujos del agua subterránea, en particular para las cuencas superficiales de Aguascalientes y San Luis Potosí. En este trabajo se analizó con detalle las reacciones de interacción agua-roca, se realizaron análisis de granulometría para el material del acuífero somero y petrográfico para diferentes tipos de roca volcánica presentes en el área de San Luis Potosí. Se realizó modelación inversa, la cual permitió cuantificar las reacciones que dieron origen a la composición de las soluciones que se obtuvieron durante las pruebas de laboratorio. Un aspecto importante que se señala en tal estudio es que en ocasiones más de un modelo de funcionamiento puede considerarse como representativo de las condiciones de laboratorio por lo que las condiciones más reales pueden obtenerse con el conocimiento y aplicación de la configuración geológica y

mineralógica. Este trabajo presenta una importante revisión bibliográfica, donde se incluye un buen número de tesis de San Luis Potosí.

Carrillo-Rivera (2000): Analiza los diferentes componentes de la ecuación del balance hídrico para dos cuencas de la República Mexicana (San Juan B. Londó en la Península de Baja California y San Luis Potosí). El estudio resalta la importancia de incorporar en el análisis del balance hídrico los flujos intermedios y regionales entre cuencas, así como el flujo vertical que se genera a través de fallas regionales o por la extracción en pozos, ya que permiten realizar una adecuada interpretación del flujo subterráneo; se determinó que aproximadamente el 70% del agua termal extraída en ambas cuencas proviene de una cuenca hidrográfica diferente, confirmando así la posibilidad de flujo entre cuencas. El mayor aporte de este trabajo es señalar el error significativo que tiene el balance hídrico al no contemplar estas entradas, y por ende, en el valor obtenido para el coeficiente de almacenamiento, variable de suma relevancia en cálculos de extracción de agua.

Carrillo-Rivera et al. (2002): Proponen algunas acciones para el control de la alta concentración de fluoruro presente en el agua subterránea extraída en SLP. Explica que el alto contenido de este elemento se atribuye a la mezcla de flujos como resultado del régimen de extracción, hidrogeología local y por el diseño, la construcción y la operación de los pozos. Asimismo, presentan diferentes alternativas de extracción de agua de pozo, que se basa principalmente en la mezcla adecuada de agua termal y fría, que permite la obtención de agua cuya concentración de fluoruro es aceptable acorde con los límites de agua potable. Un importante indicador es la temperatura del agua, ya que se considera que al mantenerla menor a 30°C se extraerá una mezcla de flujos con bajo fluoruro. Esta situación es un mecanismo de control para aquellos pozos que ya se encuentran operando en la región, sin embargo, indican también la forma adecuada para la construcción de pozos nuevos. Se resalta la importancia de comprender los diversos procesos que se generan en el subsuelo para usarse en beneficio de la extracción de agua subterránea de adecuada calidad, y que el diseño, construcción y operación de pozos sea con base en el funcionamiento del sistema, que a su vez, repercutirá en el ahorro de dinero debido a que no se requerirá de plantas de tratamiento.

Carrillo-Rivera et al. (2007). A partir de una comparación hidrogeoquímica entre la cuenca de San Luis Potosí en México donde predominan las rocas volcánicas félsicas y una porción de la cuenca Pannonian en Hungría que es un medio sedimentario, se analiza la evolución de los diferentes flujos (local, intermedio y regional) determinando direcciones de flujo y procesos de contaminación; resaltando que los flujos locales son los más vulnerables, y que las zonas de descarga son menos vulnerables a la contaminación respecto a aquellas de recarga, en especial para flujos local e intermedio, debido principalmente al bajo contenido de oxígeno disuelto del agua ascendente.

Cardona (2007). Mediante un análisis hidrogeoquímico identifica tres sistemas de flujo (regional, intermedio y local) en un sector de la Mesa Central, asimismo muestra la importancia que tiene la componente vertical de agua subterránea, en especial, en zonas donde los pozos no penetran totalmente el acuífero (como es el caso de SLP y el área de estudio de la presente investigación) afectando notablemente la temperatura y calidad del agua que se extrae con el tiempo de extracción. A partir de una modelación geoquímica inversa se obtiene que la calidad del agua del sistema de flujo intermedio puede estar

condicionada por reacciones con minerales arcillosos, los cuales son producto de la alteración de las rocas volcánicas. Asimismo, indica un aumento del 100% en la superficie que representa la alteración en la calidad del agua a partir de comparar datos de 1987 (Carrillo-Rivera, 1992) y los obtenidos en ese trabajo. Las principales causas de contaminación de los sistemas de flujo local son: i) el riego de cultivos con aguas residuales, y ii) la infiltración de agua residual de canales, colectores y fugas de los sistemas de saneamiento.

1.2. Justificación de la investigación

La problemática ambiental que se presenta actualmente en el mundo, especialmente en países no desarrollados, ha sido resultado de prácticas inadecuadas y el sobreponer a un desarrollo ambiental sustentable intereses particulares de un grupo reducido de individuos cuyo objetivo es incrementar sus ganancias monetarias y bienes adquiridos sin considerar impactos negativos al ambiente. A pesar de existir diferentes entidades, mecanismos, ONG's, etc., que pretenden proteger y conservar diversas componentes del ambiente, se observa que éstos no han sido del todo eficientes debido principalmente a la falta de conocimiento que se tiene sobre la dinámica y funcionamiento de la naturaleza. Al parecer los aspectos señalados en la literatura (Barkin, 1998; Carrillo-Rivera et.al., 2004; Peñuela-Arévalo, 2007; Carrillo-Rivera *et al.*, 2008; entre otros): poder (que implica corrupción, riqueza, falta de voluntad política) y desconocimiento, son las principales causas del deterioro ambiental existente hasta el momento y parecen continuar en aumento.

El presente trabajo busca contribuir al conocimiento del funcionamiento hidrogeológico para la porción central de la República Mexicana, incorporando en lo posible la definición de zonas de recarga de agua de lluvia al subsuelo asociadas a su manifestación en superficie (descarga). La herramienta a usar, los sistemas de flujo, es imprescindible en investigaciones de agua subterránea ya que su entendimiento permite determinar su interacción con los demás componentes de la naturaleza, incluyendo el ser humano. Carrillo-Rivera *et al.* (2008) exponen dos procesos que son resultado de la relación ambiente-ser humano:

- ◆ Impactos al agua subterránea por afectación al ambiente (actividades antrópicas), por ejemplo reducción de la tasa de recarga (uso del suelo), reducción de la descarga de agua subterránea (en cuerpos de agua continental y en la costa), contaminación del agua subterránea por residuos líquidos y sólidos, inducción de agua de calidad no deseada (agua con alto contenido en sales u otros elementos traza perjudiciales para la salud humana) por bombeo.
- ◆ Impactos al ambiente por cambios en el régimen del agua subterránea, por ejemplo el descenso del nivel freático, consolidación del suelo (subsistencia), desaparición de vegetación freatofita y humedales, erosión del suelo, importación de agua de otras cuencas (inundaciones).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011; datos a diciembre 31, 2009), cerca del 37% del volumen total concesionado para uso consuntivo en el territorio nacional es de origen subterráneo. No obstante, estos números no reflejan la dependencia al agua subterránea de regiones cuyas características geomorfológicas, climáticas, etc., no permiten la presencia de suficiente agua pluvial o superficial para los diferentes usos o

bien cuando el crecimiento demográfico ha superado la capacidad natural que suministraba el agua superficial llevando al aumento en el uso de pozos, los cuales son cada vez a mayor profundidad. Un ejemplo claro, es aquel relacionado con la Ciudad de México, cuya expansión ha ocasionado una búsqueda continua de agua para satisfacer las necesidades de la creciente población y de sus actividades económicas. Esto se ve reflejado en el gran uso de agua subterránea (73%) para su abastecimiento y para todos los usos (CONAGUA, 2011).

Por esto, es importante crear una conciencia ambiental que incorpore el funcionamiento de este elemento en cada proyecto y programa ambiental, ya que en la actualidad la mayoría de los estudios sobre agua subterránea se limitan a la estimación y no a medir variables superficiales (lluvia, escorrentía, evapotranspiración) sin tener en cuenta que las dos últimas están sujetas a condiciones que se generan por procesos geológicos e hidrogeológicos en el subsuelo. De igual modo, los proyectos ambientales recientes indican la necesidad de realizar estudios no sólo multidisciplinarios sino interdisciplinarios debido a que el ambiente es un sistema que como tal debe evaluarse de manera integral. Carrillo-Rivera *et al.* (2008) recalcan la relevancia de incluir el movimiento vertical del flujo subterráneo en cualquier estudio hidrogeológico ya que su no integración ha resultado en impactos ambientales serios y frecuentemente irreversibles.

Usualmente la determinación del agua subterránea no es incluida en los estudios hidrogeológicos/ambientales o si lo es, es únicamente a través de la técnica del arriba indicado balance hídrico, la cual se reitera como no recomendable, especialmente por las condiciones físicas que se presentan en el país, por el tipo y cantidad de información asequible, así como porque no incorpora procesos y determinación del funcionamiento del flujo subterráneo. Por lo tanto, es necesario estudiar, reconocer, divulgar y resaltar la importancia del papel del agua subterránea en el ambiente.

Se considera que la realización de investigaciones de este tipo permite la búsqueda, desarrollo y mejoramiento de metodologías para la valoración del entorno natural y por ende, permitirán proponer una adecuada gestión ambiental, cuyo objetivo final sea lograr la anhelada armonía entre las componentes del ambiente, incluyendo los seres humanos y sus actividades económicas, conocido genéricamente como "desarrollo sostenible". Por lo tanto, se considera que la aplicación de resultados de esta investigación podrán contribuir a mejorar la calidad de vida de la gente involucrada; asimismo, se debe decir que las instituciones gubernamentales y las de carácter privado, están involucradas como usuario final. Otro punto de gran interés es que las condiciones de funcionamiento a definir en la presente investigación se estima podrán ponerse en práctica en otras áreas de la Sierra Madre Occidental y Mesa Central, por similitud de las condiciones hidrogeológicas.

El conocimiento de los procesos hidrológicos involucrados permitirá comprender la interacción natural que condiciona la presencia de ríos, lagunas, manantiales, humedales, zonas de recarga, zonas de descarga y otras fuentes consideradas de servicio ambiental para conservación de ecosistemas existentes, así como el manejo conservacionista de suelo y vegetación que deberá garantizarse a fin de evitar modificaciones en la calidad y cantidad del agua tanto superficial como subterránea. El reto actual es el desarrollo de metodologías para asegurar la calidad y cantidad de agua apta para consumo humano u otras actividades más que la extracción de la misma pues es evidente que no es sólo usar

el agua para beneficio propio sino que ésta debe regresarse de manera adecuada a los ecosistemas para provecho y beneficio común.

1.3. Hipótesis de trabajo

De acuerdo con los resultados de los estudios existentes para porciones del área de estudio se contempla la posibilidad de una conexión hidráulica subterránea entre cuencas hidrográficas asociadas a través de las rocas volcánicas fracturadas del Terciario, lo cual se pretende examinar en la presente investigación mediante un estudio de tipo hidrogeológico que incorpora un análisis hidroquímico e isotópico basado en la teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea (Tóth, 2000). Esto permitirá a su vez demostrar la utilidad de la metodología aplicada para una mayor aproximación del funcionamiento de los sistemas de flujo y su jerarquía en el área de estudio, así como posible trayectoria que relacione la zona de descarga con su recarga asociada. Esto representa un factor relevante para plantear el funcionamiento del agua subterránea de donde sea factible proponer, evitar y reducir impactos negativos generados por desconocer su dinámica.

1.4. Contribución científica de la presente investigación

Una parte importante de la problemática ambiental que crece de manera alarmante en el territorio mexicano se debe principalmente a la falta de conocimiento que se tiene con respecto a la dinámica del agua subterránea en el subsuelo, su relación con otros componentes ambientales y su funcionamiento sistémico en la naturaleza. Como se señala previamente, los estudios hidrológicos, hidrogeológicos y ambientales en México que incorporan un análisis del agua subterránea se limitan al uso de la técnica del balance hídrico, del cual se obtienen valores (números) que ciertamente no corresponden con la realidad y los cuales desafortunadamente son la base para la toma de decisiones de diversa índole en el país. Esta técnica no incorpora procesos, hidrogeoquímica, tampoco el funcionamiento del sistema, por lo que la principal contribución de la presente investigación es mostrar la factibilidad y necesidad de realizar un análisis integral y sistémico del agua subterránea a través de la teoría de los sistemas de flujo subterráneo.

Contar con el conocimiento del comportamiento del flujo subterráneo en el subsuelo ligado a la evolución química del agua asociada con la interacción agua-roca, así como los efectos por su extracción a través de pozos, entre otros, permitirá proponer una adecuada gestión del agua subterránea debido a que las acciones a realizar se basarán en el funcionamiento y aptitudes del sistema.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

El objetivo general es identificar los sistemas de flujo de agua subterránea presentes en el área de estudio, evaluar su funcionamiento, así como la posible conexión hidráulica entre las cuencas hidrográficas ubicadas hacia la parte central de la República Mexicana, al sur de la provincia fisiográfica Mesa Central (parte de los estados de Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco y Zacatecas, principalmente). Este objetivo se desarrolla a través de la aplicación de la teoría de los sistemas de flujo, incorporando un análisis hidroquímico, isotópico, así como de algunos indicadores ambientales (suelo, vegetación, elevación topográfica).

1.5.2. Objetivos específicos

- Identificar indicadores superficiales de manifestación y calidad del agua presentes en el subsuelo como vegetación, características del suelo, y rasgos geomorfológicos
- Analizar e interpretar la interacción agua-roca, considerando el recorrido desde la zona de recarga hasta la de descarga del agua subterránea
- Realizar un análisis del contenido isotópico del agua de lluvia y subterránea en el área de estudio, así como en zonas vecinas
- Reconocer el movimiento y funcionamiento del flujo subterráneo, y su relación con expresiones ambientales que permita una definición más clara de zonas de recarga y tránsito del agua subterránea
- Definir el funcionamiento del agua subterránea a través de análisis físicos, químicos e isotópicos de muestras de agua seleccionadas
- Estimar en forma indirecta la profundidad de circulación del agua subterránea a través de la aplicación de geotermómetros
- Determinar la distancia de recorrido del agua subterránea a través del uso de técnicas hidráulicas, químicas e isotópicas
- Proponer una metodología para establecer el mínimo de parámetros necesarios, procedimiento y manejo de información necesaria para lograr la definición de los sistemas de flujo.

1.6. Organización del trabajo de investigación

El cuerpo principal de la presente investigación consiste de cuatro capítulos, en los cuales se describe: i) la aplicación de algunos estudios hidrogeológicos previos en el área de estudio, así como los objetivos y el referente teórico en el que se sustenta el presente trabajo (Capítulo 1); ii) las características geográficas del área de estudio, esto incluye aspectos climáticos, geomorfológicos, hidrológicos, edafológicos, geológicos y vegetación (capítulo 2); iii) la metodología aplicada para el desarrollo y culminación de la presente investigación (Capítulo 3); iv) los resultados obtenidos a partir de análisis de indicadores superficiales, hidrogeoquímico e isotópico, y por último (Capítulo 4), la interpretación conjunta para la definición de los sistemas de flujo de agua subterránea en el área de estudio.

El presente documento incorpora en su parte final un capítulo de Conclusiones, en el que se concretan los resultados definitivos y más relevantes de la investigación, asimismo, se incluye un apartado con anexos, en los cuales se publican datos fisicoquímicos, cálculos, hojas de campo, etc., que sirve de base para la comprobación de los resultados obtenidos en el presente trabajo, así como para futuras comparaciones con estudios posteriores.

1.7. Referente teórico y metodológico

A continuación se realiza una breve descripción de algunas de las metodologías más empleadas en estudios hidrológicos y aquellos que contemplan el agua subterránea. Asimismo, se muestra la teoría de los sistemas de flujo, misma que es la base para el desarrollo de la presente investigación.

1.7.1. Balance hídrico

Como se menciona anteriormente, esta técnica es la más empleada en los estudios de carácter hidrológico en el territorio nacional. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana

NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002), la recarga total se determina en su forma más simple empleando la siguiente ecuación:

$$\text{RECARGA TOTAL} = \text{CAMBIO DE ALMACENAMIENTO} + \text{DESCARGA TOTAL}$$

Esto se puede traducir como que la suma de las entradas (en la unidad hidrogeológica) es igual a la suma de las salidas \pm el cambio de almacenamiento en esta registrado.

A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de estos componentes con base en la redacción de la misma norma. El cambio de almacenamiento se determina a partir de la evolución de los niveles del agua subterránea para un intervalo de tiempo determinado y valores representativos del coeficiente de almacenamiento y/o porosidad efectiva, lo que se determina mediante pruebas de bombeo o se estima con base en las características litológicas del acuífero bajo estudio.

La descarga total incluye volúmenes desalojados de forma natural, así como los extraídos de la unidad hidrogeológica a través de captaciones.

La descarga natural se divide en cuatro variables: 1) Caudal base, 2) Manantiales, 3) Evapotranspiración, y 4) Flujo subterráneo. La primera de ellas se obtiene a partir del análisis de hidrogramas con base en datos registrados en períodos de estiaje en estaciones hidrométricas instaladas sobre el cauce de la corriente del caso. El caudal de manantiales se determina "integrando el área bajo el hidrograma, esto es, multiplicando el intervalo de balance por el caudal medio correspondiente". La evapotranspiración está compuesta por: 1) la evaporación directa de agua somera, que se estima multiplicando el área donde el nivel aflora o está cerca de la superficie, por la lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial medida en estaciones climatológicas; y 2) la transpiración de la flora, cuyo valor queda implícito en el resultado del balance por la dificultad para su determinación. Por su parte, la descarga subterránea se determina aplicando la Ley de Darcy a las secciones de salida definidas en la configuración de los niveles del agua subterránea.

La descarga a través de captaciones se obtiene de las lecturas registradas en los medidores instalados en los pozos o con algún método indirecto (caudal y tiempo de bombeo, consumo de energía eléctrica, población servida y dotación, índices de consumo, superficie y lámina de riego, etc.).

Sin embargo, en el presente trabajo no se aplica esta metodología debido a que no se considera precisa por diversos factores, entre los cuales destacan: la configuración geológica en el país que involucra acuíferos de gran extensión y espesor; la metodología y falta de precisión para determinar muchas de las variables, la carencia de una base de datos de aprovechamientos realmente actualizada y la falta de una densa red y registro histórico de estaciones climatológicas e hidrométricas. Mayor información con respecto a las falencias de este método se encuentra en los estudios de Hergt *et al.* (2002), Huizar *et al.* (2004), SEDESOL (2005), entre otros. Adicionalmente, para lograr el objetivo de la presente investigación de caracterizar el funcionamiento del agua subterránea es necesario analizar algunos de los posibles procesos que se generan en el subsuelo, lo cual

evidentemente no se puede obtener con la implementación del balance hídrico ya que en general, sólo es un intento de cuantificar la recarga de agua al subsuelo.

El mayor inconveniente con este método es que es el más (y en muchos casos el único) empleado en los estudios hidrológicos y ambientales, sus resultados (números) son la base para tomas de decisiones, por lo que es necesario crear conciencia que las estimaciones de volúmenes determinadas a través del balance hídrico son aproximaciones, las cuales no representan siempre la situación real del agua. Por lo tanto, es necesario la búsqueda y aplicación de metodologías (estudios sistémicos e integrales) que conduzcan al conocimiento del sistema, es decir, que no sólo se limite al cálculo de volúmenes sino que a su vez incorpore aspectos relacionados con la calidad del agua aunado a su vez con procesos en el subsuelo e inter-relación con los diversos componentes de la naturaleza.

1.7.2. Métodos geológicos

El reconocimiento geológico es considerado como uno de los métodos más económicos para la exploración del agua subterránea, puede incluir el uso de fotografías aéreas, imágenes satelitales, consulta de mapas geológicos (Price, 2003), el reconocimiento del terreno, estudios petrográficos, estratigráficos, análisis de la estructura geológica, geomorfología, entre otras especialidades geológicas (Davis y De Weist, 1971). En general, el hidrogeólogo analiza las características físicas de las rocas para determinar aquellas permeables que permiten la circulación y almacenamiento de agua. Una vez identificado el acuífero se puede establecer su continuidad y espesor en determinado lugar a través del conocimiento de la estratigrafía, así como de la estructura geológica. La geomorfología por su parte, Davis y De Weist (1971) señalan que es indispensable hacer investigación hidrogeológica de áreas pleistocenas y de depósitos recientes ya que puede proporcionar información litológica, estratigráfica y estructural de interés.

Por su parte, la interpretación de fotografías aéreas y uso de imágenes de satélite permite la valoración a distancia, no sólo geológica, de una extensa área reduciendo tiempo de trabajo y costos de operación si se contempla el gasto por especialistas, viáticos, etc., para una campaña de cartografía. No obstante, es necesario recalcar la relevancia que tiene el realizar trabajo de campo posterior para verificación y validación de los resultados obtenidos a través del uso y análisis de sensores remotos.

1.7.3. Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica corresponde con una rama especializada de los métodos geológicos. La investigación sobre la geoquímica del agua se basa en que la molécula del agua es resultado de su interacción con las rocas por las que fluye a lo largo de todo el trayecto, desde su recarga hasta su descarga; así la temperatura y profundidad que logre alcanzar el agua durante su recorrido por el subsuelo son variables determinantes que afectan la calidad del agua circulante. A partir de la calidad química e isotópica del agua de manantiales y pozos, junto con el conocimiento del perfil estratigráfico e hidráulico, se puede definir edad, dirección y velocidad del flujo, así como procesos y reacciones químicas que se presentan en el agua subterránea durante su recorrido por el subsuelo. Los principales parámetros físicos y químicos que se tienen en cuenta para un análisis hidrogeoquímico son: temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, sólidos totales disueltos, sodio, magnesio, potasio, calcio, litio, fluoruro, cloruro, bicarbonatos, nitratos, sulfatos; así como metales y metaloides, como el caso del arsénico, estroncio, plomo, etc.

En la presente investigación se emplearon los programas AQUACHEM (1977), MODELAGUA (Fagundo-Sierra *et al.*, 2001) e HIDROGEOQUIM (Fagundo *et al.*, 2005), los cuales facilitan el manejo de datos de análisis químicos, permiten obtener patrones hidrogeoquímicos y procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química del agua para el área de estudio, asimismo se determina la temperatura mínima de equilibrio para cada muestra con base en geotermómetros *ad hoc*.

1.7.4. Isótopos estables

Los isótopos ambientales estables son trazadores del origen del agua subterránea y se emplean para determinar procesos de recarga (su elevación), reacciones geoquímicas, evaporación, tasa de reacción, entre otros. Su importancia radica en que las relaciones entre los contenidos de isótopos estables pesados de oxígeno (^{18}O) (ej. relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) y deuterio (^2H o D), para fines prácticos se mantienen constantes al entrar el agua de lluvia al subsuelo, sin verse afectados por diferentes procesos e interacción roca-agua.

No obstante, existen procesos que puede afectar la concentración de isótopos, como lo es el caso que corresponde con la fase de evaporación y condensación del agua de lluvia. Al precipitarse el agua de lluvia, las gotas que descienden de las nubes tienen una mayor concentración en isótopos pesados; las nubes van perdiendo los mismos a lo largo de su trayecto hacia el continente y van adquiriendo poco a poco características propias del entorno natural dada su temperatura. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en cooperación con la Organización Meteorológica Mundial estableció hace medio siglo una red mundial de estaciones para la colección de muestras continuas reportadas como valor mensual de precipitación, con el objetivo de determinar la composición isotópica de la lluvia. Esto resultó en la definición de una línea que se considera representa esta tendencia de disminución en el agua de lluvia de la concentración de los isótopos ^{18}O y ^2H a medida que el agua de lluvia se desplaza del mar hacia el continente (o del movimiento del trópico al círculo polar) y se conoce como línea meteórica global (LMG; $\delta^2\text{H}=8 \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰ SMOW-Standard Mean Ocean Water}$); Craig, 1961, citado por Clark y Fritz, 1997). La LMG suministra una referencia para interpretar procesos hidrológicos y origen de las diferentes masas de agua en un lugar específico. Posteriormente, Rozanski *et al.* (1993; citado por Gupta, 2011) recopilaron datos isotópicos de la red global de isótopos en la precipitación (GNIP-Global Network for Isotopes in Precipitation) para mejorar la precisión de aquella ecuación determinada por Craig obteniendo la nueva LMG: $\delta^2\text{H}=8.17 (\pm 0.07) \delta^{18}\text{O} + 11.27 (\pm 0.65) (\text{‰ VSMOW-Vienna Standard Mean Ocean Water})$.

De igual manera, se puede calcular la línea meteórica local para una cuenca determinada o territorio obteniendo mayor precisión en el estudio y aplicación de los análisis de isótopos. Como ejemplo se puede citar el caso de la cuenca de México, donde Cortés y Farvolden (1989) establecieron la línea meteórica local como $\delta^2\text{H}=7.95 \delta^{18}\text{O} + 11.77$ con base en datos isotópicos de agua de la cuenca.

Actualmente, el Área de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el Instituto de Geografía de la UNAM, bajo un convenio con el Organismo Internacional de Energía Atómica, está realizando la toma de muestras de agua lluvia desde junio del año 2008. Hasta el momento, en el estado de San Luis Potosí, se tiene

para el análisis isotópico un total de 10 estaciones con un muestreo continuo de lluvia reportado en forma mensual (a menos que no se presente lluvia). Con estos datos se pretende definir la línea meteórica local para San Luis Potosí y evaluar el comportamiento isotópico de la región. Teniendo en cuenta la cantidad de información con que se cuenta para la elaboración de la presente investigación, se realizó un análisis de isótopos estables (^{18}O y ^2H) para determinar la composición de dichos elementos en el agua subterránea del área de estudio y buscar variaciones en su composición de donde se pueda plantear posibles escenarios de la variabilidad climática o del denominado cambio climático.

1.7.5. Métodos geofísicos de superficie

Esta técnica se emplea principalmente para el reconocimiento sub-superficial del terreno, y en su relación con el agua subterránea, para la exploración y selección del lugar idóneo para la construcción de un pozo. La prospección geofísica incorpora el análisis de variaciones contrastantes de ciertas propiedades físicas del subsuelo como la densidad, conductividad eléctrica, potencial eléctrico (Davis y De Weist, 1971; Price, 2003).

Las técnicas geofísicas más comunes son: 1) Métodos magnéticos, 2) Métodos gravimétricos, 3) Métodos sísmicos, y 4) Métodos eléctricos. Más información sobre cada una de ellas puede adquirirse en la literatura (Davis y De Weist, 1971; Custodio y Llamas, 1983; Freeze y Cherry, 1979; Price, 2003; entre muchos otros). En general, la prospección geofísica permite determinar la estratigrafía regional e identificar estructuras geológicas, información que emplea el geólogo para los análisis hidrogeológicos y detección de acuíferos. No obstante, en aquellos casos que se presenta una configuración geológica demasiado compleja y/o no se registran amplios contrastes entre los valores de una propiedad, no es posible la interpretación de las mediciones geofísicas (Davis y De Weist, 1971), o en caso tal de hacer una interpretación ésta muy posiblemente resultaría en una definición errónea de la configuración del subsuelo. Asimismo, se deben contemplar las diferentes limitantes que cada una de las técnicas presenta para hacer más confiable el método y los resultados arrojados. Así, es recomendable la aplicación de métodos geofísicos en proyectos de importancia económica para definir que la estructura geológica sea regional y favorable, esto permitirá tener en cuenta los costos que implica la extracción del agua del subsuelo en el sitio de estudio.

En la presente investigación no se aplican técnicas geofísicas debido a la gran extensión del área de estudio, su complejidad en la configuración geológica, y especialmente por el factor económico. Por lo tanto, la información estratigráfica y geológica general que se emplea en este estudio se obtuvo de informes, publicaciones y cartografía relacionada con esta temática.

1.7.6. Sistemas de Información Geográfica (SIG), superposición de polígonos

En la literatura se encuentran numerosas definiciones de sistemas de información geográfica, realizadas por diversas instituciones y autores. De manera general, los SIG son sistemas computarizados para el almacenamiento, recuperación, manipulación, análisis y visualización de datos geográficamente referenciados. Estos sistemas fueron desarrollados en las décadas de los cincuenta y sesenta, especialmente en Estados Unidos y en el sector público (Mark *et al.*, 1997). Los SIG surgieron como una herramienta para facilitar el manejo de información cartográfica para evaluaciones de impacto ambiental, principalmente. Sin embargo, actualmente es posible el análisis integrado y generación de

información a partir de la colección de una serie de datos (Rodríguez, 2001). Evidentemente el desarrollo y uso de esta valiosa herramienta continúa en aumento.

Una de las funciones de análisis espacial más representativa y usada en los SIG es la superposición (overlay) de capas de información, cuyo origen es atribuido a McHarg (1969, citado por Verdaguer, 2002; García Leyton, 2004) debido a que propuso una metodología sencilla desde que comenzaron a requerirse las Evaluaciones de Impacto Ambiental; el método de transparencias propuesto por Ian McHarg en su libro "Design with nature" ha servido de base para la realización de proyectos para trazar gasoductos, vías de comunicación, líneas de transmisión para energía eléctrica, aeropuertos y otros. La superposición consiste básicamente en el análisis multivariable de un ensamble o integración de distintas capas temáticas o mapas (Rodríguez, 2001; Verdaguer, 2002; García Leyton, 2004). Así, la superposición se utiliza para describir condiciones existentes, tiene en cuenta las características del territorio para resaltar las zonas de gran sensibilidad ambiental para determinado proyecto, por lo tanto, es evidente la importancia de expertos en la etapa de interpretación, para la evaluación de planes de ordenamiento territorial y sus impactos al ambiente (García-Leyton, 2004).

En la presente investigación se emplea el programa ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008) para la representación geográfica de la información temática existente del área de estudio, su manejo, y por último, el análisis de indicadores superficiales (suelo, vegetación, litología, etc.) que permitió la definición de posibles zonas de recarga y descarga de agua subterránea a través de la aplicación de la superposición de polígonos principalmente.

1.7.7. Teoría de los sistemas de flujo

El agua subterránea debe ser considerada como un importante agente geológico, debido a que es causa común de una gran variedad de procesos y fenómenos naturales, siendo la interacción agua subterránea-ambiente y la naturaleza jerárquica y sistematizada de las líneas de corriente (de flujo), las dos causas fundamentales responsables del comportamiento del agua subterránea como agente geológico (Tóth, 2000). A continuación se definen brevemente algunos conceptos básicos de los sistemas de flujo gravitacionales para un mayor entendimiento:

- *Zona de recarga:* reúne una serie de factores que propician la infiltración de agua hasta alcanzar el nivel de saturación del agua subterránea, se origina en zonas topográficamente elevadas, el flujo es vertical descendente y el nivel freático es profundo, no obstante, puede presentarse recarga de agua al subsuelo en zonas de planicie con nivel freático poco profundo.
- *Zona de descarga:* es una zona natural donde el agua tiene un movimiento preferencial vertical ascendente emergiendo desde el subsuelo (manantiales) contribuyendo junto con agua de escorrentía (exceso de lluvia) a la formación de fuentes superficiales de agua (lagos, flujo base de ríos, lagunas costeras).
- *Zona de tránsito:* como su nombre lo indica es una parte intermedia donde se produce la circulación del agua desde la zona de recarga hasta la de descarga.
- *Jerarquización de sistemas:* se refiere a la definición y presencia de flujos de tipo local, intermedio y regional, dependiendo de su profundidad y longitud de recorrido, cada uno de los flujos tiene sus componentes de recarga y descarga particulares.

Asimismo, existen tres grandes componentes que controlan el régimen de agua subterránea, éstos son: topografía, referente geológico y clima; donde la topografía determina la cantidad de energía y distribución zonal (movimiento) del agua en una cuenca determinada, el referente geológico que proporciona las zonas en las que el agua puede circular (de acuerdo con las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas), así como también determina la química del agua que circula, por último, los factores climáticos determinan la magnitud y distribución espacial del agua que se encuentra en cada región (Tóth, 2000).

Los sistemas de flujo de agua subterránea se constituyen por líneas de flujo que se originan en una zona de recarga específica, desplazándose a través de una gran extensión territorial la cual a su vez está determinada por la profundidad de la roca basamento, terminando en una zona de descarga específica. A su vez, se diferencian tres tipos de sistemas de flujo: regional, intermedio y local, con base en la profundidad y distancia de recorrido, que le otorga diferentes propiedades físico-químicas al agua debido al grado de interacción agua-roca (profundidad y longitud de recorrido). No obstante, se presenta una tendencia general de agua bicarbonatada en agua con menor grado de recorrido, la cual evoluciona a sulfatada y finalmente a clorurada de acuerdo con la profundidad y distancia alcanzada, este proceso es conocido como secuencia de Chevotareb (1955). La figura 1.2 muestra un esquema simplificado de la distribución del flujo subterráneo en el plano vertical, señalando zonas de recarga, tránsito y descarga, junto con los sistemas de flujo (local, intermedio y regional) así como de los procesos físicos y químicos que se desarrollan por el movimiento natural de agua subterránea.

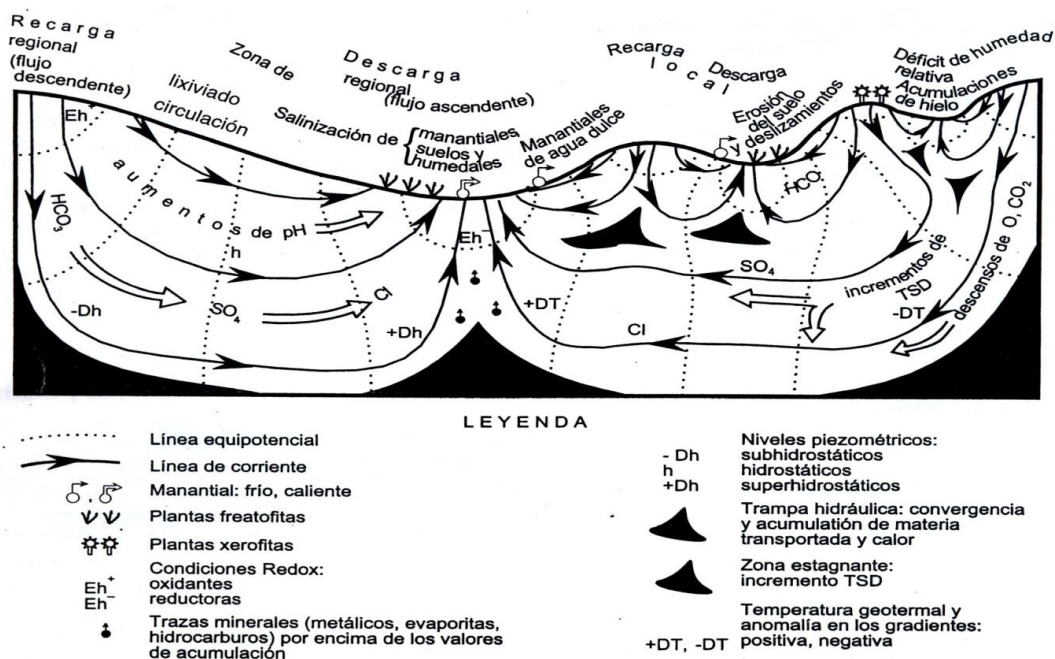


Figura 1.2. Sistemas de flujo desarrollados en una cuenca hidrogeológica regional. Efectos y manifestaciones del flujo gobernado por la fuerza de aceleración de la gravedad (Tóth, 2000).

Como se indicó previamente, existen tres sistemas principales de flujo de agua subterránea que se establecen con la topografía y referente geológico existente: local, intermedio y regional (Tóth, 1962).

a) Sistema de flujo local

Un sistema de flujo local es el más simple; la topografía juega un papel importante en la formación de este tipo de sistema, ya que es factible que existan diversos sistemas de flujo local en una superficie con topografía abrupta, las zonas de recarga y descarga se sitúan en colinas y depresiones adyacentes, respectivamente, es decir, en un mismo valle. Este tipo de sistemas se encuentra incluido en terrenos de pocos kilómetros cuadrados o menos, representando un sistema dinámico de corta extensión, en el que su flujo puede variar acorde con la lluvia que se precipite en diferente estación del año por lo que reacciona sensiblemente con la precipitación; comparativamente con los otros sistemas, son de poca cuantía. Su profundidad y distancia de recorrido es corta; su edad puede variar de menos de un día a unos pocos cientos de años (Alley *et al.*, 1999). Por esta razón, la calidad fisicoquímica del agua subterránea, en general, es de baja salinidad, con alto contenido de oxígeno disuelto, bajo pH, Eh positivo, temperatura cercana a la del ambiente.

b) Sistema de flujo intermedio

En algunos casos, parte del agua de recarga puede descargarse en otro valle (incluso en una planicie) localizada a un nivel topográfico menor incluyendo dentro de su extensión la presencia de varios flujos locales por encima de éste, esto define un sistema intermedio. Por lo tanto, este sistema se diferencia con el flujo local en:

- recorrido del agua subterránea de mayor extensión
- movimiento vertical descendente del agua con mayor gradiente hidráulico
- el flujo lateral se lleva a cabo a mayor profundidad y por mayor distancia
- el movimiento de agua vertical ascendente es de mayor velocidad.

Desde el punto de vista fisicoquímico, el agua en su zona de descarga presenta mayor temperatura, menor contenido de oxígeno disuelto, mayor contenido de sólidos totales disueltos (STD), pH más alcalino, un Eh más negativo y más concentración de sales disueltas, esto en comparación con el agua de flujo local. Su edad puede ser de cientos hasta miles de años.

c) Sistema de flujo regional

Es aquel que circula a la mayor profundidad, por lo que se pueden encontrar varios sistemas de flujo local sobre éste y al menos uno de tipo intermedio. Debido a su mayor recorrido (decenas y hasta cientos de km) y profundidad de circulación, el agua adquiere mayor temperatura que los sistemas local e intermedio, asimismo, la concentración de sales disueltas y sólidos totales disueltos es también la mayor, presenta menor contenido de oxígeno disuelto (con el Eh más negativo) y su pH tiende a ser más alcalino. La edad del agua de este sistema puede ser de miles de años, incluso decenas de miles de años (Alley *et al.*, 1999).

CAPÍTULO 2

MARCO DE REFERENCIA

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Lineamientos geográficos

2.1.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza hacia la porción centro-sur de la provincia fisiográfica Mesa Central (MC), la cual presenta altitudes mayores a los 2,000 m snm en la mayor parte de su superficie y elevaciones topográficas moderadas en su interior, formando desniveles inferiores a los 600 m (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). Esta provincia limita al norte y este con la Sierra Madre Oriental (SMOr), al oeste con la Sierra Madre Occidental (SMOc) y al sur con el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) (figura 2.1). La MC se distingue por la explotación de yacimientos minerales, principalmente de metales preciosos, los cuales se ubican preferentemente sobre las trazas de las estructuras mayores de la provincia.

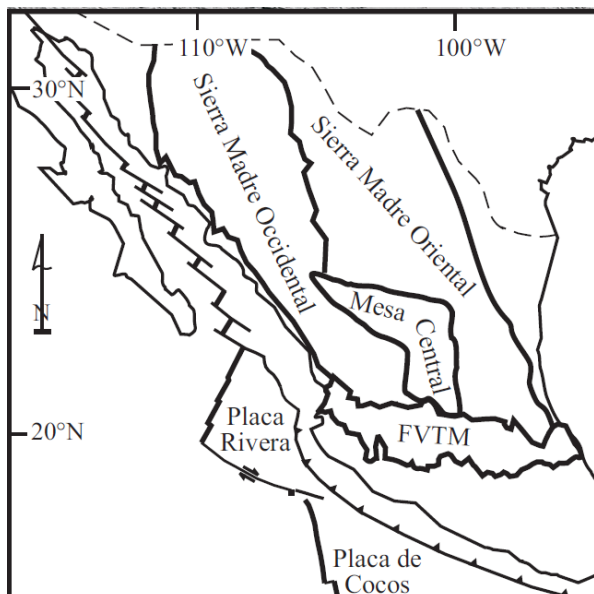


Figura 2.1. Ubicación de la Provincia Fisiográfica Mesa Central. Fuente: Nieto-Samaniego *et al.*, 2005

El área de estudio se encuentra situada entre las coordenadas geográficas 21°04' y 22°43' de latitud norte; 100°24' y 102°37' de longitud oeste. Esta área surgió como una propuesta inicial para evaluar los sistemas de flujo del terreno con base en la información existente del estudio CNA (1999) y determinado número de estudios hidrogeológicos confiables, como se señaló en el capítulo uno. El estudio del agua subterránea, por ser un elemento casi imperceptible en superficie, no permite definir con exactitud límites claros y precisos dado que además el agua subterránea se mueve de una unidad geológica a otra, por lo que no es raro que no respete límites administrativos e incluso un parte-aguas superficial.

De este modo, se aclara que el área de estudio no corresponde con una región separada hidráulicamente de otras cuencas hidrográficas cercanas sino que simplemente debía establecerse un área determinada para la investigación dentro de un enfoque regional, así el área definida comprende casi en su totalidad el estado de Aguascalientes, suroeste de San Luis Potosí, norte de Guanajuato, noreste de Jalisco y sureste de Zacatecas (ver figura 2.2).

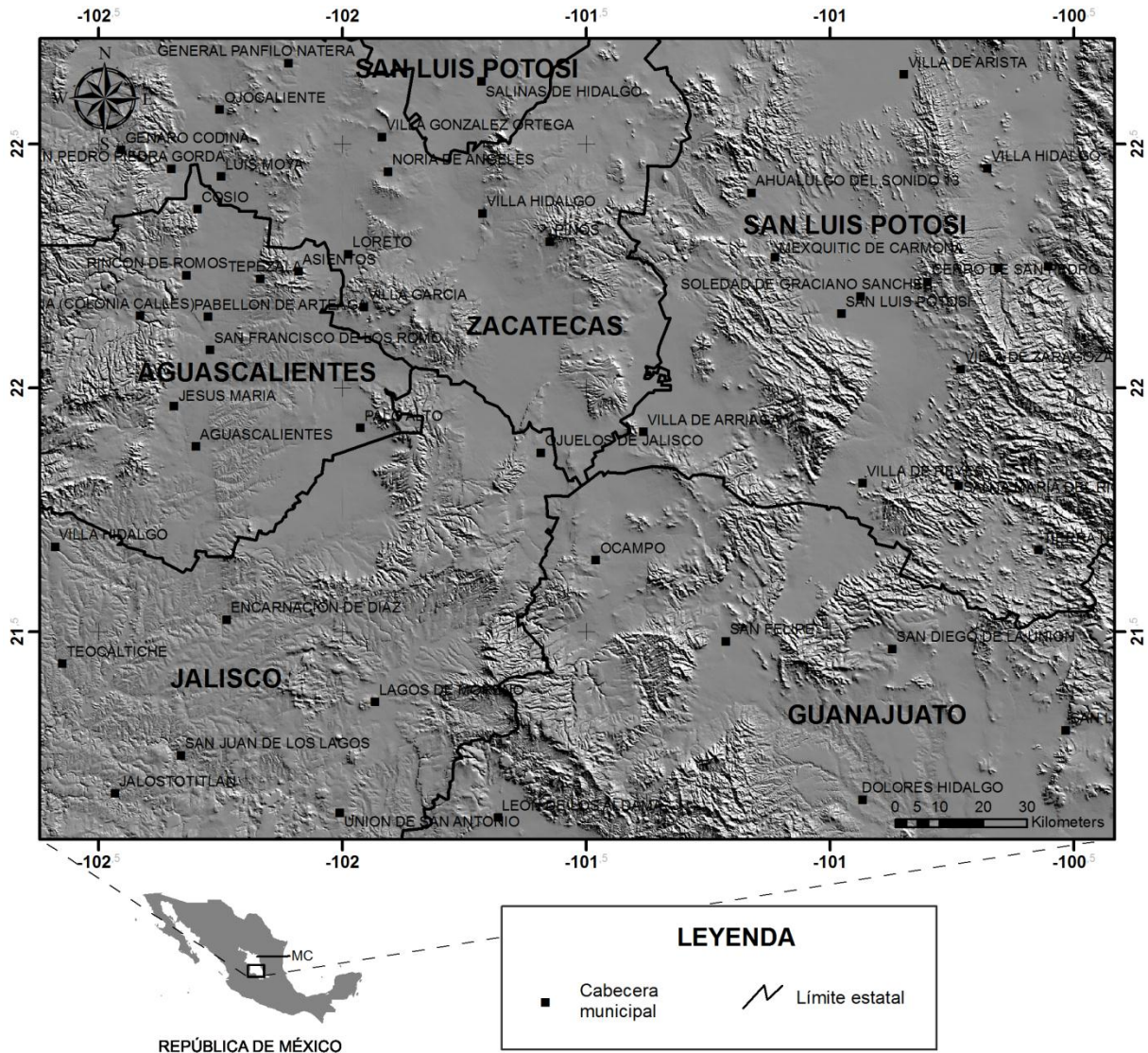


Figura 2.2. Localización del área de estudio

2.1.2. Clima

A pesar de la diferencia de altitud observada en el área de estudio, predomina el tipo de clima semiárido templado (figura 2.3), cuya temperatura media anual varía entre 12 y 18°C, la temperatura del mes más frío es entre -3 y 18°C y la temperatura del mes más caliente es menor a 22°C (García, 1998). No obstante, hacia la parte sur del área de estudio, en el estado de Guanajuato, se aprecia mayor variación en el clima presentándose el tipo templado subhúmedo debido a la presencia de las montañas denominadas Cuatralba, Guanajuato, Alta Caliza, El Ocote, entre otras. La lluvia se presenta en época de verano para todos los tipos de clima. En la tabla 2.1 se señalan las principales características de cada tipo de clima presente en el área de estudio.

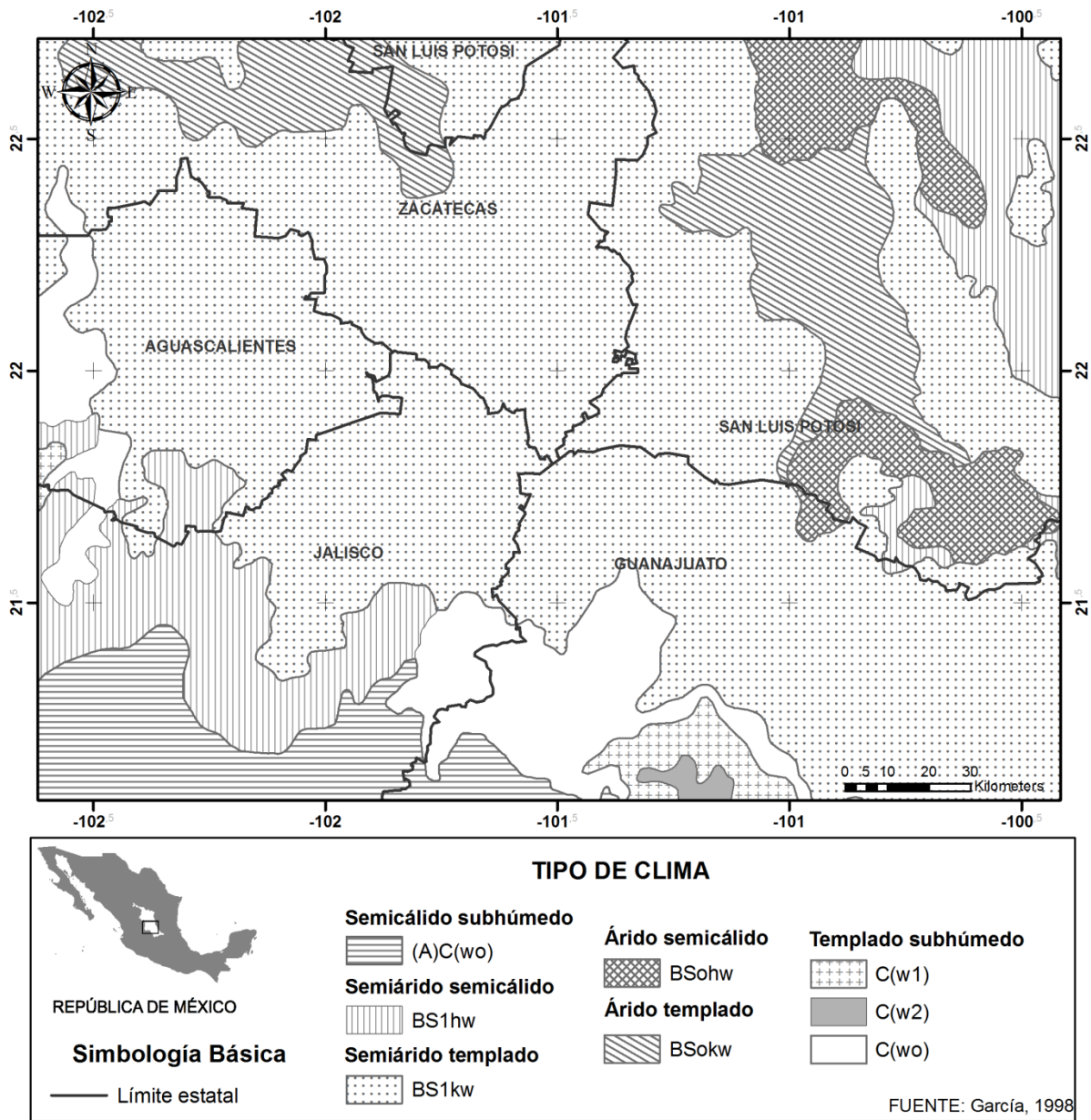


Figura 2.3. Tipo de clima en el área de estudio.

Tabla 2.1. Tipos de clima en el área de estudio

CLIMA	T media Anual	T mes más frío	T mes más caliente	Humedad (P/T)	
(A)C(w0)	Semicálido subhúmedo	> 18°C	< 18°C	> 22° C	Menos húmedo (<43.2)
BS1hw	Semiárido semicálido	> 18°C	< 18°C	> 22° C	Semiseco (>22.9)
BS1kw	Semiárido templado	12 – 18°C	-3 – 18°C	< 22° C	Semiseco (>22.9)
BSohw	Árido semicálido	18 – 22°C	< 18°C	> 22° C	Seco (<22.9)
BSokw	Árido templado	12 – 18°C	-3 – 18°C	< 22° C	Seco (<22.9)
C(w2)	Templado subhúmedo	12 – 18°C	-3 – 18°C	< 22° C	Más húmedo (>55)
C(w1)	Templado subhúmedo	12 – 18°C	-3 – 18°C	< 22° C	Humedad media (43.2-55)
C(w0)	Templado subhúmedo	12 – 18°C	-3 – 18°C	< 22° C	Menos húmedo (<43.2)

2.1.3. Geomorfología

En México, el estudio de aspectos geomorfológicos inició con la delimitación de provincias fisiográficas; algunos trabajos señalados y que sobresalen de la publicación de Lugo (1990) son: Ordoñez (1936, 1942), Tamayo (1941), Raisz (1959), Álvarez (1961), de Cserna (1961), Alcorta (1964), Guerra-Peña (1976), López-Ramos (1979) y Quiñones (1987). De acuerdo con el INEGI (1997), una provincia fisiográfica corresponde con regiones cuyo origen geológico es el mismo, paisaje y tipo de rocas semejantes en la mayor parte de su extensión, por lo que presentan geoformas similares. Recientemente, el Instituto de Geografía publicó la regionalización geomorfológica en el nuevo Atlas Nacional de México (Lugo y Córdova, 2007) con algunas modificaciones de aquellas regiones fisiográficas definidas anteriormente por Lugo (1990).

En la presente investigación se trabaja con la cartografía de "Provincias Fisiográficas de México" de Cervantes-Zamora *et al.* (1990), la cual es ampliamente conocida y usada en el país a pesar que el término fisiografía está en decadencia. Más aspectos históricos y críticos relacionados con el término fisiografía se puede consultar en Lugo y Córdova (1992). El área de estudio incorpora porciones de tres provincias fisiográficas: 1) Sierra Madre Occidental (SMOc), 2) Sierra Madre Oriental (SMOr) y 3) Mesa Central, siendo esta última la que tiene mayor presencia en el área (ver figura 2.4).

- Mesa Central (MC)

La MC es una depresión intermontana que fue rellenada en el Neógeno-Cuaternario por material de acarreo y acumulaciones volcánicas que se produjeron desde el Oligoceno, asimismo se cree que hubo un probable hundimiento que junto con el avance de las divisorias de la Sierra Madre Occidental hacia el este produjo la disminución de la superficie de las cuencas fluviales de la MC (Lugo, 1990). El relieve de la margen oeste de la provincia consiste de valles anchos controlados por fallas, orientados al norte, como el valle sepultado de Aguascalientes (Mitre-Salazar *et al.*, 1989; citado por Lugo, 1990).

De acuerdo con Nieto-Samaniego *et al.* (2005), se reconocen dos regiones en la MC limitadas por un gran lineamiento con rumbo NW, reportado como un sistema de fallas normales de edad Cenozoica, éstas son: *i) la región sur*, que corresponde con una meseta elevada cuya cota promedio es mayor que aquellas de las sierras Madre Oriental y Occidental, por lo que es relativamente más alta que las regiones circundantes, a su vez, presenta un activo estado de erosión que le atribuye desniveles pronunciados, con un relieve montañoso por encima de los 2,000 m snm (excepto por el denominado valle de Aguascalientes); *ii) la región norte*, de mayor extensión comparativamente, presenta desniveles menores y cotas más bajas, por debajo de los 2,000 m snm hacia la parte más septentrional, muestra un estado de erosión más avanzado con grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluvial y lacustre, algunas de ellas de tipo endorreico; constituye una zona relativamente plana y baja, más plana que las sierras que la limitan, por lo que se aprecia como una meseta elevada pero relativamente más baja que su contorno.

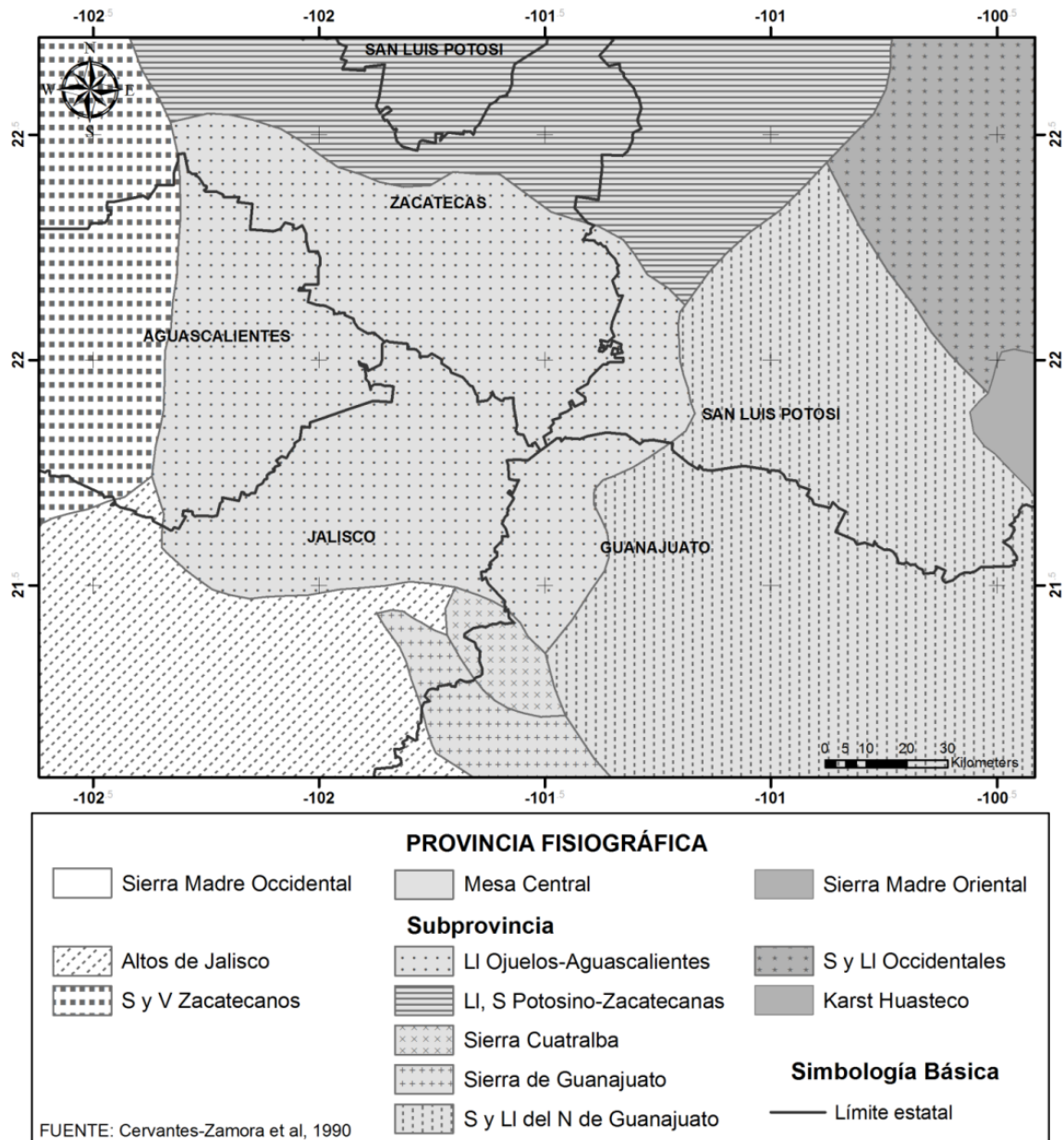


Figura 2.4. Provincias fisiográficas en el área de estudio

Según Cervantes-Zamora *et al.* (1990), la MC se encuentra constituida por cuatro subprovincias y dos discontinuidades, éstas son de norte a sur: 1) Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande, 2) Llanuras y Sierras Potosinas-Zacatecanas, 3) Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes, 4) Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato, 5) Sierra de la Cuatralba y 6) Valles Paralelos del Suroeste de la Sierra de Guanajuato (figura 2.4). A continuación se describen aquellas subprovincias presentes en el área de estudio.

Llanuras y Sierras Potosinas-Zacatecanas

Se caracteriza por los extensos terrenos áridos con lomerío en el noreste (Sierra de Fresnillo, más al NW del área de estudio) y sus sierras bajas en el sureste. Otros lomeríos

quedan dispersos entre las zonas planas. En el suroeste se encuentran dos llanuras aluviales con cierta extensión, pero la gran llanura desértica zacatecana-potosina, a unos 2000 msnm., es la que domina el oeste de la sub-provincia. Al noroeste de la ciudad de San Luis Potosí está ubicado un conjunto de sierras constituidas por rocas sedimentarias marinas y continentales, asociadas predominantemente con mesetas lávicas. La cumbre más elevada se encuentra en la sierra El Mastrante, con 2,590 m snm. Casi la totalidad del área restante está integrada por extensas bajadas, que tienen altitudes aproximadas a 2,000 m. y están escasamente interrumpidas por otras topofomas.

Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes

Se caracteriza por sus extensas llanuras con piso de caliche y cubierta aluvial muy somera, que tienen 2,000 m de altitud, aproximadamente. Las Sierras Bajas y los Lomeríos probablemente se derivaron de la erosión de mesetas con Cañadas que se encuentran entre las llanuras. Hay dos llanuras, la de Ojuelos y la de Aguascalientes, esta última ubicada al este de la ciudad del mismo nombre. Se comunican en el norte, pero quedan separadas en la mayor parte de su extensión por un grupo de mesetas muy disectadas, y con altitud aproximada a 2,300 m, en las que dominan rocas ígneas ácidas, ricas en sílice.

Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato

Esta sub-provincia constituida por llanuras angostas entre sierras volcánicas, en algunas zonas asociadas con mesetas. Según la Comisión Nacional del Agua de Guanajuato (2000) la altitud de las diferentes topofomas que se presentan es de 1,600 a 3,000 m snm para las sierras altas con mesetas; 2,200 a 2,400 m snm para las pequeñas sierras escarpadas; 1,600 a 1,800 m snm para las sierras bajas; 2,000 a 2,400 m snm para las mesetas lávicas; 2,100 y 2,200 m snm para las llanuras aluviales, y por último, las planicies presentan una elevación general de 1,900 m snm. El INEGI (1991; citado por González 2003) señala que en la zona de los Altos de Guanajuato, las sierras son más frecuentes y las planicies menos extensas que aquellas de la sub-provincia Llanuras de Ojuelos.

En cuanto a las dos discontinuidades fisiográficas, la sierra de Guanajuato presenta una serie de valles paralelos orientados al sudeste y la sierra Cuatralba se encuentra constituida por mesetas de lava escalonadas (INEGI 1991; citado por González 2003).

- Sierra Madre Occidental (SMOc)

La SMOc se caracteriza por un altiplano cuya elevación promedio es de más de 2,000 m snm. Se considera que la SMOc es el resultado de diferentes episodios magmáticos y tectónicos durante el Cretácico-Cenozoico, asociados con la subducción de la placa Farallón debajo de la placa de Norteamérica y a la apertura del Golfo de California, por lo que es una de las provincias ígneas silíceas más grandes del mundo y la más grande del Cenozoico (Ferrari *et al.*, 2005).

Sierras y Valles Zacatecanos

Esta unidad está constituida por sierras altas que frecuentemente culminan en mesetas, las cuales se encuentran alargadas en sentido N-S e igualmente alternando con los denominados *valles*, es decir, geomorfológicamente planicies. Normalmente se presentan

terrazas y lomeríos que son probables productos de la erosión de antiguos pisos de la planicie más altos que el actual.

Altos de Jalisco

Esta sub-provincia está compuesta por una sierra de cumbres escarpadas, lomeríos altos y amplias mesetas de lava; presenta la mayor densidad de topoformas degradativas, generadas por disección hídrica y abundancia de valles profundos de laderas escarpadas hacia las zonas limítrofes de la Sierra Madre Occidental.

- Sierra Madre Oriental (SMOr)

Esta provincia es un conjunto de sierras menores de estratos plegados, que se extiende paralelo a la Costa del Golfo de México, desde la frontera norte del país hasta sus límites con el CVTM. La sierra está constituida principalmente por rocas sedimentarias marinas (cretácicas y del Jurásico Superior), entre las que predomina la caliza, y en menor proporción arenisca y lutita. Las cimas de la SMOr presentan altitudes entre los 2,000 y 3,000 m, pero su parte más elevada, entre Saltillo y Ciudad Victoria (Tamaulipas), alcanza altura superior a 3,000 m snm.

Karst Huasteco

En esta sub-provincia predominan rocas calizas, las cuales originan rasgos de karst (pozo, dolina y gruta) como resultado de su disolución por el agua subterránea; sin embargo, se presentan en menor cantidad rocas sedimentarias de tipo continental. Esta unidad corresponde con una de las regiones kársticas más extensas del país, constituida principalmente por sierras y algunos cañones, valles y llanuras.

Sierras y Llanuras Occidentales

Como su nombre lo indica, esta sub-provincia se constituye predominantemente por llanuras y sierras; éstas últimas presentan una orientación N-S, se componen principalmente por caliza y generalmente se encuentran unidas entre sí por cerros menores.

UNIDADES DE RELIEVE

En cuanto a la configuración del relieve, se aprecia cierta concordancia con el modelo de unidades de relieve en zonas áridas definido por Zuidam (1985; figura 2.5b). Con ayuda de imágenes de satélite, curvas topográficas y el relieve sombreado obtenido a partir del modelo digital de elevación (figura 2.5a), se diferencian tres unidades básicas para el área de estudio: 1) lomerío y cerro, 2) piedemonte, y 3) planicie, en ocasiones con cuerpos de agua salina o como el caso de la región de El Tule (figura 2.5c) que corresponde con una planicie lacustre salina, la cual anteriormente se relacionaba con un lago de agua asociada posiblemente con flujos de agua subterránea de tipo local e intermedio. La tabla 2.2 exhibe de manera muy general la posible correspondencia entre el relieve del área de estudio y el modelo de Zuidam (1985) para zonas áridas.

Tabla 2.2. Comparación de unidades del modelo de relieve en zonas áridas y aquellas presentes en el área de estudio

Modelo Zuidam (1985)	Área de estudio
Sierra	Lomerío, cerro
Abanico aluvial	Piedemonte
Fondo de cuenca	Planicie

2.1.4. Hidrología superficial

REGIONES HIDROLÓGICAS

El territorio mexicano está dividido en trece Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) de acuerdo con la delimitación de cuencas realizada por la CONAGUA (2010), constituidas por municipios completos para así facilitar la integración de la información socioeconómica.

El área de estudio se localiza dentro de las RHA: *VII Cuencas Centrales del Norte, VIII Lerma-Santiago-Pacífico y IX Golfo Norte*. A su vez, las RHA se dividen en diferentes regiones hidrológicas (RH) de las cuales, partes de las RH *12 Lerma-Santiago, 26 Río Panuco y 37 El Salado* incorporan el área de estudio (ver figura 2.6). Por último, la CNA realiza una subdivisión más de las regiones hidrológicas en lo que denominan "cuencas hidrológicas"¹. Por su parte, Maderey y Torres-Ruata (1990) publicaron otra clasificación de cuencas hidrológicas sensiblemente diferente de aquella de CNA, por lo que se incluye en este estudio para comparar la utilidad de ambas clasificaciones.

En la tabla 2.3 se señala las regiones hidrológicas y diferentes cuencas que incorporan el área de estudio de acuerdo con tales clasificaciones.

Tabla 2.3. Regiones hidrológicas y cuencas hidrológicas en el área de estudio

RHA	RH	CUENCAS HIDROLÓGICAS	
		CNA	IGg
VII. Cuencas Centrales del Norte	37. El Salado	152. San Luis Potosí	132. Laguna Ahorcados
		153. Presa San José-Los Pilares	
		154. Fresnillos-Yesca	
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	12. Lerma-Santiago	41. Río Verde Grande	31. Río Lerma
		45. Río Juchipila	
		48. Río Lerma-Salamanca	
		50. Río Laja	
IX. Golfo Norte	26. Río Panuco	111. Río Tamuín	81. Río Panuco

¹ Cabe resaltar que el concepto "cuenca hidrológica" que emplea tanto la CONAGUA como el Instituto de Geografía hace referencia a límites administrativos, sin embargo, a esa delimitación debe incorporarse el flujo subterráneo (el cual constituye más del 90% desagua en cuestión) para que la delimitación sea representativa.

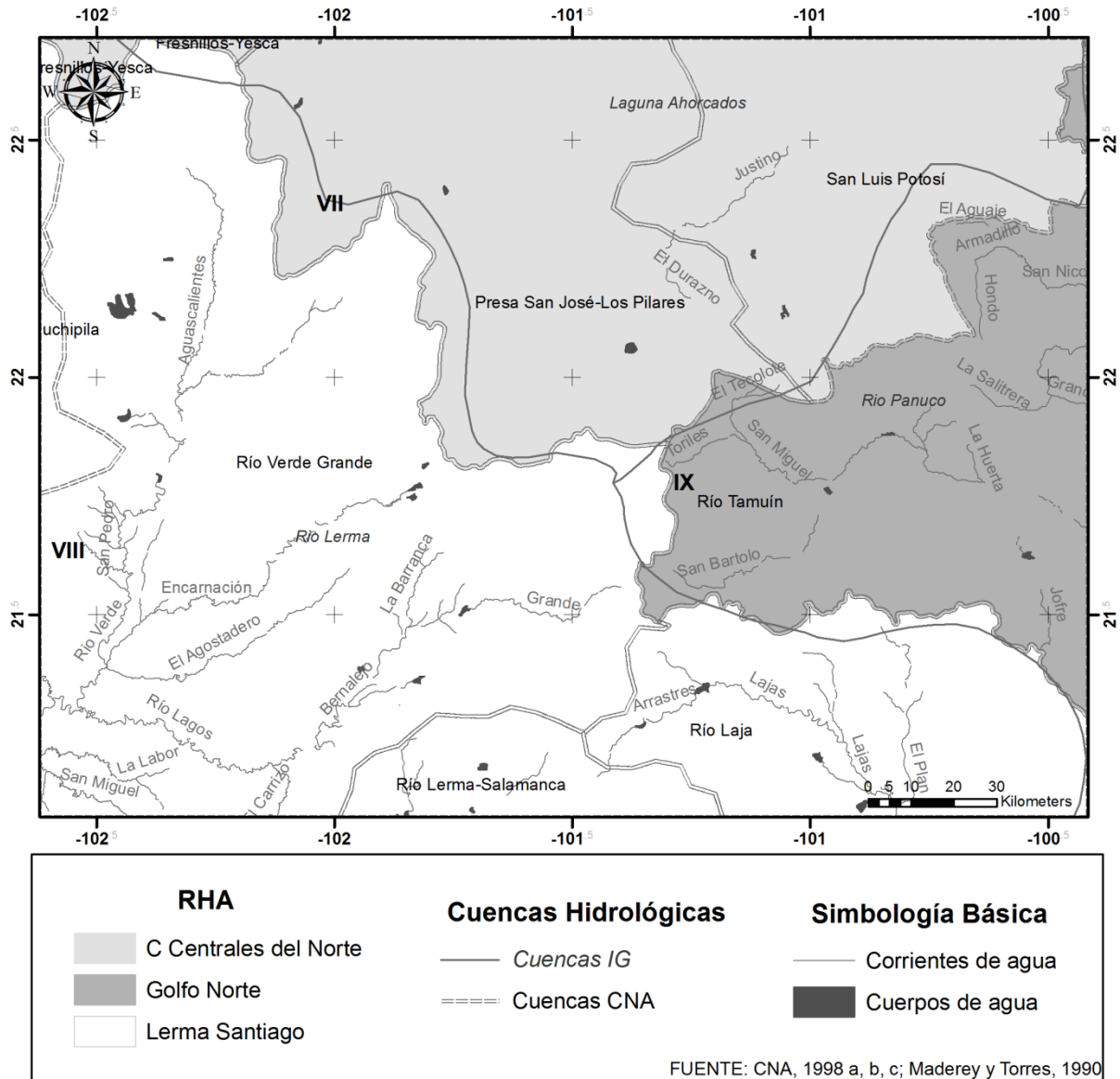


Figura 2.6. Regiones y cuencas hidrológicas en el área de estudio

CORRIENTES SUPERFICIALES

A pesar del clima semiárido que prevalece en el área de estudio existen diversos escurrimientos superficiales pero en su mayoría son de tipo intermitente. El número de corrientes es limitado y su caudal es bajo. Los principales ríos que se presentan en el área son el río Aguascalientes o San Pedro, Río Verde, Lajas y Encarnación (ver figura 2.6).

- Río Aguascalientes o San Pedro

Ésta es la corriente superficial más importante del estado de Aguascalientes, nace en la zona de Ojo Caliente, ZAC (SARH, 1987); ingresa a la entidad por su lado norte con una dirección casi N-S, se alimenta de diversos afluentes intermitentes y continúa su recorrido hacia el sur hasta unirse al Río Verde cerca de Teocaltiche (Gómez, 2000). Cabe resaltar

que es un río intermitente que aún antes de la construcción de presas y bordos se secaba por completo durante el estiaje (Gómez, 2000), su agua se aprovecha para riego agrícola.

- Río Verde

Este río es la principal afluente del río Grande de Santiago, corre en dirección noreste a sureste, avenando una superficie de 20,500 km², se constituye por los ríos San Pedro o Aguascalientes, Encarnación, El Salto, Jalostotitlán, Logos y sus afluentes (INAFED, 2005a). Es una corriente de tipo perenne cuyo principal uso es el público urbano de la zona Metropolitana de Guadalajara (Congreso del Estado de Jalisco, 1997).

- Río Lajas

Este río nace a unos 2,950 m snm en el Cerro de San Juan localizado a unos 22 km al noreste de la ciudad de León. Es uno de los afluentes más importantes del Río Lerma cuyo recorrido máximo a lo largo de su colector principal es de 250 km (Protección civil de Guanajuato, fecha de publicación desconocida)

- Río Encarnación

Este río es afluente del Río Verde, es de tipo intermitente, nace al noreste del municipio de Encarnación de Díaz con el nombre de río Los Sauces. El agua de este río alimenta las presas La Cascarona y San Pedro aguas abajo (INAFED, 2005b).

El estado de San Luis Potosí cuenta con gran riqueza hídrica, que se manifiesta especialmente hacia la región Huasteca y parte de la región media, con la presencia de largos ríos (río Santa María, Moctezuma), manantiales (Media Luna, Los Chorros, Taninul, etc) y cascadas (Tamul y Micos). La porción del estado que se incorpora en el área de estudio presenta algunos arroyos de importancia como el de San Miguel, Hondo, El Durazno y Justino, entre otros. Por su parte, Zacatecas carece de ríos importantes; los que hay, en su mayor parte son temporales que se forman al escurrir el agua de las montañas en la época de lluvias (INAFED, 2009). Existen unos treinta lagos en el estado, todos en peligro de desaparecer por el constante cambio de uso del suelo para tierra de cultivo (Padilla, 2010), no obstante, la calidad del agua de diversos de estos lagos no es adecuada para el consumo humano, por esto y lo antes descrito, los poblados asociados con la presencia de lagos dependen en gran medida de la extracción de agua subterránea por medio de pozos y algunas presas cuyo suministro es común a diversas poblaciones en toda el área de estudio.

2.1.5. Suelo y Vegetación

- Tipo de suelo

En el área de estudio se presentan veintidós subgrupos diferentes de suelo pertenecientes a once grupos (figura 2.7) según el mapa de edafología a escala nacional del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (INIFAP y CONABIO, 2005), de los cuales se muestran los principales en la tabla 2.4. Dicho mapa se basa en la clasificación de suelos FAO-UNESCO y se obtuvo a partir de unir treinta y dos coberturas (17 a escala 1:250,000 y 15 a 1:1'000,000), por lo que se considera una escala adecuada de trabajo teniendo en cuenta las dimensiones del área de estudio de esta investigación.

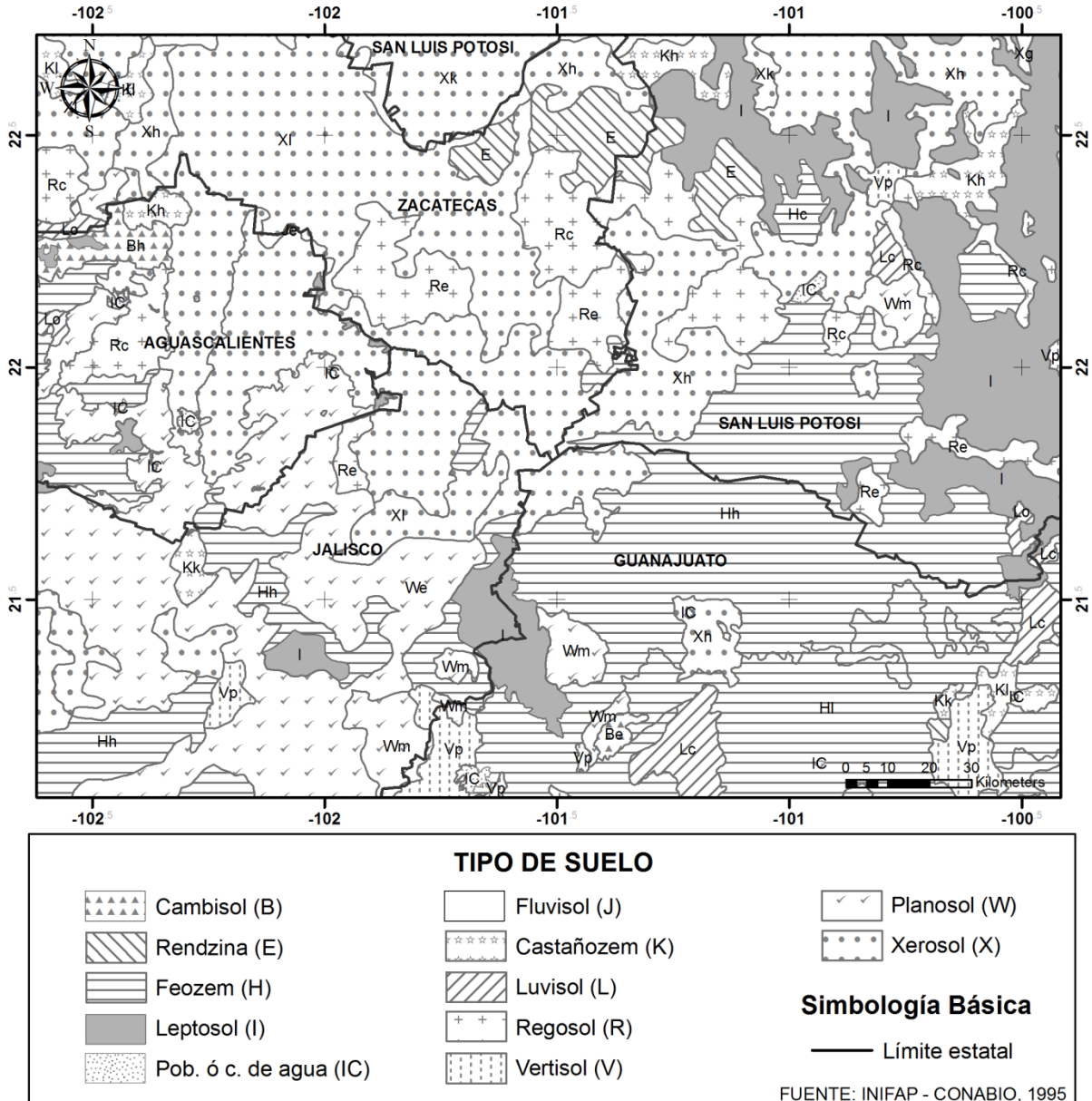


Figura 2.7. Tipo de suelo presente en el área de estudio

A continuación se describe las principales características de los grupos de suelo más representativos del área de estudio con base en información del INEGI (2004), especialmente.

Xerosol

Este grupo de suelo predomina en el área de estudio localizándose primordialmente al norte y noroeste de la misma. Su nombre proviene del griego y significa "suelo seco". Este grupo de suelo se encuentra asociado con climas árido y semiárido, vegetación natural tipo matorral y pastizal. Se caracteriza por presentar una capa superficial de color claro y muy pobre en humus, le supra-yace un subsuelo rico en arcilla o semejante a dicha capa. Muchas veces presenta a cierta profundidad manchas, polvo, aglomeraciones de cal,

cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza, asimismo, en ocasiones es salino. El Xerosol es un suelo con baja susceptibilidad a la erosión, excepto en los casos que se localizan sobre pendientes, caliche o tepetate. Su principal subgrupo en el área de estudio es el *Xerosol lúvico*, el cual presenta acumulación de arcilla en el subsuelo, es un suelo generalmente rojizo o pardo oscuro y en muchas ocasiones es capaz de almacenar más agua que el suelo de otros subgrupos.

Tabla 2.4. Principales grupos y subgrupos de suelo presentes en el área de estudio

CLAVE	GRUPO	%	SUBGRUPO	%	
X	Xerosol	31.12	Xh	Xerosol haplico	16.8
			Xl	Xerosol lúvico	11.75
			Xk	Xerosol cálcico	2.5
H	Feozem	27.04	Hh	Feozem haplico	21.27
			Hi	Feozem lúvico	5.42
			Hc	Feozem calcárico	0.35
W	Planosol	14.4	We	Planosol eútrico	12.15
			Wm	Planosol Molico	1.99
I	Leptosol	10.63	I	Leptosol	10.63
R	Regosol	7.64	Rc	Regosol calcárico	4.88
			Re	Regosol eútrico	2.76

Feozem

Este suelo se ubica en el sur y sureste del área de estudio, especialmente en los estados de Guanajuato y San Luis Potosí. Su nombre significa "tierra parda". Es un suelo que se puede presentar en casi cualquier tipo de relieve y clima, con excepción de zonas tropicales lluviosas o muy desérticas. Se caracteriza por presentar un horizonte superficial oscuro y rico en humus, su profundidad es variable. En el área de estudio sobresale el subgrupo *Feozem haplico*, el cual presenta alto contenido de carbono orgánico y muy baja proporción de bases, por lo que carece de horizontes cálcico, gípsico, propiedades gleicas y sálicas (FAO-UNESCO, 1989; citado por Arriaga *et al.*, 2000).

Planosol

El nombre de este suelo deriva del latín y significa "plano, llano". En el área de estudio se presentan hacia el suroeste especialmente en el estado de Jalisco. Se desarrollan en relieves planos que sufren de inundación en alguna parte del año, son medianamente profundos en su mayoría (50-100 cm) asociados principalmente con climas templado y semiárido, vegetación natural del tipo pastizal o matorral. Se caracterizan por presentar una capa infértil y relativamente delgada de un material claro que generalmente es menos arcilloso que las capas que la supra y subyace. Bajo esta capa se tiene un subsuelo muy arcilloso, o bien, roca o tepetate que le atribuye propiedades de muy baja permeabilidad. Este suelo es muy susceptible a la erosión, especialmente en las capas superficiales. El *Planosol eútrico* es el subgrupo que predomina en el área de estudio, éstos son suelos ligeramente ácidos a alcalinos.

Leptosol (anteriormente Litosol)

Su nombre hace referencia a "suelo de piedra" y se localiza principalmente hacia el este del área de estudio, en el estado de San Luis Potosí. Este grupo de suelo se asocia con todos los climas y muy diversos tipo de vegetación, en todas las sierras del territorio

nacional, barrancas, lomeríos y con algunos terrenos planos. El leptosol es suelo muy somero (generalmente menor de 10 cm y condicionado por la pendiente) sobre roca dura o una capa cementada, extremadamente gravosos y/o pedregosos. Este tipo de suelo no presenta subgrupos por definición.

Regosol

Este grupo predomina en la parte central-norte del área de estudio. Su nombre significa "manto, cobija o capa de material suelto que cubre a la roca". Corresponde a suelo poco desarrollado, frecuentemente somero, en material no consolidado y por ello no presenta capas muy diferenciadas entre sí. Son extensos en terreno erosionado, particularmente en regiones árida y semiárida, en muy diverso tipo de vegetación y relieve. En general son de matiz claro o pobres en materia orgánica, pareciéndose a la roca madre. En el área predomina el subgrupo *Regosol calcárico* lo que significa que es un suelo rico en cal y nutrientes para las plantas.

En menor proporción se encuentran en el área de estudio los grupos de suelo siguientes:

Cambisol

El nombre de este suelo proviene del latín *cambiare*, que significa cambiar, es decir, "suelo que cambia". Este grupo corresponde con un suelo joven, poco desarrollado, se puede encontrar asociado con cualquier tipo de vegetación o clima exceptuando las zonas áridas. Este tipo de suelo es muy abundante en el territorio nacional, se caracteriza por presentar una capa con terrones con vestigios del tipo de roca subyacente, asimismo, puede presentar pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso.

Rendzina

Grupo de suelo cuyo nombre descende del polaco *rzedic* que significa ruido. Esta denominación hace referencia al ruido que se produce en este suelo con las actividades de arado debido a su pedregosidad. Este suelo es somero, poco evolucionado, presenta una capa superficial abundante en materia orgánica que descansa sobre una roca madre carbonatada, como la caliza. Este grupo se encuentra en climas semiáridos, tropicales o templados y son moderadamente susceptibles a la erosión.

Fluvisol

El nombre de este suelo es de origen latín (*fluvius*) que significa "suelo de río", se caracteriza por estar constituido por material acarreado por el agua, es decir, presentan capas de arena alternadas con grava redondeada. Estos suelos son poco desarrollados, medianamente profundos, se encuentran en todos los climas y regiones de México cercanas a lechos de río, por lo que los ahuehuetes, ceibas y sauces son especies vegetales típicas que se desarrollan sobre este tipo de suelo.

Castañozem

Este grupo significa "tierra castaña", nombre que viene del latín *castaneo*: castaña y del ruso *zemljá*: tierra. El Castañozem corresponde con un suelo alcalino que frecuentemente supera el 0.7 m de profundidad, presenta una capa superior de color pardo o rojizo oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes, con acumulación de caliche que se puede encontrar suelto o ligeramente cementado en el subsuelo. Este tipo de suelo se encuentra

en zonas semiáridas o de transición hacia clima más lluvioso y es moderadamente susceptible a la erosión.

Luvisol

Este grupo corresponde con un suelo que presenta acumulación de arcilla, su nombre proviene del latín *luvi*, *luo* que significa lavar. Este suelo es con frecuencia rojo o amarillento aunque pueden tener coloración parda sin llegar a ser oscura, se encuentra en zonas con clima templado a tropical lluvioso aunque en algunas ocasiones puede encontrarse en clima más seco como en los Altos de Jalisco, en el área de estudio. El luvisol usualmente se encuentra asociado con vegetación de bosque o selva, sin embargo, presentan una alta susceptibilidad a la erosión.

Vertisol

El nombre de este grupo es de origen latín, *vertere* que significa voltear, por lo que hace alusión a un suelo que se revuelve o que se voltea. La principal característica de este suelo es su estructura masiva y alto contenido de arcilla, la cual es expandible en agua formando superficies de deslizamiento llamadas facetas que se pueden colapsar en seco y formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. Este tipo de suelo se encuentra en climas templado y cálido, en especial en aquellas zonas que presentan una marcada estación seca y otra lluviosa. La coloración del vertisol puede ser negro, gris oscuro y café rojizo, son suelos muy fértiles pero difíciles de labrar debido a su dureza, son de baja susceptibilidad a la erosión pero con alto riesgo de salinización.

- Vegetación y uso del suelo

Uno de los aspectos que generan mayor impacto sobre el ambiente es el cambio de uso de suelo, las condiciones naturales sobre la superficie se modifican drásticamente, en especial cuando se realiza el uso del terreno para agricultura, minería o urbanización. La dinámica original del sistema se altera dejando de formarse diversos procesos que permitían el equilibrio del suelo. Maass (1995) señala que la transformación de la cobertura vegetal original a terreno de cultivo "*causa pérdidas a veces irremediables de biodiversidad, alteran las propiedades físicas del suelo y los procesos hidrológicos a que está sometido ocasionando erosión y cambio en la productividad de los organismos del suelo*".

Adicionalmente se ocasiona la formación de microclimas, contaminación de suelo, agua y ecosistemas; entre otros. Esta creciente situación ha aumentado la pobreza, desarraigo y en muchos casos la migración a ciudades o al extranjero (Maass, 1995), llevando a su vez más presión a las ciudades por querer surtir de servicios básicos a una población sin considerar el límite al que pueden presionarse los elementos naturales.

De acuerdo con el mapa de uso del suelo y vegetación de la CONABIO (1999; ver figura 2.8), el paisaje del área de estudio se encuentra ampliamente modificado debido a las actividades agrícola, pecuaria y forestal (42.3%, figura 2.9). La vegetación que predomina es el pastizal natural (25.4%), seguido por matorral (19.7%), del cual se presentan cuatro subgrupos, éstos son en orden de abundancia: Matorral sarcocrasicaule (10.9%), Matorral desértico micrófilo (4.5%), Matorral espinoso tamaulipeco, submontano y subtropical

(2.7%) y Matorral rosetófilo (1.6%). Asimismo, se presenta en menor porcentaje bosque de encino (6.3%) y pino (2.3%). Por último, existe vegetación tipo Chaparral, Mezquital-Huizachal, bosque de coníferas distintas a Pinus y vegetación halófila y gipsófila, todas ellas en porcentaje bajo cuya suma es menos del 5%.

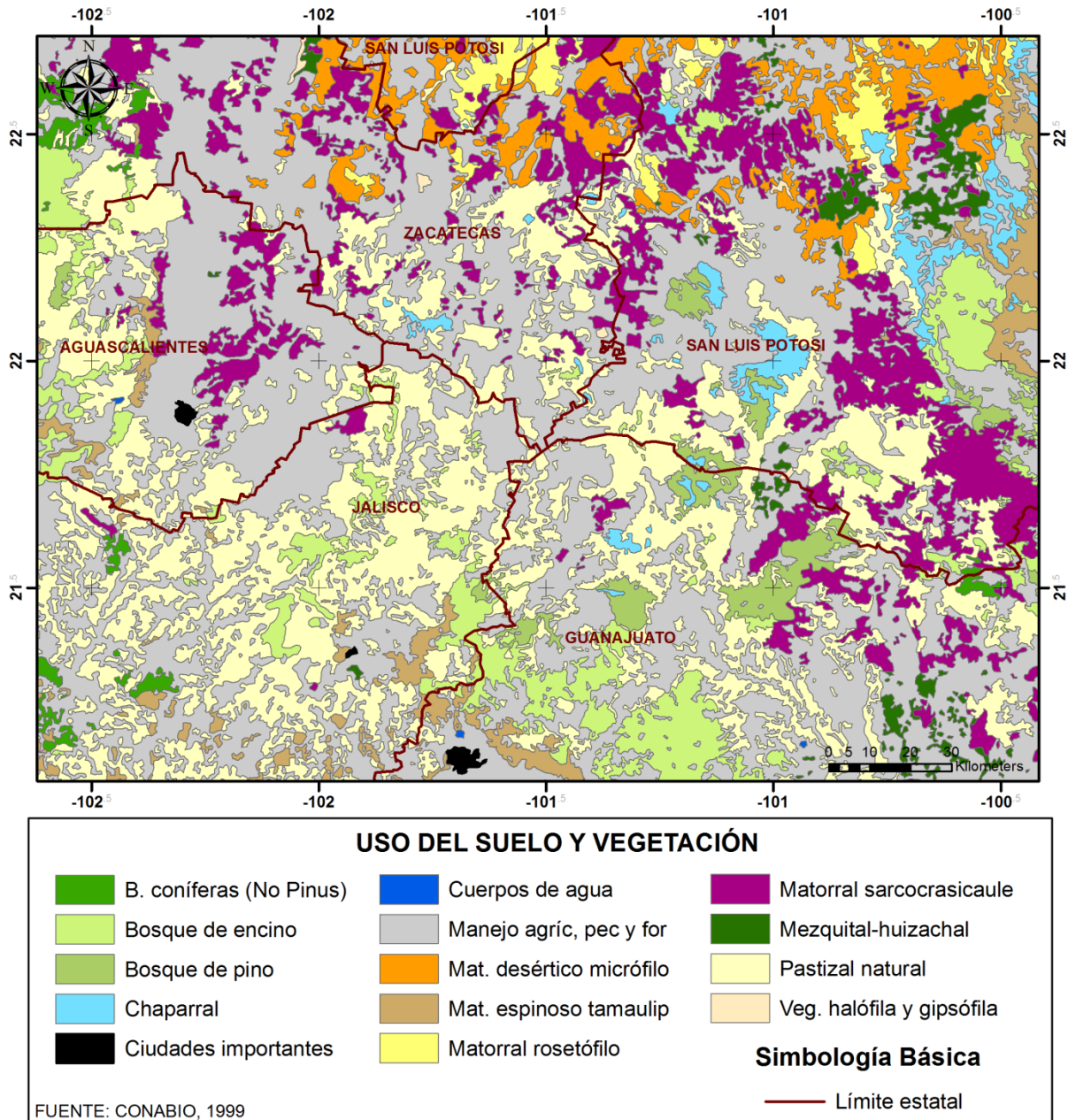


Figura 2.8. Uso de suelo y vegetación en el área de estudio

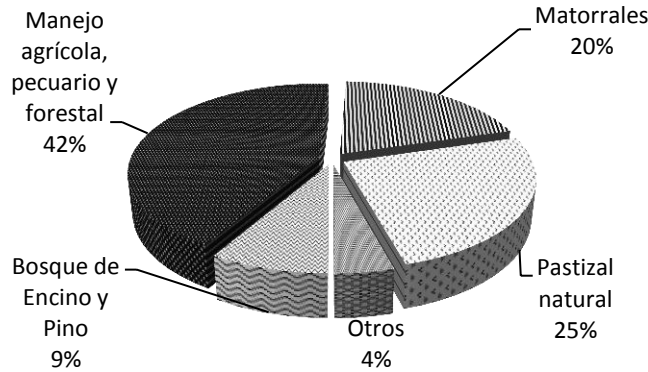


Figura 2.9. Cantidades porcentuales de uso del suelo y vegetación en el área de estudio

2.2. Referente geológico

El área de estudio se localiza en la parte central de México, en la Provincia Fisiográfica Mesa Central (MC) cuyo límite está formado por: *i*) al norte y este con la Sierra Madre Oriental (SMOr), cadena montañosa originada por la deformación contractiva de la orogenia Laramide (Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000; citado por Nieto-Samaniego *et al.*, 2005), compuesta principalmente por sedimentos plegados del Mesozoico (Cardona, 2007); *ii*) al oeste con la Sierra Madre Occidental (SMOc), cadena montañosa de origen volcánico (Terciario Medio) de composición predominante de rocas félsicas y calco-alcalinas (Cardona, 2007); y al sur con el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), región volcánica constituida por efusiones de lava y piroclasto del Terciario al Reciente. Tal configuración le atribuye las características existentes de la provincia MC donde se aprecian elevaciones tanto plegadas como de riolita que corresponden con las sierras madre ubicadas al norte, este y oeste; como a los volcanes, lavas y piroclastos del CVTM.

La MC se caracteriza por un origen complejo influenciado por procesos del Neógeno-Cuaternario que incluyen: plegamiento, tectónica de bloques, derrames volcánicos de tipo fisural y central, erosión en montañas y acumulación en depresiones. Por su lado, el desarrollo de cuencas endorreicas con planicie aluvial y lacustre ha sido favorecida por la neotectónica y las condiciones climáticas de fines del Pleistoceno (Lugo, 1990).

2.2.1. Estratigrafía general

El área de estudio consiste, de manera general, de un conjunto de fosas tectónicas (fosas de Aguascalientes, Villa de Reyes, Villa Arista, entre otras) que facilitó en ellas el depósito de hasta 600 m de material granular como en la Cuenca de San Luis Potosí (Cardona, 2007), manifestándose en superficie como extensas planicies. Anderson *et al.* (1988) señalan que el grosor típico del material granular en las Cuencas Centrales Aluviales es de 2,000 a 3,000 m aunque algunas pueden tener un espesor menor a 300 m. En general, en el área de estudio se presentan rocas de tipo sedimentario y volcánico, aflorando las primeras con preferencia al este y las segundas hacia el oeste de la misma (figura 2.10).

El referente geológico descrito a continuación se basa principalmente en la información del Servicio Geológico Mexicano (SGM), cartas geológico-minera a escala 1:250 000: F14-4 San Luis Potosí, F14-7 Guanajuato, F13-6 Zacatecas y F13-9 Aguascalientes, así como de

informes correspondientes con las cartas de Aguascalientes y San Luis Potosí. Por lo que las referencias que se señalan en el texto fueron tomadas de estas cartas geológicas, así, no se considera necesario incorporar después de cada referencia la frase "citado por...".

El SGM establece la existencia de tres ambientes geológicos hacia el centro-norte del área de estudio (Carta F14-4): *i*) la Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM), *ii*) el Terreno Guerrero (TG) y *iii*) la Plataforma de Valles-San Luis Potosí (PV-SLP). Para el centro-sur del área de estudio establecen dos secuencias (Carta F14-7): *i*) una vulcano-sedimentaria que pertenece a un arco volcánico (VS) y *ii*) una sedimentaria de plataforma que localizada más este (PI) (ver figura 2.10). Para las regiones de Aguascalientes y Zacatecas incorporadas dentro de las cartas geológicas F13-9 y F13-6, respectivamente, su descripción se realizará usando tales nombres. La figura 2.11 muestra las columnas estratigráficas para los diferentes ambientes geológicos presentes en el área de estudio.

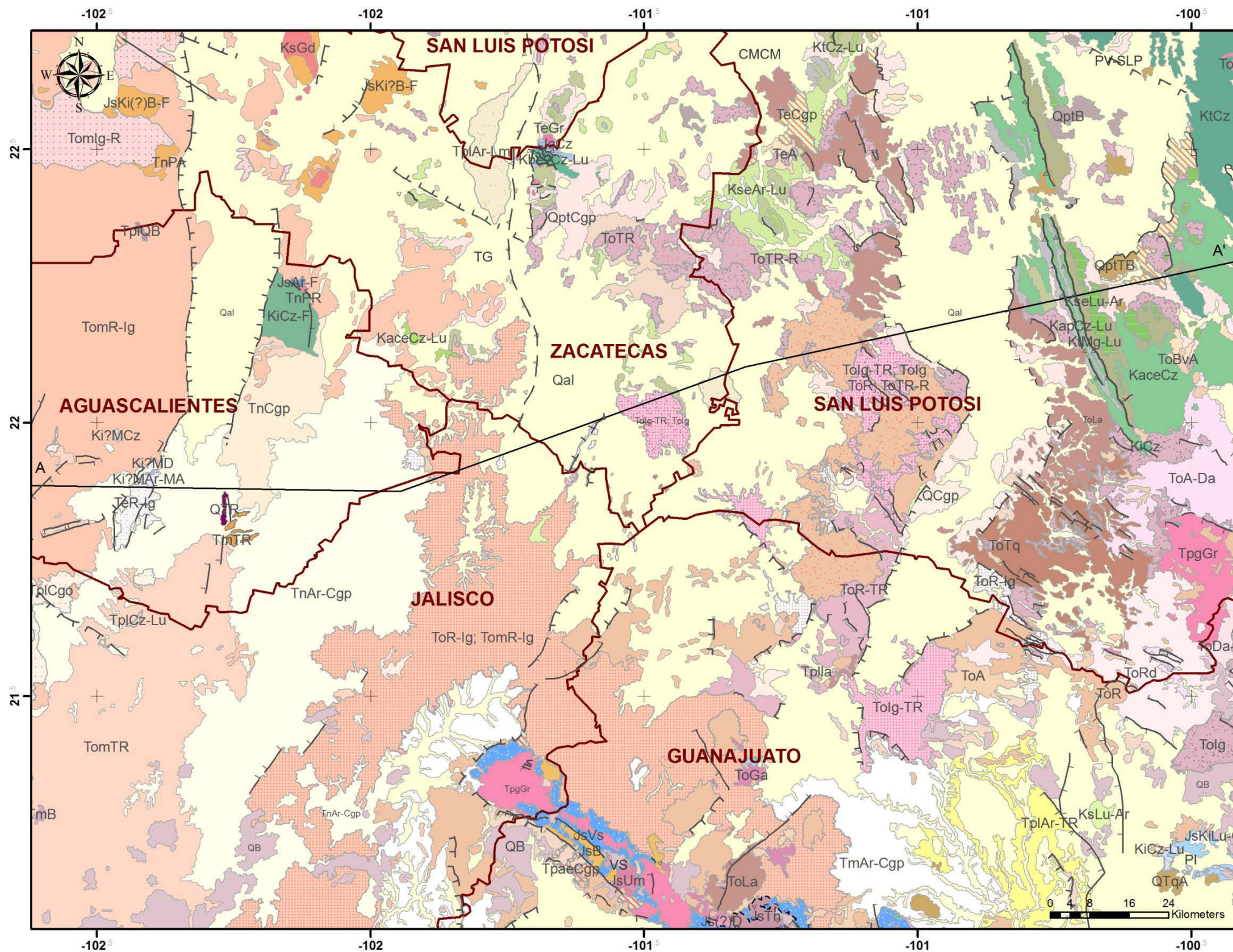
Cartografía geológica existente (Servicio Geológico Mexicano-SGM, 1997a, b, 1998a, b) identifica las rocas más antiguas en la Cuenca Mesozoica del Centro con una secuencia de esquistos y filitas del Triásico Superior (Cárnico Inferior; TRsE-F) cuyo único afloramiento en el área se encuentra en la Sierra Salinas, cerca de la localidad Guadalupe Victoria.

Jurásico

En el arco volcánico (VS) se tienen rocas del Jurásico Superior de tipo ultramáfica (JsUm), basalto (JsB), diorita (Js?D) y tonalita (JsTn), las cuales afloran especialmente hacia el sur del área de estudio (Sierra de Guanajuato). En contacto discordante a estas unidades alóctonas se tiene la unidad vulcano-sedimentaria (JsVs), conocida como Formación La Esperanza (Echegoyén *et al.*, 1970), la cual está compuesta por lutita, limolita, arenisca, pedernal y caliza micrítica con metamorfismo incipiente.

Las rocas sedimentarias de este período corresponden con dos secuencias calcáreas que afloran en la CMCM hacia la Sierra Salinas (norte del área de estudio), la más antigua corresponde con la Formación Zuloaga (JoCz), depositada en un ambiente marino nerítico de agua tranquila, de edad Oxfordiano-Kimmeridgiano, y la otra denominada Formación La Caja (JktLm-Cz) de edad Kimmeridgiano-Tithoniano, se encuentra sobre-yaciendo concordantemente la secuencia anterior y proviene de un ambiente de escasa energía.

En el denominado Terreno Guerrero (porción noroeste del área de estudio), las rocas están constituidas por una secuencia de metabasalto y filita muy deformada, coladas de lava masiva almohadillada de composición basáltica-andesítica intercaladas con roca sedimentaria, vulcano-clástica y calcárea, metamorfozadas en facies de esquistos verde, conocida como Formación Chilitos (JsKi?B-F, carta F14-4 y JsKi(?)B-F, carta F13-6).

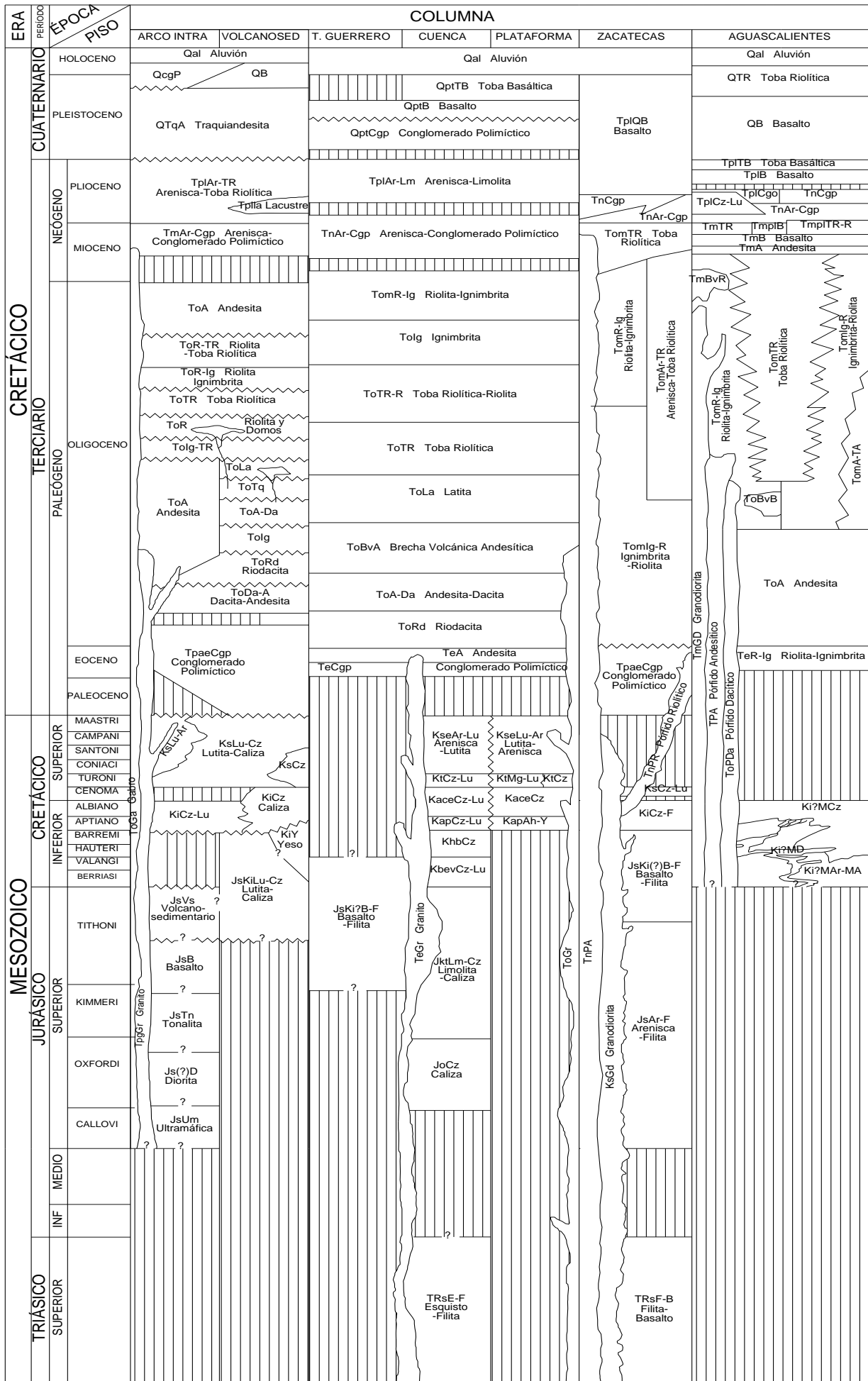


FUENTE: Servicio Geológico Mexicano, 1997 a, b, 1998 a, b



Figura 2.10. Unidades geológicas en el área de estudio

Figura 2.11. Columnas estratigráficas para diversas porciones del área de estudio



En el distrito minero de Tepezalá (Este del área, estado de Aguascalientes, carta geológica de Zacatecas) se tiene una secuencia vulcano-sedimentaria, constituida por sedimentos psammítico y calcáreo metamorfoseados de facies de esquistos verde, con algunos metabasaltos y filitas (Aranda, 1984), unidad conocida como Formación Cienaguitas (JsAr-F) (Dávila *et al.*, 1988). Por último, existen otras rocas Jurásicas constituidas por lutita, caliza arcillosa y arenisca con desarrollo de esquistosidad que afloran al sureste del área (sur de San Luis de la Paz, JsKiLu-Cz) y que corresponden con las rocas más antiguas al ambiente de plataforma (PI).

Cretácico

Nieto-Samaniego *et al.* (2005) señalan que una sedimentación marina del Cretácico permite definir tres ambientes mencionados previamente: *i*) Plataforma Valles-San Luis Potosí (PV-SLP), *ii*) Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM), y, *iii*) una secuencia vulcano-sedimentaria (VS) que pertenece a un arco volcánico (figura 2.10). La PV-SLP se encuentra al noreste del área, está constituida por evaporitas (KapAh-Y) y mayormente de caliza arrecifal, pre-arrecifal y post-arrecifal (KaceCz; KtCz). La CMCM (norte del área), se manifiesta con caliza arcillosa (KbevCz-Lu; KhbCz) pasando a lutita calcárea (KapCz-Lu; KaceCa-Lu; KtCz-Lu) y culminando en roca clástica (KseAr-Lu), indicando una regresión marina. Por último, la secuencia vulcano-sedimentaria marina (sur-suroeste del área) está constituida por basalto almohadillado, lutita, arenisca, caliza, derrames y cuerpos intrusivos de diabasa (KiCz-Lu; KiCz; KsLu-Ar). El material volcánico muestra facies metamórfica de esquistos verde.

En la zona de Aguascalientes, las rocas más antiguas conocidas pertenecen a este periodo geológico siendo la secuencia vulcano-sedimentaria que se ha denominado informalmente como Formación Cieneguita (Ki?MAr-MA) (Velasco, 1989), considerada la base de la columna estratigráfica en esta región. Tal unidad se constituye de andesita, arenisca y lutita. Sobre ésta, se presenta la unidad denominada informalmente como Formación El Varal (Ki?MCz) (Velasco, 1989) compuesta por caliza, lutita con bandas y nódulos de pedernal. Estas unidades cretácicas muestran un metamorfismo regional de bajo grado y presentan intrusión de un tronco diorítico (Ki?MD) denominado Metadiorita San Gregorio, cuya edad asignada corresponde con el Cretácico Inferior.

En el ambiente de plataforma (PI) se presenta la Formación El Doctor (KiCz), constituida por estratos de caliza en estratificación delgada y a manera de bancos, con lentes y bandas de pedernal, intercalación de dolomía y capas de lutita (Wilson *et al.*, 1955), aflora al sureste de Villa de Zaragoza, al noroeste y suroeste de Dolores Hidalgo.

Las rocas del Cretácico Inferior en la zona de Zacatecas afloran exclusivamente en cercanías de las localidades de Tepezalá y Asientos, AGS. Éstas consisten de una secuencia vulcano-sedimentaria (KiCz-F) compuesta por arenisca, filita, caliza arcillosa, bancos de material calcáreo-dolomítico y zonas de esquistos sercíticos. Asimismo, se presenta el emplazamiento de un intrusivo granodiorítico (KsGd) de 74 ± 6 Ma (K/Ar, Mújica y Albarrán, 1983), el cual aflora al noroeste del área de estudio, en inmediaciones de General Pánfilo Natera.

Terciario

A partir de este periodo las columnas estratigráficas se agrupan en dos debido a que el Terciario Inferior (Paleógeno) representa una fuerte actividad volcánica que afectó gran parte del área de estudio, cubriendo una gran extensión y alcanzando espesores promedio de 1,700 m (Vázquez *et al.*, 1990; citado por Carrillo-Rivera *et al.*, 1996), factores que permiten proponer una continuidad y conexión hidráulica efectiva entre las rocas de este periodo, las cuales están constituidas por riolita, dacita, latita, ignimbrita, andesita y piroclastos.

En el mapa de las unidades estratigráficas que afloran se respetó la nomenclatura usada por el Servicio Geológico Mexicano, no obstante, en regiones donde se tienen los límites de las cartas se observan ciertas incongruencias. Un ejemplo es la unidad clasificada en el presente estudio como "ToR; ToTR-R" al suroeste de la ciudad de San Luis Potosí debido a que en una carta el SGM la clasificó como ToR y en la otra ToTR-R. Este tipo de situación se presentó varias veces, por lo que se nombró a la unidad con las dos nomenclaturas usadas por el SGM. Del mismo modo, en el caso de la litología del Terciario se tiene el uso de igual nomenclatura en diferentes mapas geológicos que incorporan el área de estudio (ver figura 2.11); por ejemplo, la ignimbrita (ToIg) se presenta en cinco columnas (Arco Volcánico, Plataforma, Terreno Guerrero, CMCM, PV-SLP). No obstante, en el presente estudio se agrupan estas unidades ya que para un análisis hidrogeológico regional esto no interfiere la interpretación del sistema. Sin embargo, es necesario resaltar esta situación la cual refleja la necesidad de continuar con estudios geológicos detallados de campo, al igual que unificar la nomenclatura, para mejorar la cartografía y representación de la estratigráfica del territorio nacional.

Al oeste del área de estudio se tuvo influencia durante el Terciario de un arco magmático, resultado de la tectónica convergente que afectó a la región (Mc Dowell y Clabaugh, 1979), el cual condujo a la creación del paquete volcánico que conforma la SMOc. Este evento inició en el Eoceno Medio con derrames de riolita y eventos ignimbríticos (TeR-Ig) que afloran al oeste de la ciudad de Aguascalientes.

Por su parte, en el Oligoceno-Mioceno se generan dos eventos, depositándose en el primero rocas de composición intermedia (andesita y andesita basáltica, ToA) a principios del Oligoceno; el segundo evento corresponde con la más grande exposición continua de rocas volcánicas riolíticas del mundo (Mc Dowell y Clauhaugh, 1979) que es la Sierra Madre Occidental, se encuentra constituida por una secuencia continua con predominancia de toba riolítica (TomTR), riolita-ignimbrita (TomR-Ig)-(TomIg-R) y dacita con edad del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (Mc Dowell y Keizer, 1977). Las rocas de este segundo evento presentan una amplia distribución al oeste del área, en comparación con el primer evento. Los basaltos del Mioceno Superior (TmB), están representados por una serie de coladas que afloran al suroeste del área de estudio, al SW de la localidad de Teocaltiche, JAL.

En el Terciario Inferior, en la CMCM se deposita un conglomerado polimíctico compuesto por fragmentos de caliza y roca volcánica (TeCgp) que aflora en la parte centro-norte del área de estudio. La columna estratigráfica es afectada por el apófisis de un intrusivo granítico (TeGr y ToGr) de edad que varía entre 45 ± 4 y 31 ± 2 Ma; dataciones realizadas a

través del método radiométrico K/Ar en Cerro de Peñón Blanco, Cerro de San Cristóbal, respectivamente. Sobre el conglomerado se encuentran derrames de composición andesítica (TeA) del Eoceno, los cuales afloran hacia el norte-centro del área y son cubiertos por una secuencia de rocas volcánicas del Oligoceno, constituida por brecha volcánica andesítica; derrames riolítico, riodacítico, andesítico, dacítico, latítico, y por toba riolítica e ignimbrita (ToRd, ToA-Da, ToBv-A, ToLa, ToTR, ToTR-R, ToIg, TomR-Ig).

En general, en el Neógeno (Mioceno) se deposita material sedimentario, especialmente arenisca y conglomerado polimíctico (TnAr-Cgp; TmAr-Cgp); excepto en la región de Aguascalientes y Zacatecas donde prevalece material volcánico (Toba riolítica TomTR, TmTR; Andesita TmA; Basalto TmB). Durante el Plioceno predominan las rocas sedimentarias, tales como arenisca (TplAr-TR), limolita (TplAr-Lu), conglomerado (TnCgp), caliza y lutita (TplCz-Lu) al oeste del área, entre Aguascalientes y Jalisco.

Cuaternario

Al inicio del período Cuaternario, en gran parte del área de estudio (CMCM, TG y PV-SLP) se depositaron gravas y boleos no consolidados (QptCgp), conglomerado formado por fragmentos angulosos a subredondeados de caliza y arenisca. Más tarde se tiene toba basáltica (QptTB), basaltos con xenolitos de lerzolita y granulita (QptB), sugiriendo relación con el manto y la base de la corteza (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

Por su parte, al sureste del área de estudio (PI) se presentan manifestaciones en superficie de traquiandesitas (QTqA). La última etapa de vulcanismo en este ambiente geológico se considera fue de composición basáltica con derrames y piroclastos, los cuales descansan discordantemente sobre una superficie de erosión con depósitos continentales (Cerro El Cubilete, Gto). Las coladas de basalto (QB) afloran diseminadas al sur del área de estudio, las que consideran procedentes de fisuras profundas y extravasadas a través de conos volcánicos que están dentro de estas mismas rocas; asimismo, se considera que sean posiblemente las últimas emisiones del Eje Neovolcánico. Un afloramiento de basalto de olivino (TplQb) se presenta al noroeste del área de estudio, tiene su origen desde el Plioceno(?) y continua hasta el Pleistoceno.

Finalmente, se presentan depósitos aluviales (Qal) de diversa granulometría (grava, arena, limo y arcilla) que cubren diferentes formaciones antiguas, se presentan en abanicos aluviales en piedemontes, así como en las planicies donde forman depósitos aluviales y lacustres en gran parte del área de estudio.

2.2.2. Estructura Geológica

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1998b), el área de estudio comprende dos provincias geológicas con características distintivas: la Plataforma Valles-San Luis Potosí (PV-SLP) al noreste y la Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM) ubicada al oeste de la misma (figura 2.12).

Plataforma Valles-San Luis Potosí (PV-SLP) es una estructura de plegamientos asimétricos, muy estrechos, con orientación general NW-SE. El sistema de fallas con rumbo NW50° a 60°SE representa los pliegues mayores relacionados con estructuras, fallas normales e inversas. Por su parte, los lineamientos con orientación NW10° a 30°SE están relacionados

con anticlinales y sinclinales, segmentados, producto de esfuerzos regionales, originando pliegues secundarios y de arrastre tipo *chevrón*. Existe otro sistema de lineamientos E-W correspondiente con esfuerzos de primer orden, de carácter compresivo, asociado con la Orogenia Laramide, que originó los plegamientos de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. Adicionalmente, se presentan estructuras tipo *maar* en las rocas volcánicas en cercanía de los poblados La Purísima (al NE de la localidad Pinos, Zacatecas) y Santo Domingo (hacia el NE fuera del área de estudio), las cuales se constituyen por depresiones circulares o elípticas de 400 a 1,200 m de diámetro, con profundidad de 220 m; el borde de los cráteres está cubierto por material piroclástico (Flores *et al.*, 1997).

Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM) es una estructura con plegamientos angostos y alargados, cuyo eje de simetría presenta una orientación NW10° a 20°SE. Asimismo, se presentan lineamientos orientados NW10° a 40°SE característicos de estructuras regionales resultantes de procesos compresivos (Flores *et al.* 1997). Hacia la Sierra de Salinas (también conocida como Peñón Blanco) se han identificado tres etapas de deformación: una compresiva que ocurrió a principios del Terciario, que afectó a la secuencia sedimentaria produciendo pliegues cerrados y fallas inversas imbricadas en abanico con convergencia al este y posteriormente (después del Oligoceno) otras dos etapas distensivas que dislocaron a la sierra en dos sistemas de fallas normales con orientación NW60°SE y NE20°SW, que dieron origen al pilar que forma la Sierra del Peñón Blanco (Flores *et al.*, 1997).

Por último, se presentan estructuras tipo domo, formadas durante el Oligoceno Medio, en especial, el Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP, porción central del área de estudio), con diámetro en promedio de 6.6 km², asociadas con un ambiente geológico distensivo (Flores *et al.*, 1997). El CVSLP está constituido por diferentes derrames de lava y depósitos voluminosos de flujo piroclástico (ignimbrita) de composición riolítica (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982). Otro domo de importancia es el de Pinos, el cual se localiza al norte del poblado Pinos, Zacatecas; presenta un diámetro de 10 km², está asociado con fallas y fracturas distensivas formadas perpendicularmente a la dirección de extensión máxima desarrollada en el Terciario Medio. Al igual que los domos del CVSLP esta estructura es de composición riolítica, con alto contenido de minerales de fluoruro, representado por la presencia de topacio existente en estas rocas.

- Principales Fallas Geológicas

La provincia Mesa Central se encuentra limitada por diversas fallas principales, éstas son: *i)* al sur con la Falla del Bajío, *ii)* al este con el sistema de fallas de Taxco-San Miguel de Allende, *iii)* al oeste con el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes, y *iv)* con la fosa de Aguascalientes al suroeste. El límite de esta provincia al norte corresponde con un sistema montañoso de dirección aproximada E-W conocido como Sector Transversal de Parras de la Sierra Madre Oriental (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). En el área de estudio sobresalen las siguientes estructuras (ver figura 2.12):

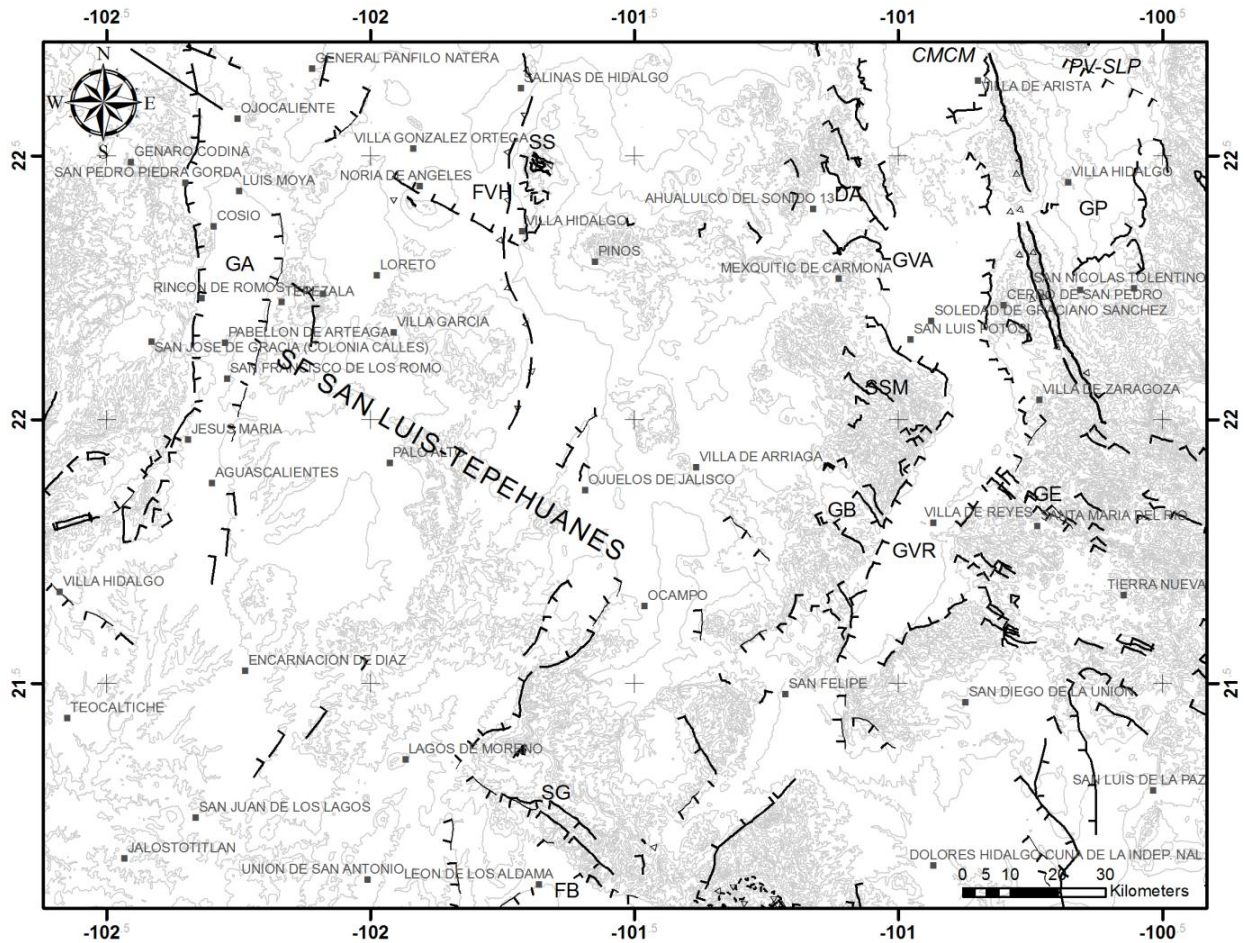


Figura 2.12. Estructuras mayores en el área de estudio. GA Fosa de Aguascalientes, FVH Falla Villa Hidalgo, SFSLT Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes, DA Depresión de Ahualulco, GVR Fosa Villa de Reyes, GP Fosa Peutillos, GB Fosa Bledos, SSM Sierra de San Miguelito, GE Fosa Enramadas, GVA Fosa Villa de Arista, SS Sierra de Salinas, SG Sierra de Guanajuato, TG Terreno Guerrero, FB Falla del Bajío, CMCM Cuenca Mesozoica del Centro de México, PV-SLP Plataforma Valles-San Luis Potosí.

Falla del Bajío (FB); Corresponde con una falla normal, la cual muestra dos segmentos mayores: 1) hacia el lado más este, se extiende desde Celaya hasta Irapuato en el estado de Guanajuato, donde la zona de falla tiene dirección E-W. En el bloque levantado se aprecian dos grupos de fallas con direcciones NW-SE y ENE a NE, en conjunto ambos grupos de estructuras le dan en ese sector una forma aserrada al borde norte de El Bajío, que es una planicie de relleno aluvial de escala regional, y 2) el segundo segmento de la FB forma el escarpe SW de la Sierra de Guanajuato, siendo ésta el bloque levantado de la falla, tiene 80 km de largo y se extiende desde Irapuato hasta León, ambos en el estado

de Guanajuato. La falla permite el afloramiento de la secuencia vulcano-sedimentaria marina del Cretácico. La estructura está formada por una serie de fallas normales de ángulo alto, escalonadas y con bloque hundido al SW (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

Es posible que la falla del Bajío tenga un origen mucho más antiguo del Eoceno, pero su individualización se hace evidente hasta el Oligoceno, durante el cual tuvo lugar su actividad mayor y a partir de entonces ha tenido fases sucesivas de reactivación que abarcan por lo menos hasta el Mioceno Superior. La FB afecta a rocas del Mioceno Medio, tanto en la región de Guanajuato, como en las cercanías de Salamanca (Ojeda-García, 2004). La falla del Bajío o fallas asociadas parecen no haber tenido actividad en el Plioceno o posteriormente, ya que no hay evidencia al respecto.

Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (SFSLT). De acuerdo con Nieto-Samaniego *et al.* (2005), esta estructura presenta una dirección NW-SE, extendiéndose desde San Luis de la Paz, Gto. hasta Tepehuanes, Dgo. El SFSLT parece corresponder con el límite entre las rocas volcánicas cenozoicas de la Sierra Madre Occidental y las secuencias vulcano-sedimentarias mesozoicas, así como al límite norte de las fosas de la Sierra Madre Occidental.

La porción este del SFSLT, entre San Luis de la Paz y Santa María del Río presenta un sistema formado de numerosas fallas normales con rumbo NW-SE y buzamiento principalmente al SW, formando en algunos lugares fosas tectónicas, desplazando principalmente rocas del Oligoceno temprano (Labarthe-Hernández y Tristán-González, 1980; Tristán-González, 1987; Alvarado-Méndez *et al.*, 1997), lo que indica una edad máxima de actividad en el Oligoceno Superior.

La sierra de Salinas (SS, ver figura 2.12) es cortada de manera oblicua por el SFSLT, las fallas tienen dirección promedio N50°W con dirección de estría que indica un movimiento preponderantemente normal y formando un sistema de pilar y fosa (Silva-Romo, 1996).

Fosa Aguascalientes (GA) es un sistema de fallas que limita al oeste el sector sur de la MC separándola de la Sierra Madre Occidental (figura 2.12), consiste de una fosa asimétrica (semi-fosa) cuya falla principal está ubicada al oeste. Esa falla se extiende con dirección N-S por 150 km, desde los Altos de Jalisco hasta su intersección con el Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes, cerca de Zacatecas. La edad de actividad de la falla principal de la Fosa Aguascalientes es posterior al Oligoceno Inferior, sin que se pueda precisar cuántos eventos de deformación han tenido lugar en ella. La fosa Aguascalientes es la estructura que claramente limita las provincias Sierra Madre Occidental y Mesa Central (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

Fosa Villa de Reyes (GVR) es una estructura que puede alcanzar 260 km de longitud y una anchura promedio de 14 km, su edad es Oligoceno. Su origen se considera corresponde con un combamiento de la corteza terrestre, que incluye un tipo de volcanismo asociado y fallas marginales (Closs, 1951). De acuerdo con el SGM (1997b), esta estructura presenta una orientación preferencial NE-SW. Durante la formación de esta fosa, se originó de manera contemporánea otro sistema de fracturas perpendicular con tendencia NW-SE, que permitió la formación de fosas y pilares de menor desarrollo, estos son de norte a sur

las fosas de: Enramadas, Palo Blanco, La Laja, Santa Rosa, Bledos, Dolores e Ibarra. Todos ellos forman un valle tectónico hundido, el cual se encuentra relleno por una gran cantidad de material volcánico Terciario y material continental (conglomerado polimíctico) del Cuaternario (Consejo de Recursos Minerales, 1997).

Fosa Peotillos (GP), esta presenta una longitud de 55 km y 18 km de ancho, donde están expuestos sedimentos recientes, ignimbrita y basalto (Flores *et al.*, 1997).

2.3. Referente hidrogeológico

La configuración geológica del área de estudio permite suponer la presencia de diversos pilares y fosas rellenas de material granular cuya composición se deriva de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas; su configuración se extiende hacia la parte central-norte de México y suroeste de Estados Unidos, región hidrogeológica conocida como Cuencas Aluviales Centrales (Anderson *et al.*, 1988). A continuación se realiza una descripción de la cuenca de San Luis Potosí la cual ha sido ampliamente estudiada, asimismo, se considera que el área de estudio presenta un comportamiento hidrogeológico similar teniendo en cuenta la gran extensión de la unidad geológica del Terciario.

De acuerdo con diversos estudios (Carrillo-Rivera, 1992; Carrillo-Rivera *et al.*, 1996; Cardona, 2007, entre otros), en la fosa de la cuenca superficial de San Luis Potosí (SLP) se presentan dos acuíferos principales, divididos por una capa de arenisca compacta de muy baja conductividad hidráulica (figura 2.13). Un acuífero somero se presenta arriba de una capa de depósitos aluviales, es de tipo libre, en un medio poroso, se recarga con agua de lluvia y residual (de prácticas agrícolas); la profundidad del nivel freático varía de <5 a 30 m, presenta carga hidráulica entre 1,815 y 1,880 m (Cardona, 2007). Según Labarthe y Tristán (1978), su espesor máximo aproximado es de 250 m; sin embargo, Carrillo-Rivera (1992) señala que el material que constituye el acuífero somero presenta un espesor relativamente estable que alcanza los 90 m.

Respecto al espesor de los sedimentos debajo del acuífero superior, Anderson *et al.* (1988) señalan que el grosor típico en las Cuencas Centrales Aluviales es de 2,000 a 3,000 m aunque puede tener menos de 300 m de sedimentos. En el caso de la fosa de SLP, el material de relleno granular del Terciario presenta un espesor máximo entre 500 y 600 m (Cardona, 2007). Estos sedimentos están en contacto con las rocas volcánicas que se extienden regionalmente mostrando una comunicación hidráulica entre sedimentos y material volcánico. Cardona (2007) establece que el flujo de agua subterránea en el material sedimentario es de corta distancia, a través de los poros de este material granular y con un movimiento preferencial en forma lateral. En general, a este conjunto de materiales geológicos (relleno de fosa y volcánico) se le ha denominado acuífero profundo.

El acuífero profundo es considerado localmente como confinado en el centro de la planicie de la cuenca, corresponde con material granular y con un medio fracturado de doble porosidad, presenta una profundidad a la superficie potenciométrica de 60-150 m, su espesor en la cuenca es variable del orden de los 2,000 m (Carrillo-Rivera, 1992), con carga hidráulica entre 1,715 y 1,760 m snm (Cardona, 2007). Labarthe y Tristán (1978) señalan que los pozos asociados con este acuífero presentan una temperatura a la descarga entre 30° a 40° C. La dinámica del agua subterránea, se encuentra controlada

por fallas regionales de rumbo N-S y NW-SE, asimismo, se considera que su recarga es en gran parte regional posiblemente desde el estado de Guanajuato. Otros autores (Carrillo-Rivera, 1992; Carrillo-Rivera *et al.*, 1996; Cardona 2007) señalan igualmente que el flujo de agua en el acuífero profundo se genera en regiones localizadas fuera de la cuenca hidrográfica, en rocas volcánicas fracturadas por lo que presenta características físicas y químicas particulares. Se considera que más del 70% del agua subterránea extraída del acuífero profundo es de origen geotermal (Cardona, 1990; Carrillo-Rivera, 1992) por presentar en su descarga temperatura mayor a los 20° C, valor mayor de la media anual ambiental de la región (Cardona, 2007).

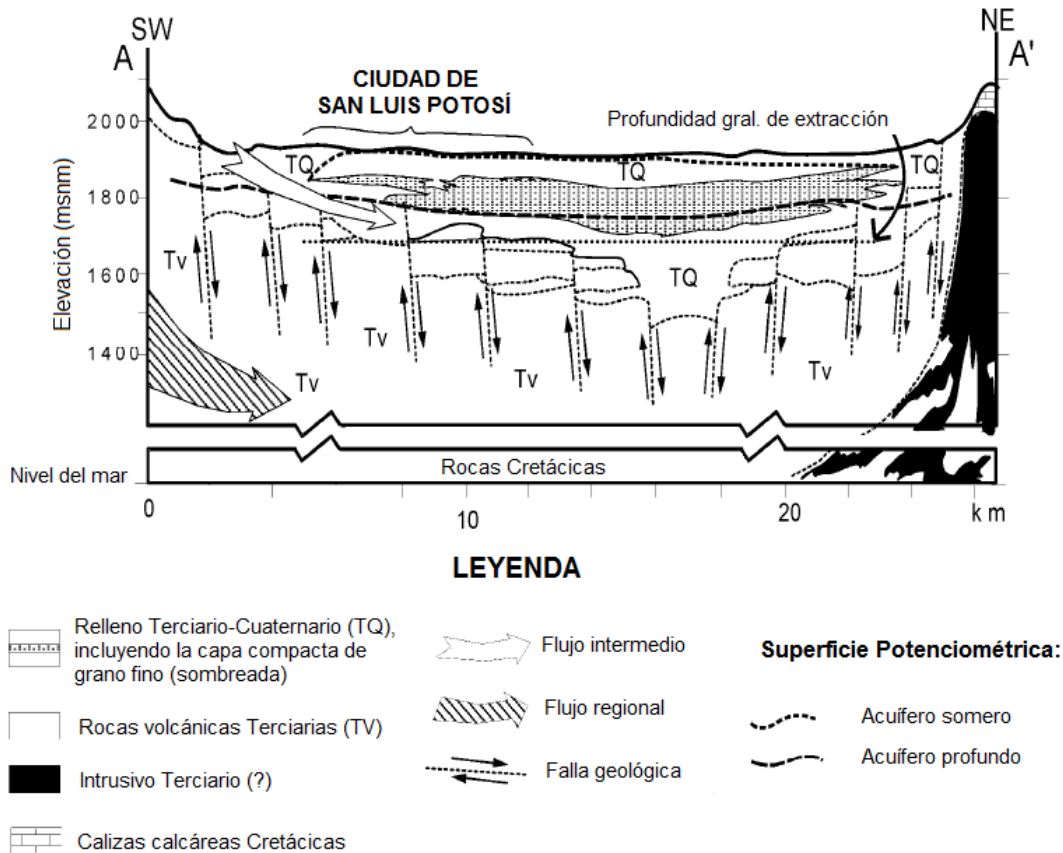


Figura 2.13. Sección esquemática mostrando la configuración hidrogeológica de la cuenca de San Luis Potosí (Fuente: Carrillo-Rivera, 2000).

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1988) establece que el acuífero profundo es alimentado por: 1) un flujo subterráneo horizontal pequeño (del orden de $0.12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) proveniente del norte y noreste de la cuenca, y 2) el flujo principal es agua termal profunda ($>1.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) que ha sido inducido hacia pozos en una amplia faja que va desde la zona industrial hasta más allá del límite norte de la ciudad de SLP. Como resultado de la extracción en los pozos se produce un flujo vertical ascendente del agua termal, la cual es de buena calidad ($<400 \text{ mg l}^{-1}$ de sólidos totales disueltos, pero alta en fluoruro). Durante la extracción de esta agua es común que se le adicione un caudal de agua fría (no termal) derivada de la sierra San Miguelito, SLP. El aporte se ha definido con apoyo en la química del agua y en el referente geomorfológico. Así, la información

analizada indica que el agua termal está en tránsito hacia una zona fuera de la cuenca de SLP ya que ésta nunca ha funcionado como zona de descarga natural de dicha agua termal.

Carrillo-Rivera *et al.* (1996) indican que la roca basamento para la región de SLP es la secuencia indiferenciada pre-Terciario, compuesta principalmente por sedimentos lodolito-calcareos del Cretácico y el intrusivo cuarzo-monzonítico post-Cretácico. En cuanto a la extensión lateral del acuífero profundo, los mismos autores señalan que el único límite que se tiene definido es aquel ubicado al este con las formaciones cretácicas debido a la presencia de una falla geológica. El límite al oeste aún se encuentra sujeto a investigación debido a la conexión hidráulica subterránea entre las diversas cuencas hidrográficas presentes.

El nuevo enfoque de los estudios hidrogeológicos enmarcando los flujos de agua, más que la definición de acuíferos, es la identificación de los sistemas de flujo de agua subterránea. De acuerdo con Tóth (1995), la unidad básica y apta de diagnóstico es el sistema de flujo de agua subterránea que puede ser definido como una unidad natural y coherente, en espacio y tiempo, compuesta de agua subterránea de calidad fisicoquímica particular, que circula por material geológico con expresión geomorfológica, topográfica, vegetación y suelo particular. Esto se debe también a que la interdependencia hidráulica subterránea entre cuencas superficialmente separadas es un hecho relativamente común según el mismo autor; característica que se ha evidenciado en el área de estudio.

Con base en las características geoquímicas del agua subterránea de la cuenca de San Luis Potosí se determinó la presencia de los sistemas de flujo local, intermedio y regional (Carrillo-Rivera, 1992; Carrillo-Rivera *et al.*, 1996; Cardona, 2007). Asimismo, Molina-Maldonado (1996) reporta dos sistemas de flujo regional y uno de tipo intermedio para el área de Aguascalientes con base en el estudio de análisis fisicoquímicos del agua subterránea lo que resalta la utilidad de este tipo de investigaciones para definir el funcionamiento del flujo del agua subterránea.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del presente trabajo de investigación se dividió en tres etapas.

3.1. Trabajo de gabinete inicial

Esta fase consiste en la búsqueda y recopilación de información relacionada con el tema de investigación, así como del referente geográfico e hidroquímico del área de estudio para su posterior análisis, incorporando el aspecto espacial y en lo posible el temporal. A continuación se señala con mayor detalle la metodología aplicada en la presente investigación tratando de mostrar el orden que se siguió.

3.1.1. Recopilación de información física del área de estudio

En el caso específico del clima, así como del tipo de suelo, uso del suelo y vegetación, la obtención de información se realizó a través de la página de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). De allí se obtuvo la cartografía en formato digital del territorio nacional a escala 1:1'000,000 para su posterior análisis. Cabe resaltar el apoyo por parte del Instituto de Geografía para obtener información espacial más detallada, como es el caso de la hidrología superficial y curvas de nivel cada 100 m, que junto con el modelo digital de terreno permitió la obtención del modelo de relieve (hillshade), herramienta sumamente útil para el análisis integral de los sistemas de flujo ya que este incluye diversos indicadores superficiales.

Teniendo en cuenta la importancia que tiene el factor geológico en la dinámica del agua subterránea y los sistemas de flujo, su estudio se basó en el análisis de artículos, tesis y otras publicaciones que incorpora porciones que hacen parte del área de interés (Cardona, 1990; Carrillo-Rivera, 1992; Flores *et al.*, 1997; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Cardona, 2007). No obstante, la descripción de la estratigrafía se apoyó particularmente en la información del Servicio Geológico Nacional (SGN), cartas geológico-mineras F14-4 San Luis Potosí, F14-7 Guanajuato, F13-6 Zacatecas y F13-9 Aguascalientes a escala 1:250,000, por considerarse una fuente confiable y con buen grado de detalle para el tema de este caso.

Por último, en cuanto a la información hidrogeológica se apreció que existe un buen número de estudios relacionados con aspectos hidrológicos, sin embargo, no se cuenta con un censo real de los aprovechamientos del área, registros históricos que contengan datos multitemporales de parámetros hidráulicos e hidroquímicos, ni de la configuración geológica regional del subsuelo. Se trabajó con información asequible, especialmente aquella de artículos, tesis, así como con de datos de la química del agua del trabajo realizado previamente en la cuenca de San Luis Potosí y alrededores a través del Convenio entre la Comisión Nacional del Agua y el Instituto de Geografía, UNAM (CNA, 1999).

La información compilada se analizó para identificar elementos parciales de sistemas de flujo, su dimensión (profundidad de circulación, extensión lateral), características químicas (concentración de elementos traza, relación química agua-roca), particularidades físicas (pH, temperatura, isótopos), indicadores indirectos (geomorfología, vegetación, salinidad de suelo, manantiales), características hidráulicas (conductividad, porosidad, coeficiente de almacenamiento), dirección relativa de flujo (ascendente, descendente, horizontal).

3.1.2. Procesamiento de información digital

Considerando la escala regional que se utiliza en el presente trabajo, la información cartográfica digital se homogenizó en el sistema de coordenadas geográficas, WGS 1984 usando el software ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008). Cabe resaltar el arduo trabajo en relación con la cartografía geológica debido a que fue necesaria la digitalización de gran parte de las cuatro cartas a escala 1:250,000 mencionadas previamente, junto con su respectiva georreferenciación.

3.1.3. Análisis hidroquímico de información existente de química del agua

A partir de los ciento cuarenta y cinco (145) datos hidroquímicos del estudio de la CNA (1999) se realizó un primer análisis de las condiciones del agua para el área de estudio que se puede ver en el capítulo 4, apartado 4.2.2 (Clasificación hidroquímica, tipos de agua y patrones hidrogeoquímicos). Dicho análisis se realizó con apoyo del Dr. Fagundo Castillo del Centro de Medicina Natural y Tradicional, Ministerio de Salud Pública de Cuba, el cual permitió definir diferentes grupos de agua existentes en el área, base para la selección de puntos de muestreo en campo y posterior verificación.

A través del paquete AQUACHEM (1977, versión 4.0), MODELAGUA (Fagundo-Sierra *et al.*, 2001) e HIDROGEOQUIM (Fagundo *et al.*, 2005) se manipuló la información determinando diferentes tipos y grupos de agua, la temperatura mínima de equilibrio a través de geotermómetros, se revisó la calidad de los datos hidroquímicos que a su vez permitió el análisis de procesos geoquímicos y ambientales.

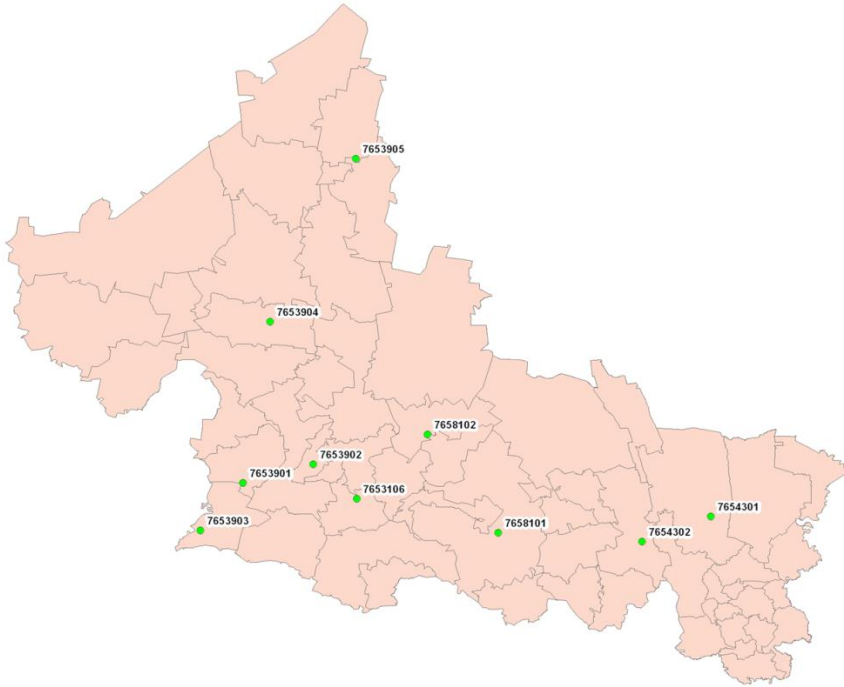
3.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió principalmente en la toma de muestras de agua de lluvia y subterránea para obtener la química e isotopía del agua. Asimismo, el trabajo de campo permitió un reconocimiento del área de estudio, verificándose elementos del terreno (vegetación, litología, suelo, agua) que finalmente permiten establecer posibles relaciones con diferentes componentes del ambiente. Esto en su conjunto permitió tener elementos de juicio para definir el comportamiento del sistema.

3.2.1 Toma de muestras de agua lluvia para análisis fisicoquímico e isotópico

Conforme con el proyecto de estudio de isótopos de San Luis Potosí (UASLP y UNAM) se tienen diez sitios de muestreo de agua de lluvia en el norte y oeste del estado (figura 3.1, fotos 3.1 a 3.3), de los cuales siete cuentan con un recipiente de un galón (3.785 l) y tres con 20 l (estaciones Valles, Cerritos y Sierra de Álvarez), debido a que en estas últimas se presenta mayor precipitación. La ubicación de las estaciones es estratégica y trata de representar cada una de las regiones geográficas (Huasteca, Media, Centro y Altiplano) de SLP. Asimismo, las estaciones deben localizarse en sitios seguros, de relativo fácil acceso para la toma de muestras y control, evitando así afectaciones de cualquier índole.

Teniendo en cuenta que la toma de muestras se realiza principalmente para análisis isotópico, se requiere que se vean afectadas lo menos posible por evaporación para evitar el fraccionamiento isotópico. Por esto, los recipientes colectores de agua de lluvia en campo deben tener 60 ml de aceite mineral en el caso de los recipientes de un galón, y 220 ml para aquellos de 20 l.



Estación No.	Nombre
7653901	Ingeniería
7653902	Agronomía
7653904	Venado
7653905	Matehuala
7658101	Río Verde
7654301	Valles
7653903	V. Arriaga
7653106	S. Álvarez
7658102	Cerritos
7654302	Cabezas

Figura 3.1. Localización de las estaciones de toma de muestras de agua de lluvia



Foto 3.1. Estación Valles



Foto 3.2. Estación Sierra Álvarez-Microondas



Foto 3.3. Estación Venado

La recopilación de la muestra de agua se realiza cada mes, no obstante, en muchas ocasiones no se cuenta con suficiente volumen de agua durante la época de secas y por el contrario, existen períodos donde la precipitación sobrepasa el volumen de los recipientes forzando esto último a que la recopilación se realice con más frecuencia. Posteriormente, las muestras deben quedar en reposo durante 8 a 15 días para que se produzca separación del agua y aceite, esto debido a que durante el traslado de la estación al laboratorio se favorece la emulsión entre tales elementos. Una vez la muestra lleve ese tiempo estimado de quietud se realiza un trabajo en el laboratorio que consiste en separar el agua de la muestra del aceite mineral (agregado en campo) para finalmente enviar la muestra de agua libre de aceite al laboratorio del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

El método que se usó para dicha separación agua-aceite se basó en la bomba de vacío con un dispositivo creado y fabricado por la química María de la Paz Orta, junto con otros funcionarios del laboratorio del Instituto de Geografía, a quienes se agradece su ingenio y colaboración. Una vez succionada el agua se procede a filtrarla con papel filtro No. 2 de 24 cm de diámetro (marca Whatman) para evitar la presencia de objetos extraños y posibles reacciones con el agua que podría alterar el resultado analítico.

El volumen de agua estimado para filtrar corresponde con 2,560 ml que es el necesario para cubrir la cantidad de agua requerida para los análisis fisicoquímicos e isotópicos (tabla 3.1), por su parte, aquel volumen restante se mide para llevar un registro del total colectado. En el caso que haya poca agua tiene prioridad el volumen para el análisis isotópico ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y Tritio). El etiquetado de las muestras consiste en la clave de la estación, año y mes de recolecta, por ejemplo para la muestra de octubre del año 2009 de la estación Cerritos sería: 7658102/09/10.

Tabla 3.1. Requerimientos de volumen para el análisis fisicoquímico e isotópico de agua (de lluvia)

$\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$	Tritio	Metales	Aniones
60 ml	500 ml	1000	1000

Durante el trabajo de laboratorio se llena un formato para llevar un registro del mes en que se colecta el agua de lluvia. En el anexo 1 se muestra un ejemplo para el caso de la estación ubicada en la Facultad de Agronomía de la UASLP. Cabe recordar que los frascos son previamente lavados con ácido clorhídrico y agua destilada, al igual que los que se utilizan para manantiales y pozos, asimismo cuentan con tapa y contratapa. De acuerdo con el protocolo del Organismo Internacional de Energía Atómica se debe dejar un 5% de aire en los frascos a la hora de llenado por si se llega a presentar cambios de temperatura que afecten el volumen del agua.

3.2.2. Toma de muestras de agua de pozo (análisis fisicoquímico e isotópico)

La selección de los sitios para tomar muestras se realizó con base en resultados de un estudio previo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas del territorio de estudio, distribución de aprovechamientos existentes, análisis fisicoquímicos asequibles, condiciones apropiadas del aprovechamiento para la colecta de muestras, acceso y permiso de propietarios de ejidos y/o pozos. Cabe resaltar la dificultad que se tuvo con la ubicación de los datos de dicho estudio debido a que un 38% no presentaba coordenadas,

por lo que se realizó un trabajo de ubicación de puntos de acuerdo con el nombre de la localidad, aspecto que no afecta profundamente el estudio teniendo en cuenta la escala de trabajo que se maneja en la presente investigación. Asimismo fue necesario homogenizar las coordenadas debido a que algunas se encontraban en coordenadas geográficas y otras en UTM, teniéndose que hacer adicionalmente una corrección para cada punto con base en su ubicación (estado) ya que el área de estudio comprende partes de las zonas 13 y 14 de acuerdo con la división del territorio nacional con la proyección Universal Transversa de Mercator. No obstante, no fue posible la ubicación del 11% del total de las muestras de 1999 donde cerca del 7% están localizadas en el estado de Jalisco y 3% en el estado de SLP. Esta situación hace evidente la importancia de incorporar en los reportes todos los datos posibles para futuras aplicaciones.

La toma de muestras sigue un protocolo, del cual depende la preservación correcta del contenido de elementos y compuestos bajo las condiciones a las que el agua está en el subsuelo, así como los requerimientos que exige el laboratorio a donde se envían las muestras. En este caso, cada sitio contó con la toma de cuatro botellas de 60 ml (metales, aniones, isótopos estables, extra) y una de 500 ml (tritio). Botellas que finalmente fueron enviadas a dos laboratorios: 1) Activation Laboratories Ltd. de Canadá para el análisis de metales y aniones, 2) Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona para isótopos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$).

Los envases empleados son de polietileno (material inerte al contacto con agua; Cardona, 1990) con tapa y contratapa, previamente lavados con ácido clorhídrico diluido al 10% y enjuagados con agua destilada, trabajo realizado en laboratorio (Instituto de Geografía, UNAM). Asimismo, los envases son etiquetados para llevar un orden y un muestreo sistemático que permita la localización de una muestra en un mapa, en espacio y tiempo.

Al llegar al sitio de muestreo, se lava aproximadamente tres veces el envase donde se colectará la muestra con agua del aprovechamiento para eliminar cualquier residuo que pueda existir en el envase, controlando de esta manera la calidad del agua y que no se vea alterado el resultado del análisis. Se toma una muestra para aniones (F, Cl, I, SO_4 , NO_3 , NO_2 , HCO_3 , CO_3), otra para isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), evitando la presencia de burbujas de aire dentro del envase para limitar la modificación potencial de la calidad química original. Para la muestra de metales (Li, Na, K, Mg, Ca, Sr, Mn, Fe, NH_4 , Ba, Zn, Cu, Zr, etc.), es necesario filtrarla con una membrana de acetato de celulosa de $0.45\ \mu\text{m}$ y posteriormente acidificarlas con ácido nítrico de alta pureza, hasta aproximadamente un pH de 2; al igual que las anteriores, requieren de eliminación total de burbujas en el recipiente. Adicionalmente, se toma una muestra extra, sin acidificar ni filtrar por si se llegará a necesitar posteriormente en caso que se presente alguna contrariedad con alguna de las otras muestras ya señaladas. Al finalizar, es necesario mantener las muestras colectadas a menos de 4°C hasta su llegada al laboratorio para evitar reacciones y alteración del contenido de la muestra de agua.

Sin embargo, a pesar del intento de no generar ninguna modificación o alteración de los parámetros de campo se puede presentar una variación durante el tiempo entre colección y traslado al laboratorio de las muestras, por esta razón, se realizan mediciones en el campo de diversos parámetros, tales como: temperatura, pH, potencial óxido-reducción (Eh) y conductividad eléctrica a través de aparatos previamente calibrados y con ayuda de

la celda de aislamiento. No obstante, en cada sitio de muestreo se realiza la calibración del potenciómetro debido a que el pH es un parámetro dependiente de la temperatura del agua, ésta se realiza con soluciones "buffer" de pH 4, 7 y 10 (a la misma temperatura del agua de la muestra).

Otro parámetro medido en campo es la alcalinidad, que consiste en titular un volumen de muestra establecido (50 ml), agregando gradualmente ácido sulfúrico de normalidad conocida (1.6 N) por medio de un titulador digital Hach hasta alcanzar un pH aproximado de 3.8. La determinación de la alcalinidad es descrita en el punto 3.3.1 correspondiente a trabajo de gabinete.

A partir del análisis hidroquímico inicial de información (CNA, 1999) se seleccionaron diferentes puntos representativos de diferentes grupos de agua para la posterior toma y medición de parámetros fisicoquímicos. El trabajo de campo se realizó del 12 al 20 de mayo del 2010, con el objetivo de toma de treinta (30) muestras; sin embargo, en total se lograron tomar 21 (ver tabla 3.2). La localización de tales puntos, así como de aquellos que se visitaron pero donde no fue posible la toma de muestras, se encuentra en la figura 3.2. En el anexo 2 se presentan las hojas de campo para cada sitio de toma de muestra.

Cabe resaltar que el grado de dificultad se debió principalmente a:

- i) ubicar los pozos ya que algunos se localizan en ranchos y ejidos particulares, cuyo acceso únicamente es a través de camino poco transitado,
- ii) localizar los encargados de los aprovechamientos u obtener permiso para ingreso debido al horario que tienen diversas oficinas de gobierno, y
- iii) las condiciones socioeconómicas de ciertas localidades visitadas, las cuales no cuentan con hotel ni restaurante, mostrando a su vez la pobreza y falta de fuentes de trabajo especialmente en regiones rurales; asimismo, hubo dos casos donde los pozos no estaban operando durante la visita debido al no pago de la energía eléctrica (tenían suspendido el servicio).

Estas limitantes se mencionan ya que se tenían planeados ciertos puntos de muestreo (49, 90 y 95) cuya realización no fue posible debido a la cantidad de tiempo que conlleva el desplazamiento de un lugar a otro. Todo este tipo de situaciones afectan directamente el rendimiento y óptimo desempeño del trabajo de campo porque son aspectos que toman mayor tiempo en realizar las actividades contempladas desde un comienzo.

El método empleado para el análisis químico de las muestras usado por el laboratorio fue espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado y espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS e ICP-OES, respectivamente) para los cationes mayores y elementos traza, por su parte, el Cl, F, NO₃ (as N), PO₄ (as P), SO₄ y NO₂ (as N) se determinaron a través de la cromatografía iónica (IC).

Tabla 3.2. Resumen del trabajo de campo de los puntos de toma de muestras

	MUESTRA	OBSERVACIÓN
29.	Nacimiento	Realizado
30.	Agua Clara	Hace más de un año no funciona la bomba del pozo, por lo que no se pudo realizar (foto 3.4).
31.	Ex Hacienda de Jesús	Realizado
33.	P-RDEL	No se encontró el pozo de acuerdo con las coordenadas reportadas en el estudio de la CNA (1999), se ubicó uno cercano pero no contaba con salida de agua (foto 3.5).
34.	PSMI2	Realizado
36.	N-ZAC	Realizado
42.	MPIN1	Manantial que se inició su búsqueda pero por presentarse muy alejado hacia la montaña no se continuó.
44.	P-NIG-22-X	Realizado
47.	P-PACH1	El pozo registrado de 1999 ya no existe, hay uno cercano nuevo pero la salida de agua que tiene no sirve para el muestreo (ver foto 3.6).
49.	M-NORAN	No se pudo realizar
56.	Pozo 4	Realizado
58.	Pozo 9	Realizado
59.	Labor de Montoya	No se encontró, la población no reconoce ningún pozo con ese nombre.
60.	Teocaltiche 3	El permiso para el muestreo depende de las oficinas del gobierno, por lo que el horario es limitado. Estaba cerrado y se reemplazó este punto por el pozo 63.
63.	Los Yañez	Realizado
64.	Corral Blanco	Realizado
68.	Belén del Refugio	Realizado
69.	Ornelas	Realizado
76.	Acosta	Realizado
78.	San Pedro	La oficina del agua del municipio Encarnación de Díaz amablemente ayudó en el campo, sin embargo, no tenían referencia de este punto y no se logró ubicar.
80.	Luis Moya	Realizado
88.	Ojuelos	Realizado
90.	P-GLEZ	No se pudo realizar
92.	P-SALDI	No se pudo realizar porque el pozo se encuentra cerrado por problemas con el CONAGUA y pago por el servicio.
93.	P-PRIMAI-II	Según la población de la Primavera, en el lugar existía un pozo hace unos 10 años pero se fue bajando el nivel hasta que no se pudo extraer más agua, por lo que parece no corresponder con el del estudio de la CNA (1999). Se visitaron dos pozos cercanos pero no contaban con llave o salida de agua, uno de ellos parece corresponder con el dato de 1999 ya que se aprecia el cambio de tubería, la cual si contaba con llave (ver foto 3.7).
95.	P-CBTA	No se pudo realizar
99.	P-OCA	Realizado
101.	N-SAL	Realizado
102.	P-TULE	Realizado
123.	ZA-1171	Realizado
126.	ZA-393	No se pudo realizar debido a que no estaba funcionando el pozo por no hacer el pago de la luz. Problemas sociales en la comunidad con respecto al funcionamiento del pozo.
127.	Granja PILGRIMS	No se pudo realizar debido a que se requería un permiso especial de las oficinas centrales por ser una granja de pollos. Por lo mismo, tienen muchas exigencias para el ingreso de personal a las instalaciones.
132.	San Juanico G yC	Realizado
137.	Candido Navarro	Realizado
144.	Los Jasos	Realizado

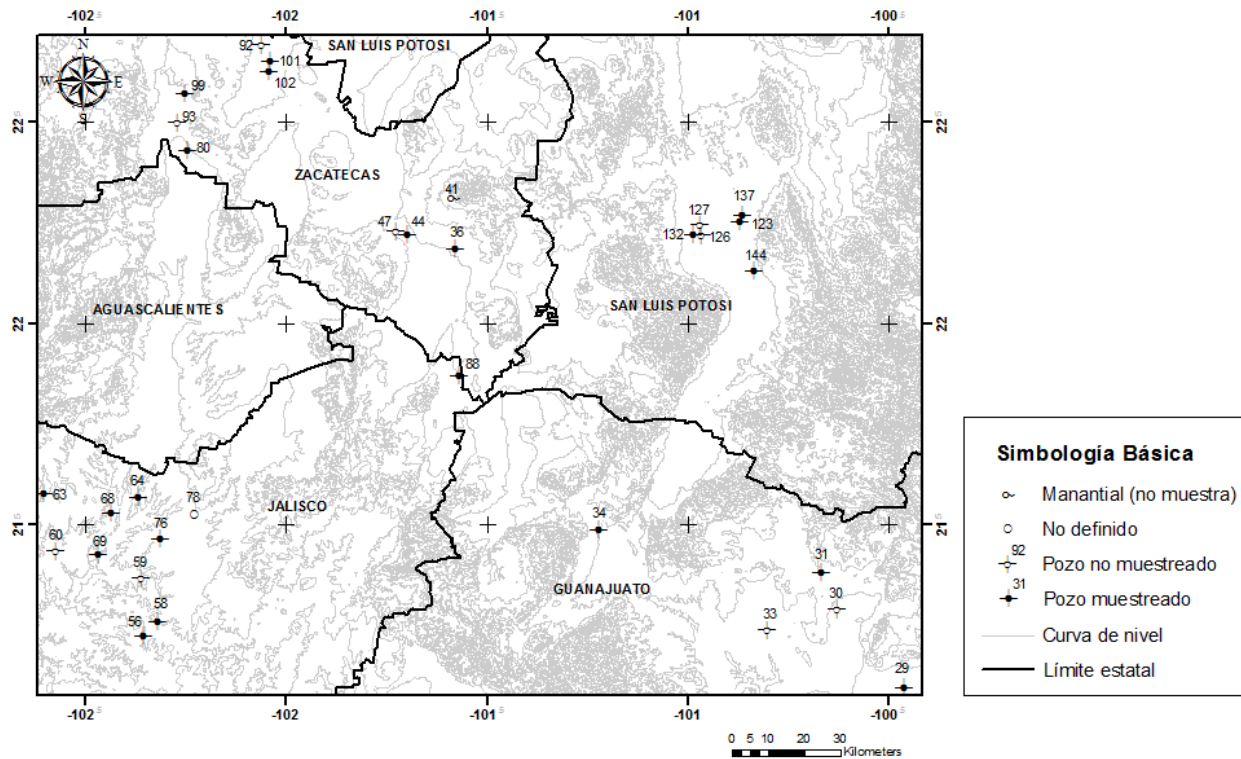


Figura 3.2. Ubicación de sitios de toma de muestras



Foto 3.4. Pozo 30 Agua Clara, municipio San Luis de la Paz, Guanajuato.



Foto 3.5. Pozo cercano al 33 P-RDEL, municipio de Dolores Hidalgo, Guanajuato.



Foto 3.7. Pozo cercano al punto 47, Localidad de La Pachona



Foto 3.7. Pozo que parece corresponder con el punto 93 P-PRIMAI-II

3.3. Trabajo de gabinete posterior y fase de análisis

3.3.1. Determinación de la alcalinidad

El valor de la alcalinidad se obtuvo a través del método o titulación de Gran, el cual se basa en que la concentración de H^+ incrementa linealmente con relación al ácido añadido para la titulación hasta que el HCO_3^- se convierte en H_2CO_3 , situación conocida como "punto de equivalencia" y que se obtiene a través de la extrapolación de los datos en la porción lineal de la curva (ver figura 3.3).

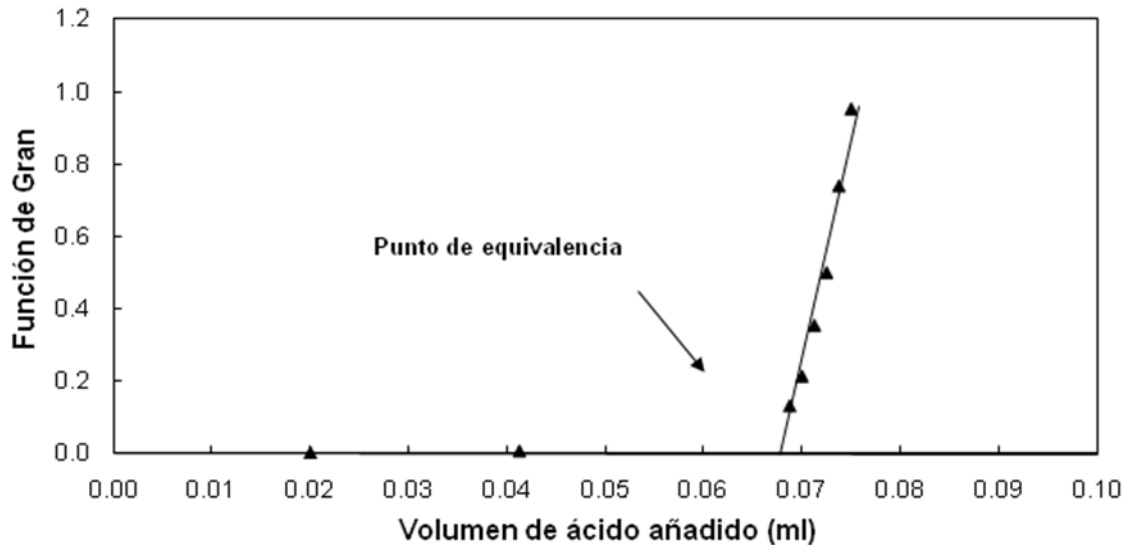


Figura 3.3. Ejemplo metodológico de la titulación de Gran

Así, una vez obtenidos los datos de la titulación en el campo se procede a realizar el cálculo de la función de Gran:

$$F = (V + V_0) \times 10^{-pH}$$

Donde, V : volumen establecido de la muestra (ml, en esta investigación: 50 ml)
 V_0 : volumen de ácido sulfúrico añadido en la titulación (ml)

Posteriormente, se procede a realizar la gráfica entre la Función de Gran y el volumen de H_2SO_4 añadido (ver figura 3.3), en la cual se determina el punto de equivalencia que es usado para obtener la alcalinidad total a partir de la ecuación:

$$\text{Alcalinidad} \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{\text{ml totales de ácido (pto equiv)} \times N \text{ ácido} \times 50,000}{\text{Volumen alícuota}}$$

Por último, se determina la concentración de bicarbonato (HCO_3^-) a partir de la ecuación

$$HCO_3 = \text{Alcalinidad como } CaCO_3 \text{ (mg/l)} \times 1.22$$

La titulación de Gran para cada muestra tomada en el presente estudio se muestra en el anexo 3.

3.3.2. Manejo de datos químicos

Una vez se reciben los resultados analíticos fisicoquímicos del laboratorio se debe realizar un manejo de datos para que éstos puedan ser usados, esto incluye cambio de unidades (de $\mu\text{g/l}$ a mg/l), revisión de aquellos que son mayores o menores al límite de detección del aparato usado para determinar cada elemento, conversión de algunos elementos por compuestos (Si a SiO_4 y H_4SiO_4 , N- NO_3 a NO_3 , PO_4 a P) con base en el peso atómico y valencias de cada uno de ellos.

Posteriormente, es conveniente congregarse esta serie de datos químicos con aquellos datos físicos obtenidos en campo (conductividad eléctrica, temperatura del agua, pH), junto con el valor de bicarbonato (HCO_3) descrito previamente para incorporar los datos al programa AQUACHEM 4.0 y facilitar el análisis de los datos.

Para determinar la calidad de los datos de cationes y aniones producidos por el laboratorio se realiza el balance de electroneutralidad (% de error). Su fórmula es:

$$\% \text{ error} = \frac{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}} \times 100$$

Los cationes que generalmente se tienen en cuenta son magnesio, calcio, sodio, potasio y de los aniones se utilizan bicarbonato, nitrato, cloruro y sulfato. Para el cálculo se deben tener los elementos expresados en meq/l. Un análisis confiable corresponde con un porcentaje de error igual o menor a 5%; un error de hasta 10% se considera aceptable.

En el anexo 4 se presenta la tabla con los datos fisicoquímicos de mayor importancia para las muestras tomadas en el presente estudio, junto con su cálculo de error. En el caso de la muestra 101-2010 Salinas no se calcula su porcentaje de error ya que no se cuentan con algunos de los elementos, tales como calcio, nitrato y bicarbonato. Esto se debe a que el agua de esta muestra presenta valores muy elevados de sodio y cloruro, razón por la cual el laboratorio selecciona determinados límites de detección, que resultaron ser muy altos para el calcio y nitrato obteniéndose así valores menores a aquel límite, por lo que no se cuenta con su concentración. Por su parte, el bicarbonato no fue posible calcularlo debido a que no se cuenta con el equipo adecuado para su determinación en campo por ser agua de alta salinidad. No obstante, se considera viable usar los datos existentes de tal muestra teniendo en cuenta que de los errores obtenidos para las demás muestras, tan sólo una de ellas presenta valor mayor a 10% (muestra 31-2010 con 18% de error), el 55% y 40% de las muestras tiene un error menor del 5% y >5-10% respectivamente, lo que señala un 95% de confiabilidad en los datos analíticos de laboratorio considerando aceptables errores mayores a 5% pero inferiores a 10%.

Adicionalmente, el laboratorio realiza un control de calidad haciendo duplicado de un número determinado de muestras seleccionadas al azar garantizando de esta manera unos resultados más confiables. En la tabla 3.3 se muestra un ejemplo de este proceso para algunos de los principales elementos determinados.

Tabla 3.3. Control de calidad por parte del laboratorio, datos de muestras duplicadas

Analyte Symbol	Na	Ca	K	Mg	Li	Si	Mn
Unit Symbol	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Detection Limit	5	700	30	1	1	200	0.1
Analysis Method	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
68--2010 Orig	> 35000	> 20000	11000	5540	364	52600	0.3
68--2010 Dup	> 35000	> 20000	11000	5600	368	53400	0.4
64--2010 AC Orig	---	40400	---	---	---	---	---
64--2010 AC Dup	---	43100	---	---	---	---	---
132--2010 AC Orig	54200	24000	---	---	---	---	---
132--2010 AC Dup	55300	23700	---	---	---	---	---
137--2010 Orig	10700	> 20000	8400	910	15	41200	0.3
137--2010 Dup	11200	> 20000	8550	928	16	42000	0.3

3.3.3. Análisis hidrogeoquímico

A partir de los resultados del laboratorio, las características químicas del agua se manejan para realizar un análisis hidrogeoquímico y determinar la posible interacción del agua con las rocas por las que fluye a lo largo de su trayecto por el subsuelo.

Existen diversos parámetros físicos y químicos considerados trazadores naturales que facilitan la interpretación hidrogeoquímica, tales como la temperatura del agua, cloruro, sodio, litio, entre otros. Para la clasificación hidroquímica y definición de grupos de agua se realizaron gráficos de diversos parámetros fisicoquímicos mediante el programa AQUACHEM 4.0 para visualizar contrastes, analizar situaciones presentes y establecer posibles procesos, siempre teniendo en cuenta el referente geológico. Esto se realizó tanto para las muestras del estudio de CNA (1999) como para aquellas tomadas en campo durante el presente estudio (2010).

3.3.4. Definición de los sistemas de flujo

Por último, se hizo un análisis interdisciplinario de la información recopilada y generada en este estudio con el fin de definir la dinámica del agua subterránea y establecer en lo posible las zonas de recarga a través de su descarga asociada. A partir de la información física existente del área de estudio, se realizó un análisis de indicadores superficiales aplicando la superposición de polígonos para la delimitación de posibles zonas de recarga y descarga de agua subterránea. Por su parte, la información hidrogeoquímica aporta elementos sobre distancia y profundidad de recorrido del agua. Así, es posible separar los diferentes flujos dependiendo de su composición fisicoquímica relativa. La información isotópica y el contenido de litio permiten definir la edad relativa del agua, posición topográfica de su recarga y distancia de recorrido. Estas herramientas son útiles para identificar zonas de recarga y descarga, así como el recorrido correspondiente, lo que incluye plantear, por ejemplo, qué respuestas esperar a consecuencia de cambios producidos por la extracción presente o aquella que se pudieran plantear a futuro.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS

4. RESULTADOS

Teniendo en cuenta el funcionamiento sistémico de la naturaleza, la descripción y caracterización de cada uno de sus componentes (suelo, vegetación, relieve, agua) permite conceptualizar la dinámica del ambiente, lo cual es una herramienta útil para proponer su adecuada gestión. Adicionalmente, este conocimiento suministra información importante para cada rama de las ciencias naturales. Así la hidrogeología permite la posible ubicación de zonas de recarga y descarga de agua subterránea, debido a que la presencia de cierto tipo de suelo, vegetación, topografía, es respuesta a las características biofísicas del sistema existente en determinado lugar como lo señala la teoría de los sistemas de flujo (Tóth, 2000). A continuación se realiza el análisis de diferentes indicadores superficiales; sin embargo, cabe resaltar que este análisis permite la definición de zonas de recarga/descarga asociadas con flujos de tipo regional ya que éstos presentan los mayores contrastes con respecto a los flujos locales y, por ende, se debe continuar investigando posibles asociaciones de diversos elementos de la naturaleza para una mejor y detallada definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea.

4.1. Análisis de indicadores superficiales

4.1.1. Tipo de suelo

La definición de zonas de recarga y descarga con base en el tipo de suelo se basa en ciertas características específicas, las cuales son contrastantes entre estas dos zonas (ver tabla 4.1).

Tabla 4.1. Principales características del suelo en zonas de recarga y descarga

ZONA DE RECARGA	ZONA DE DESCARGA
Nivel del agua profundo	Nivel del agua somero
Suelo poco desarrollado	Suelo bien desarrollado
Suelo ácido	Suelo alcalino
Bajo contenido de sales y/o sodio	Alto contenido de sales y/o sodio
	Condiciones hidromórficas (moteado y concreciones de Fe y Mn; colores gley)
Bajo contenido de materia orgánica	Alto contenido de materia orgánica
	Mayor contenido de fracción arcillosa

Como se señala en el capítulo 2, punto 2.1.5 referente al suelo y vegetación, el grupo de suelo que tiene mayor presencia en el área de estudio es el xerosol. Sin embargo, para el análisis en relación con las zonas de recarga y descarga se deben contemplar los subgrupos debido a que los horizontes definidos son indicadores de características que permiten una mejor definición del comportamiento hidrológico. A continuación se realiza una breve descripción de las subunidades de suelo con base en la Guía para la interpretación de cartografía edafológica del INEGI (2004).

- Cálxico.- Del latín *calx*: cal. Suelos con una capa de color blanco, rica en cal, y que se encuentra en forma de polvo blanco o caliche. En los Castañozems esta capa tiene más de 15 centímetros de espesor. La acumulación de carbonatos puede presentar muy distinta morfología (FAO/UNESCO, 1998), dentro de las cuales se tienen: i) formas difusas constituidas por finos cristales de 1 mm o menos dispersos por la matriz del suelo, ii) concentraciones discontinuas como pseudomicelios, cútanos (revestimientos), nódulos

(duros o blandos) o venas. Cuando la acumulación de carbonatos es tal que desaparecen la mayoría de los otros rasgos y prevalece una continua presencia de carbonatos, el horizonte es llamado "hipercálcico" (su contenido mínimo es del 50%).

- Calcárico.- Del latín *calcareum*: calcáreo. Suelos ricos en cal y nutrientes para las plantas.
- Crómico.- Del griego *kromos*: color. Es suelo de color pardo o rojizo, en algunas ocasiones amarillento; es de fertilidad moderada y con alta capacidad para proporcionar nutrientes a las plantas.
- Eútrico.- Del griego *eu*: bueno, es suelo ligeramente ácido a alcalino y más fértil que el suelo dítrico. En el caso del Regosol eútrico: Rico o muy rico en nutrientes o bases (Ca, Mg, K, Na), dentro de 50 cm de profundidad (INEGI, 2004).
- Gypsico.- Del latín *gypsum*: yeso, es suelo de zonas áridas o semiáridas que presenta una capa de yeso acumulado en forma de cristales. En ocasiones esta capa es de color rosado claro
- Háptico.- Del griego *haplos*: simple, es suelo que no presenta características de otras subunidades existentes en ciertos tipos de suelo.
- Húmico.- Del latín *humus*: tierra, es suelo con una capa superficial oscura y rica en materia orgánica, ácida y pobre en algunos nutrientes importantes para las plantas
- Lúvico.- Del latín *luvi*, luo: lavar; es suelo con acumulación de arcilla en el subsuelo, es generalmente de color rojizo o pardo oscuro
- Mólico.- Del latín *mollis*: suave, es suelo con una capa superficial suave, oscura, fértil y rica en materia orgánica.
- Órtico.- Del griego *orthos*: recto, derecho; es suelo que no presenta características de otras sub-unidades existentes en ciertos tipos de suelo.
- Pélico.- Del griego *pellos*: grisáceo. Sub-unidad exclusiva de los Vertisoles; indican un color negro o gris oscuro.

En la tabla 4.2 se muestra la asociación que se determinó en la presente investigación entre el tipo de suelo existente en el área de estudio y las zonas de recarga/descarga basándose en las características de cada tipo de suelo. No se incluyen aquellos a los que no se les encontró relación alguna.

Tabla 4.2. Asociación tipo de suelo-zona de recarga/descarga

	SUBGRUPO	ZH
Xk	Xerosol cálcico	Descarga
Xg	Xerosol gypsico	Descarga
Hh	Feozem haplico	Recarga?
We	Planosol eútrico	Descarga
Wm	Planosol Mólico	Descarga
I	Leptosol	Recarga
Rc	Regosol calcárico	Recarga
Re	Regosol eútrico	Descarga?
Be	Cambisol eútrico	Recarga
Bh	Cambisol húmico	Recarga
Je	Fluvisol eútrico	Descarga
Kk	Castañozem cálcico	Descarga
Lc	Luvisol cromico	Recarga
Lo	Luvisol ortico	Recarga
E	Rendzina	Recarga

Así, se obtuvo que los suelos asociados con zonas de descarga son: Xerosol cálcico y gypico, Fluvisol eútrico, Castañozem cálcico, Regosol eútrico, Planosol eútrico y molico. Por su parte, aquellos grupos de suelo asociados posiblemente con zonas de recarga son: Leptosol, Regosol calcárico, Cambisol eútrico y húmico, Luvisol cromico y ortico, Rendzina y con mayor grado de incertidumbre el subgrupo Feozem háplico (ver figura 4.1).

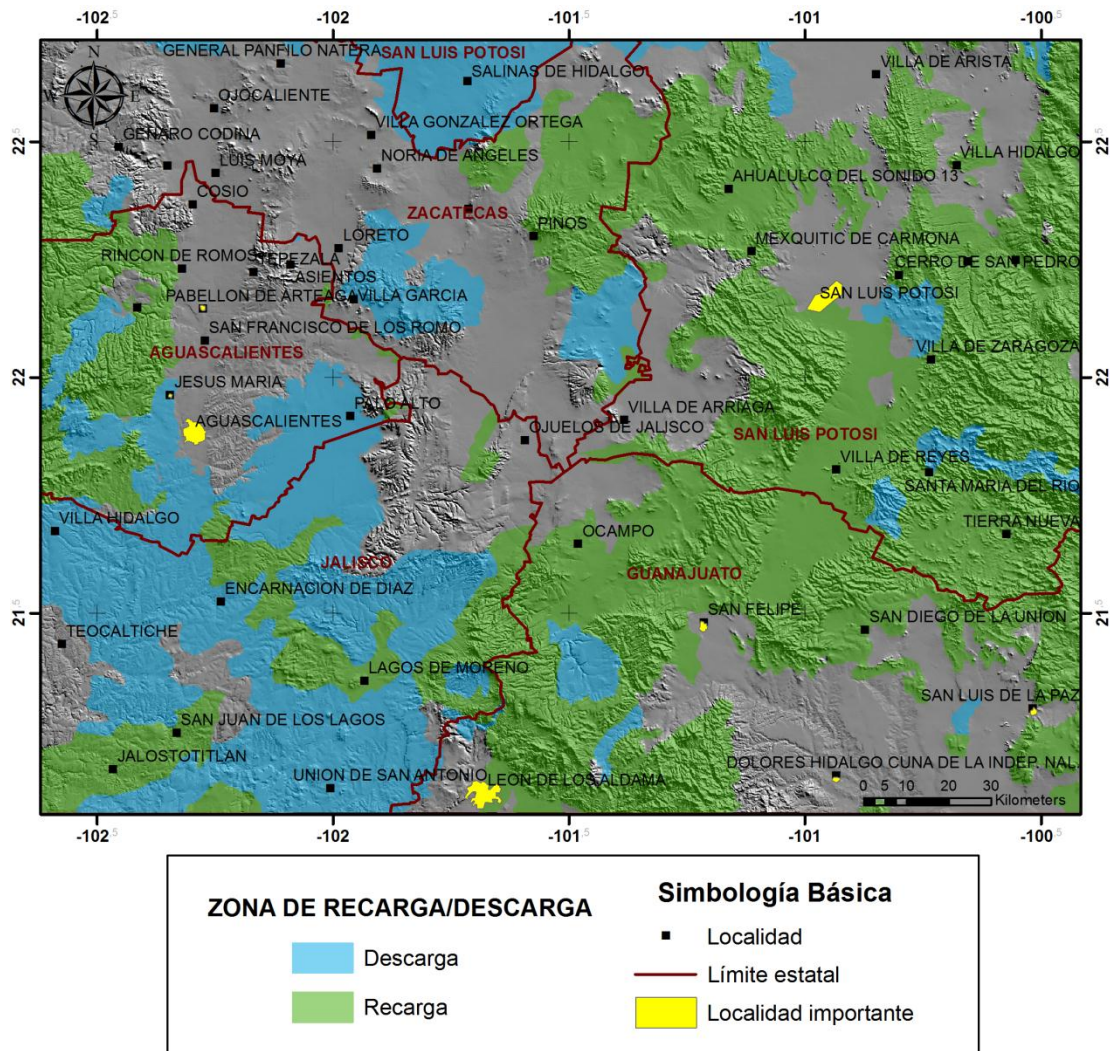


Figura 4.1. Zonas potenciales de recarga y descarga en el área a partir de tipo de suelo

4.1.2. Vegetación

De acuerdo con la teoría de los sistemas de flujo (Tóth, 2000), la vegetación que se encuentra en zonas de descarga de flujos regionales debe ser tolerante a una alta concentración de sal (veg. Halófila), yeso (veg. Gipsófila) y/o sobrevivir en regiones permanentemente inundadas (veg. Freatófitas) debido a que el nivel freático es somero. Por otro lado, la vegetación asociada con zonas de recarga es de tipo xerófitas, es decir, que está adaptada a ambientes secos, presentan raíces largas para tratar de alcanzar el agua en el subsuelo teniendo en cuenta que en estas zonas el nivel freático es profundo, sin embargo, la definición de vegetación ligada a zonas de recarga es más difícil que aquella de descarga. A continuación se realiza una breve descripción de la vegetación presente en el área de estudio para visualizar sus principales características con base en la

información de la página web de la Comisión Nacional Forestal (CONABIO, 2009) a excepción del bosque de coníferas.

- *Pastizal natural*

Esta es una comunidad dominada por especies de gramíneas, su principal área de distribución se localiza en el área de transición entre el matorral xerófilo y la de bosque; se le denomina como Bosque Bajo y Abierto hacia sus límites con el bosque de encino debido a la apariencia de los primeros encinares de las partes elevadas. Los árboles presentan una altura media de 0.2 a 0.7 m. Sin embargo, el intenso pastoreo ocasiona que se mantengan casi siempre más abajo. Durante la mayor parte del año su coloración es amarillenta pálida y sólo reverdece en la época más húmeda, señalando así una relación con el agua de lluvia por lo que se considera en el presente estudio como vegetación asociada a zonas de recarga.

- *Matorral*

- *Sarcocrasicaule*

Esta es una comunidad vegetal con gran número de formas de vida o biotipos, entre los que destacan especies sarcocaulales y crasicaules, cuyo tallo es grueso carnoso y succulento-jugoso, respectivamente. Estos se han descrito como que predominan en la porción central de Baja California sobre terrenos ondulados graníticos y coluviones. Por su parte, en el área de estudio parece estar asociado con las ignimbritas, riolitas, granodioritas y algunos depósitos aluviales.

- *Desértico micrófilo*

Esta unidad corresponde a matorral que es característico de zonas áridas y semiáridas, constituido por arbustos de hoja o foliolo pequeño, se desarrolla especialmente sobre terreno aluvial, no siendo la excepción en el área de estudio. Puede estar asociado con especies sin espinas, con espinas o mezclados y en su composición pueden estar otras formas de vida como las cactáceas, izotes o gramíneas.

- *Espinoso tamaulipeco submontano y subtropical*

En esta comunidad arbustiva dominan las especies espinosas, caducifolias gran parte del año o áfilas (sin hojas), se desarrolla en zonas amplias de Selva Baja Espinosa. Actualmente puede ser considerada como vegetación secundaria debido a la alta perturbación que presenta, especialmente por "tumba" y sobrepastoreo. Sus especies arbustivas presentan una altura de 1.5 a 2.0 m de altura, entre los cuales, muchos forman parte del estrato arbustivo de otro matorral o mezquital aledaño. La actividad pecuaria es su principal uso.

- *Desértico rosetófilo*

En esta vegetación dominan las especies con hojas en roseta, con o sin espinas, sin tallo aparente o bien desarrollado. Generalmente se encuentran sobre suelo de tipo xerosol en laderas de cerros de origen sedimentario, en las partes altas de abanicos aluviales o sobre conglomerados en casi todas las zonas áridas y semiáridas del centro, norte y noreste del territorio nacional. Los principales usos de este matorral son: obtención de fibra vegetal útil en cordelería y jarciería en general, y la celulosa para papel, asimismo se emplea para la elaboración de bebidas alcohólicas y alimento para ganado.

- *Bosque de encino*

Este bosque está constituido por diferentes especies de encino o roble del género *Quercus*, puede alcanzar 4 a 30 m de altura, se desarrolla en gran variedad de condiciones ecológicas, con excepción de clima muy árido, se encuentran desde casi a nivel del mar hasta los 3,000 m de altitud y su distribución geográfica en el territorio nacional es muy amplia. Generalmente, se encuentran como una transición entre el bosque de coníferas y la selva, asimismo, presenta una relación importante con comunidades de pino haciendo difícil su cartografía. Su principal uso es para fines forestales que incluye la extracción de madera, elaboración de carbón y para uso doméstico haciendo que esta vegetación tienda a fases secundarias y quede incorporada a la actividad agrícola y pecuaria.

- *Bosque de pino*

Este bosque está formado por árboles del género *Pinus*, de amplia distribución y con aproximadamente 49 especies, 18 variedades y 2 subespecies en las cadenas montañosas de todo el país. Se ubica desde los 300 hasta los 4,200 m de altitud que corresponde este último con el límite altitudinal de la vegetación arbórea. La altura promedio de diferentes especies de pino es de 15 a 30 m. Esta comunidad es la de mayor importancia económica en la industria forestal del país, se usa para aserrío, resinación, obtención de pulpa para celulosa, postería y recolección de frutos y semillas. Este tipo de bosques se relaciona ampliamente con zonas de recarga de agua al subsuelo como se aprecia en los fundamentos de los servicios ambientales hidrológicos en el territorio nacional; no obstante, no existen estudios científicos que demuestren claramente esta hipótesis. En la definición de zonas de recarga para la parte sur de la cuenca de México, Peñuela-Arévalo (2007) encuentra una posible asociación entre zonas de recarga y bosques de pino y oyamel; sin embargo, este resultado es de tipo cualitativo y en tal estudio se recomienda la realización de investigaciones más detalladas al respecto para poder asegurar tal afirmación con mayor sustento científico.

- *Chaparral*

Esta vegetación está constituida por arbustos resistentes al fuego, que se desarrollan especialmente en laderas de cerros por arriba del nivel del matorral de zonas áridas y semiáridas con pastizal natural, en ocasiones mezclada con bosque de pino y encino. Se desarrolla sobre suelos someros, poco fértiles, de textura granular que no permiten la existencia de vegetación boscosa, o bien desarrollándose como comunidad secundaria en sitios donde tal vegetación ha sido destruida; este escenario nos indica una posible relación con zonas de recarga. Su principal uso es la obtención de madera para leña, no obstante, en áreas con esta vegetación se practica pastoreo de ganado caprino y bovino principalmente.

- *Mezquital-Huizachal*

Como su nombre lo indica, el Mezquital corresponde con una comunidad vegetal donde predomina el mezquite (*Prosopis* spp.), árbol espinoso que alcanza una altura de 5 a 10 m en condiciones de humedad pero que en circunstancias de aridez se desarrolla como arbusto. Se encuentra frecuentemente en suelo profundo, aluvión cercano a escorrentía y mezclado con otros elementos como el huizache (*Acacia* spp.). Presenta diversos usos de importancia para el país, principalmente como alimento para ganado, consumo humano, madera que se aprovecha en usos diferentes, leña y carbón, etc. Lamentablemente, es eliminado constantemente para convertir el terreno para la agricultura. Por su parte, los

Huizaches se usan como forraje para ganado caprino y las ramas secas para uso doméstico.

- *Bosque de coníferas (no pinus)*

Comunidad compuesta por árboles perennifolios tales como: oyamel (*Abies*), pinabete (*Pseudotsuga*), enebro (*Juniperus*), cedro (*Cuppressus*). Generalmente se encuentran en regiones templadas y frías de las partes altas de las cordilleras, presentando una amplia diversidad florística y ecológica (SEMARNAT, 2009). Este bosque se presenta en altitudes que van desde el nivel del mar hasta el límite de la vegetación arbórea, no obstante, varias especies sólo existen en condiciones edáficas especiales (Rzedowski, 2006). Algunos bosques parecen representar comunidades secundarias por el disturbio del ser humano y otras parecen haber existido en México desde hace muchos millones de años (Rzedowski, 2006).

En la tabla 4.3 se muestra la probable relación que se determinó en la presente investigación entre el tipo de vegetación existente en el área de estudio y las zonas de recarga/descarga, basándose en las características de las diversas comunidades. Teniendo en cuenta la gran distribución espacial (altitudinal) del pastizal natural se determinó su asociación con zona de recarga tan sólo para aquellas regiones cuya elevación topográfica fuera igual o mayor a los 2,300 m snm, las partes restantes ubicadas bajo tal cota con presencia de pastizal se dejó sin relación alguna, al igual que aquellas regiones catalogadas por la CONABIO (1999) con manejo agrícola, pecuario y forestal (ver figura 4.2). Cabe resaltar que estas zonas excluidas pueden estar igualmente asociadas con zonas de recarga/descarga, por lo que es importante continuar con estudios locales para realizar una asociación más detallada con estas dos variables, así como otras.

Tabla 4.3. Asociación tipo de vegetación-zona de recarga/descarga

VEGETACIÓN	ZH
Pastizal natural	Recarga (altitudes ≥ 2300 m snm)
Bosque de encino	Recarga
Bosque de pino	Recarga
Chaparral	Recarga
Mezquital-Huizachal	Descarga
Bosque de coníferas (no pinus)	Recarga
Vegetación halófila y gipsófila	Descarga

4.1.3. Elevación topográfica

Las mayores altitudes en la República Mexicana se localizan sobre el CVTM. El pico de Orizaba es el volcán con mayor elevación topográfica del país alcanzando los 5,675 m snm (Yarza, 1992), le sigue el volcán Popocatepetl con una altura de 5,452 m; el volcán Iztaccíhuatl o "Mujer Blanca" que por su parte cuenta con tres alturas: la cabeza con 5,146 m, el pecho con 5,286 m y los pies con 4,740 m snm (Yarza, 1992). En el área de estudio, las mayores elevaciones topográficas se encuentran al oeste del área de estudio, alcanzando los 3,000 m en Sierra Fría, hacia los límites de los estados de Aguascalientes y Zacatecas. Sin embargo, teniendo en cuenta la teoría de los sistemas de flujo (Tóth, 2000) no se descarta la posibilidad de recarga de agua de flujos regionales desde aquellas sierras más altas del país, en especial las del Nevado de Toluca, Popocatepetl e Iztaccíhuatl por su cercanía al área de estudio.

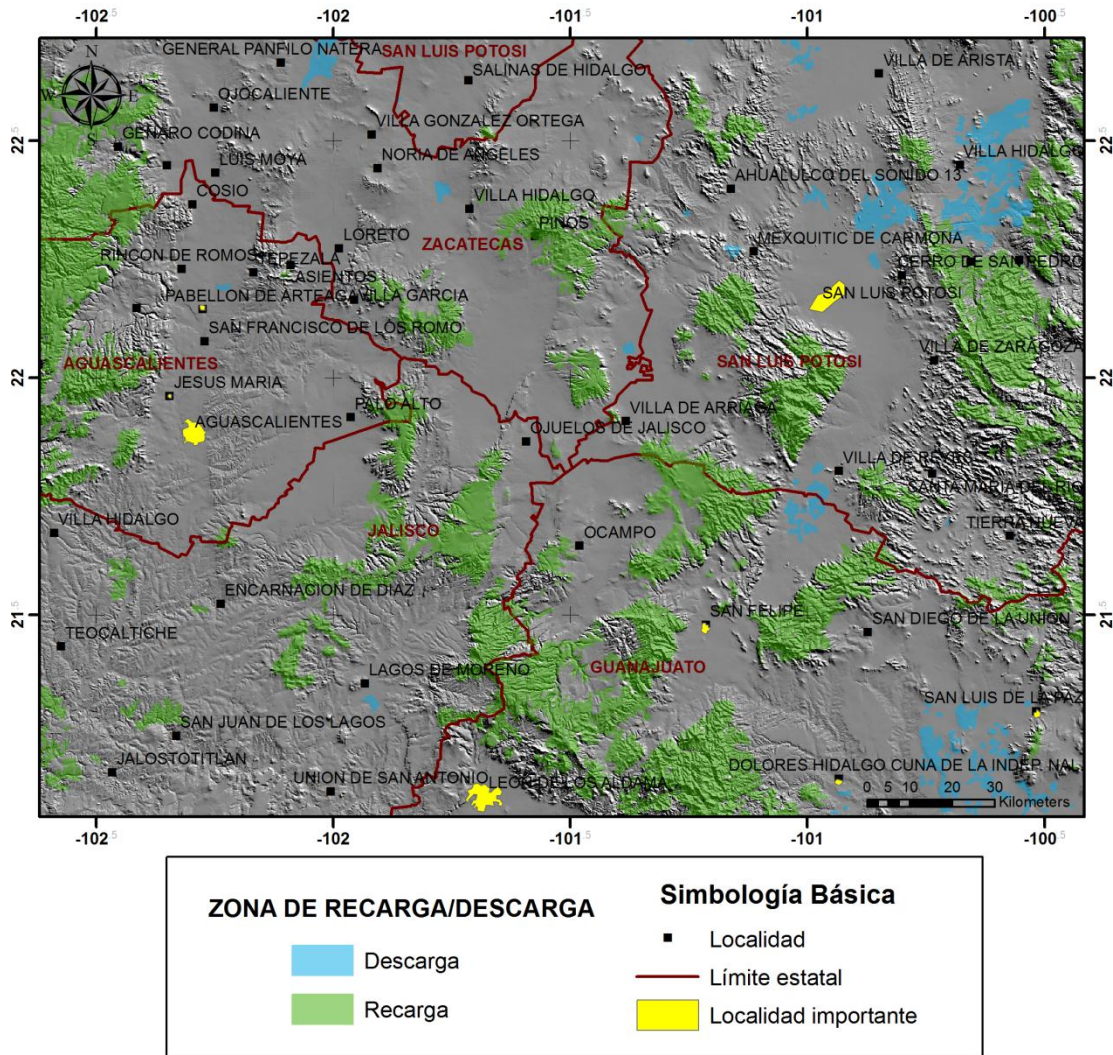


Figura 4.2. Zonas potenciales de recarga y descarga en el área a partir de la vegetación

Molina-Maldonado (1996) señala que la zona de descarga para la región de Aguascalientes se localiza de la altitud de 2,000 m snm hacia abajo, por lo que en el presente estudio se mantendrá tal teoría. Por su parte, se considera viable establecer la curva de 2,300 m como el inicio de zona de recarga para diferentes sistemas de flujo debido a que es la altitud aproximada donde se presenta el cambio de pendiente entre el lomerío y el piedemonte. La figura 4.3 muestra las posibles zonas de recarga y descarga para el área de estudio con base en la elevación topográfica, sin embargo, se aprecia que la descarga abarcaría bastante superficie del área de estudio, cuya porción oeste puede ser posible de acuerdo con la revisión histórica que se realizó (ver ítem 4.1.5. Hidrología histórica), por su parte, existen dudas con respecto a la porción establecida como descarga al este del área de estudio debido a que no se tiene información histórica que valide tal suposición.

Cabe señalar que estos resultados no significan que toda el área catalogada como descarga corresponda con un gran lago antiguo o algo semejante sino que simplemente brindan una idea de la localización de zonas donde el nivel freático era somero (inicialmente sin los efectos por la intensiva extracción del agua subterránea o actividad antrópica) y por tanto donde se tenía la posible presencia de manantiales.

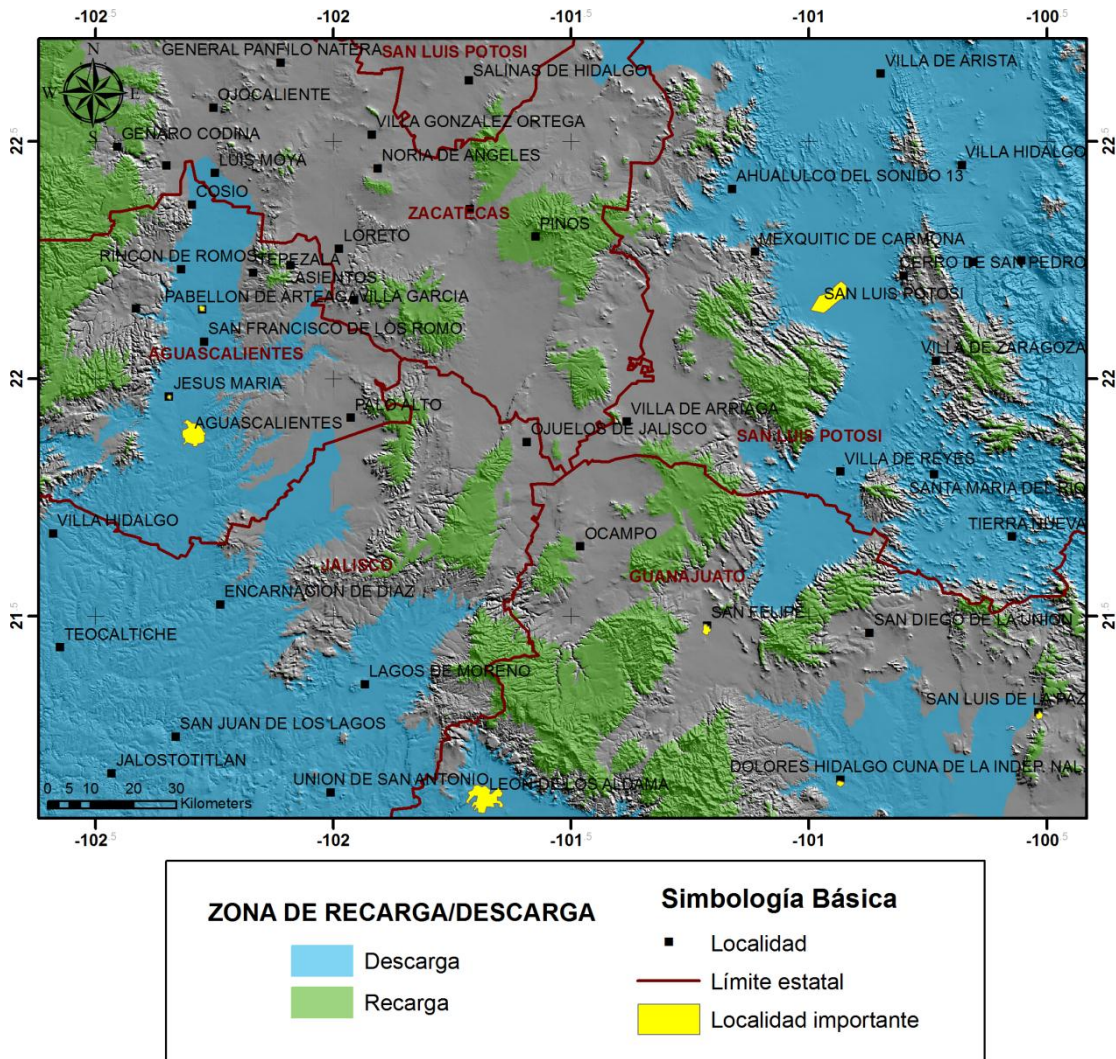


Figura 4.3. Zonas potenciales de recarga y descarga en el área a partir de la elevación topográfica

4.1.4. Litología

Un aspecto importante para la búsqueda de zonas de recarga/descarga es el relacionado con la litología debido a que sus propiedades hidrogeológicas determinan los procesos que se puedan originar en determinado lugar. Por ejemplo, al precipitarse agua en un área montañosa pueden ocurrir dos cosas, una es que el agua escurra por el terreno y otra opción es que se infiltre. Este comportamiento se debe al control de la velocidad de movimiento del agua en las formaciones geológicas por la conductividad hidráulica (K). En este apartado se considera conceptualmente como "permeabilidad" la cual puede presentar la facilidad o dificultad del agua para moverse en un material. Para el primer caso se considera que el material es de muy baja permeabilidad o conocido como "impermeable" (sin embargo, esto no existe en la naturaleza), un segundo caso es el material que permite la entrada y flujo de agua por una moderada permeabilidad, el tercero sería un material muy permeable.

El procedimiento para definir las zonas de recarga con base en la litología consistió primero en la selección de las unidades litológicas del área de estudio que se ubican sobre los 2,300 m snm o elevaciones mayores. Posteriormente, a cada una de esas rocas se les asignó un atributo denominado "propiedad" que hace referencia al grado de permeabilidad. Al igual que Carrillo-Rivera (1992) en el presente estudio se clasifican como rocas de muy baja permeabilidad a las calizas Cretácicas, cuerpos ígneos intrusivos y capas de arcilla. Las ignimbritas por su parte corresponden con rocas de moderada permeabilidad y aquellas otras volcánicas Terciarias presentan una alta permeabilidad debido principalmente a que se encuentran fracturadas. Por último, el material granular se asocia igualmente con una alta permeabilidad. En la tabla 4.4 se exhiben estos resultados, cabe señalar que la columna de clave es con relación a la nomenclatura que usa el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1997a, b, 1998a, b). Por su parte, la representación espacial de tales resultados se muestra en la figura 4.4.

Tabla 4.4. Permeabilidad (relativa) de las unidades litológicas del área de estudio

LITOLOGÍA	CLAVE	PERMEABILIDAD
Limolita-Caliza; Lutita-Caliza	JKtLm-Cz; JsKiLu-Cz	Muy baja
Caliza; Caliza-Lutita; Caliza-Filita	JoCz, Ki?MCz, KaceCz, KhbCz, KtCz; KaceCz-Lu, KapCz-Lu, KbevCz-Lu, KiCz- Lu, KtCz-Lu, KtMg-Lu; KiCz-F	Muy baja
Diorita; Granodiorita; Granito; Gabro; Pórfido Riolítico	Js(?)D; KsGd; TeGr, TpgGr; ToGa; TnPR	Muy baja
Arenisca-Filita; Arenisca-Lutita	JsAr-F; KseAr-Lu; KseLu-Ar, KsLu-Ar	Muy baja
Basalto; Basalto-Filita	JsB; JsKi(?)B-F	Baja
Tonalita; Esquisto-Filita; Ultramáfica; Volcano-sedimentario	JsTn; TRsE-F; JsUm; JsVs	Baja
Aluvial, Arenisca-Conglomerado polimictico; Conglomerado Polimictico; Conglomerado Oligomictico	Qal; TmAr-Cgp, TnAr-Cgp; TpaeCgp, TeCgp, QptCgp, QCgp; TplCgo	Moderada
Andesita; Andesita-Dacita; Dacita- Andesita; Basalto	TeA; ToA; ToA-D; ToDa-A; TplQB, QB	Alta
Latita; Traquita; Riodacita; Traquiandesita	ToLa; ToTq; ToRd; QTqA	Alta
Riolita; Riolita-Toba Riolítica; Toba Riolítica	ToR; ToR-TR; ToTR-R; TomTR, ToTR	Alta
Ignimbrita; Ignimbrita-Toba Riolítica; Ignimbrita-Riolita	ToIg; ToIg-TR; ToR-Ig; TomIg-R; TeR- Ig	Alta

Evidentemente las rocas catalogadas como de muy baja permeabilidad no pueden estar relacionadas con zonas de recarga, por lo que deben ser eliminadas para tal definición, mientras que aquellas rocas de baja y moderada permeabilidad se consideran que están asociadas con zonas de recarga.

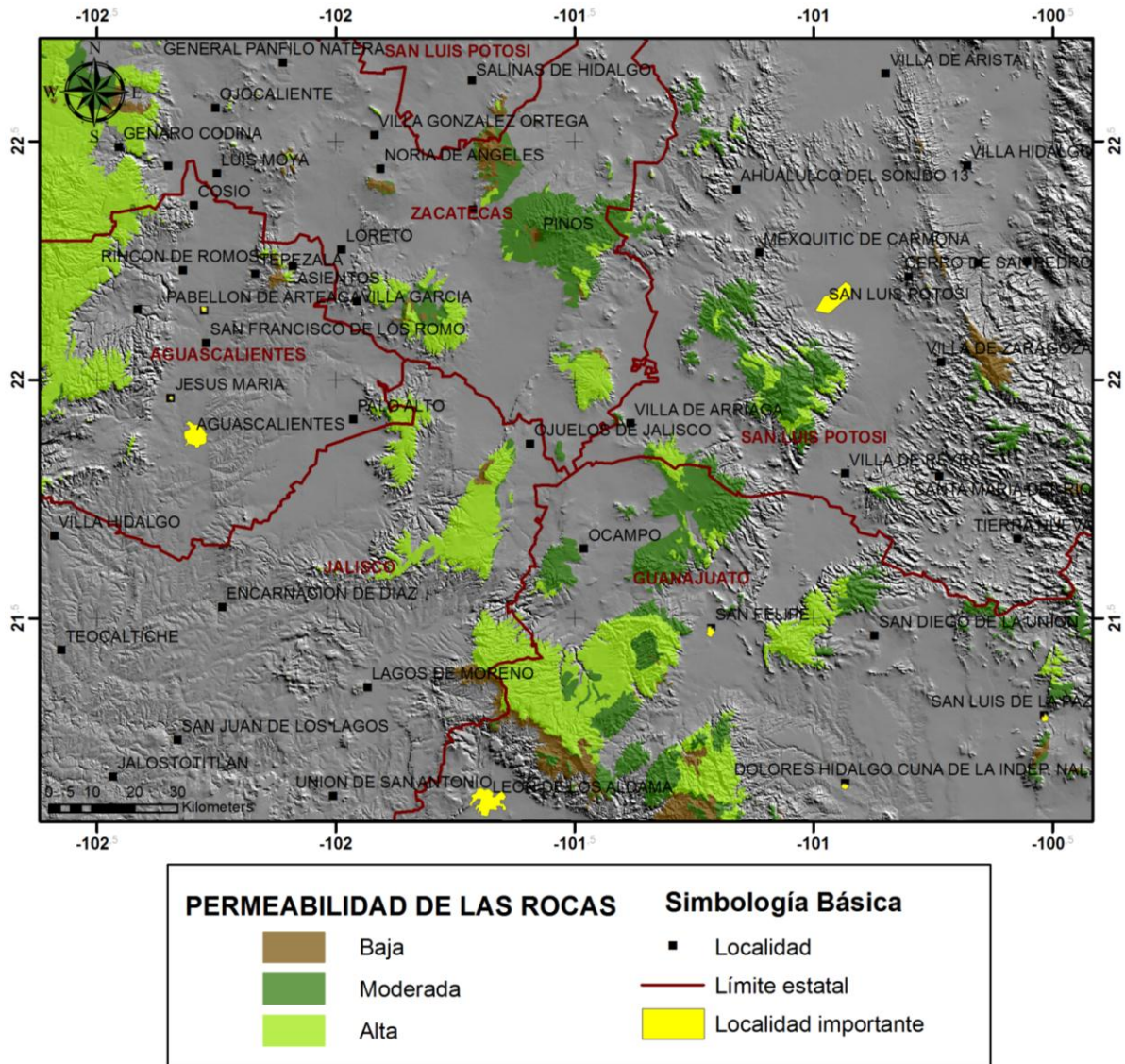


Figura 4.4. Permeabilidad de las unidades litológicas asociadas con posibles zonas de recarga

4.1.5. Hidrología histórica

Al finalizar la última glaciación llamada Wisconsiniana (18,000 – 21,000 A.P.; Sunsite, 2004), el clima del planeta comenzó a cambiar, haciéndose una marcada diferencia entre la porción centro-sur (zona fértil) y norte (árido) del territorio nacional, por lo que los historiadores denominaron a la primera como Mesoamérica y la segunda Aridoamérica (Kalipedia) (figura 4.5). No obstante, el límite entre estas dos áreas no era constante, es decir, cambiaba a lo largo del tiempo (Garza G, comunicación personal, 26 de enero de 2012); por lo que el área de estudio de la presente investigación pudo estar asociada en ocasiones con Mesoamérica y en otras con Aridoamérica. Este contraste geográfico entre las dos regiones ecológicas originó a su vez una diferencia cultural entre los grupos indígenas de cada una, donde evidentemente en Mesoamérica se desarrollaron grandes civilizaciones (mexicas, mayas, toltecas, etc.) ya que la multitud de clima y fertilidad del suelo permitió una mayor adaptación a la agricultura y sedentarismo, como en el caso de la cuenca de México, la cual llamó la atención de los indígenas por su abundante vida

silvestre, fertilidad del suelo y riqueza natural en general que era atribuida a la configuración física existente ligada al sistema lacustre (Rojas, 2004).

Por su parte, en Aridoamérica prevaleció el nomadismo sobre el sedentarismo posiblemente ligado con la falta de aspectos tan importantes como la lluvia, grandes corrientes fluviales y suelo fértil, limitando estas condiciones a una agricultura de temporal o subsistencia, por lo que la mayor actividad para ese entonces era la cacería, así como la recolección de plantas y frutos silvestres (Biblioteca digital-ILCE). Así, se aprecia que los núcleos de población en Aridoamérica eran pocos comparado con Mesoamérica (figura 4.5) debido principalmente a las condiciones ambientales existentes en cada una de esas dos regiones, confirmándose una vez más la relación existente entre presencia de agua (río, lago o manantial) y asentamientos humanos.

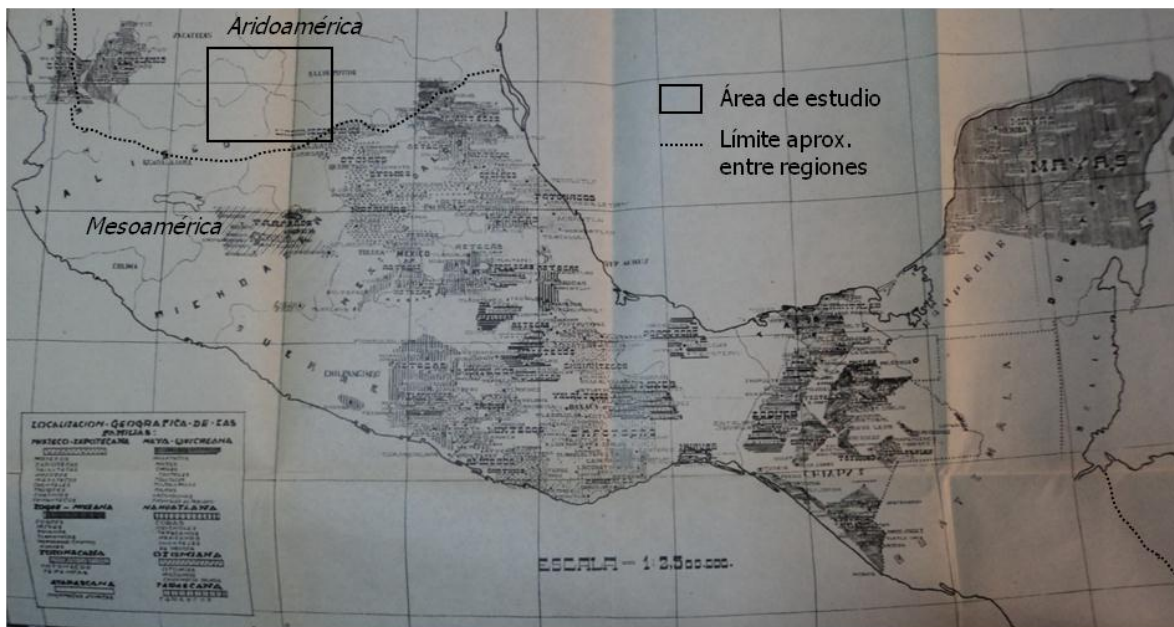


Figura 4.5. Localización de diversas familias indígenas, esta figura es sólo para apreciar que en el área de estudio no se presenta alguna. Fuente: Basauri, 1940

No obstante, a partir de la realización de estudios arqueológicos y antropológicos se ha encontrado evidencia de condiciones ambientales diferentes a las actuales, es decir, con presencia de ríos perennes, lagos, pantanos, bosques. De acuerdo con Weigand (2002), la zona de los Altos de Jalisco y la Ciénega de Mata (al norte) "integraban una sola zona ecológica generalizada, caracterizada por las montañas bajas y numerosas colinas, cuerpos de agua estancada, bosques abiertos, y bosques de galería densos, tupidos, a lo largo de muchos arroyos y ríos". Asimismo, el autor señala que diversos estudios arqueológicos (Ramos y López, 1996; López, Ramos y Santos, 1994; López y Ramos, 1999; Weigand y García de Weigand, 1999; Piña Chan y Taylor, 1976; Campanilla, 1974; citado por Weigand, 2002) demuestran que la zona de Los Altos mantuvo una población muy grande durante los períodos Formativo y Clásico Tardío (c 1-200 d.C y 200-700 d.C, respectivamente y antes de 1500 el área global estaba arbolada y bien irrigada.

Otra hipótesis sustenta que la ferocidad (perseverancia de defender lo suyo de las diversas familias prehispánicas) de los indígenas que componían la Gran Chichimeca fue

otra razón de importancia que no permitió la colonización del área de estudio. Un ejemplo que señala el INAFED (2005b) es el caso del primer español D. Diego de Ibarra quien construyó una hacienda en tierras laguenses pero que un grupo de chichimecas en el año de 1551 destruyó Estancia Grande y San Nicolás, matando asimismo todos sus animales, conduciendo a la pérdida de gran parte de sus bienes. De acuerdo con INAFED (2005b), en las primeras décadas de la Villa de Lagos, los "guamares" se convirtieron para los colonizadores en la "nación más valiente y belicosa, traidora y dañosa de todos los chichimecas". Los Guamares o Chichimecas blancos ocupaban parte de la planicie guanajuatense, Sierra de Comanja y Chichimequillas o Pechichitane, donde luego se fundaría Lagos; se indica que vivían entre calichales y tierras salitrosas, sugiriendo esto posiblemente su asociación con zonas de descarga hacia estas zonas.

Por su parte, en el área de Guanajuato se registra un aumento en la cantidad de asentamientos humanos en el Clásico (200/300 y 900 d.C), que inclusive llegan hasta el Gran Tunal (superficie que incorpora la actual ciudad de San Luis Potosí), como resultado de un cambio climático que hizo más propicias las condiciones para el desarrollo de la agricultura (Dosier-Arqueología Mexicana, 2008). No obstante, en el Posclásico (900-1521 d.C) se señala un abandono total por parte de los grupos agrícolas de la región al norte del río Lerma (sur del área de estudio) atribuido igualmente a una evolución del clima hacia condiciones áridas, quedando tan sólo habitada la zona por cazadores-recolectores nómadas y agricultores semisedentarios (Dosier-Arqueología Mexicana, 2008). Weigand (2002) señala que el deterioro del ambiente o cambio en el entorno natural se inició por la introducción de la economía colonial, las haciendas, falta de administración en el aprovechamiento del agua, prácticas agrícolas, deforestación y pastoreo de ovejas, afectando en mayor proporción la zona de la Ciénega debido a la cercanía de trabajos mineros y su industria.

A pesar que actualmente se visualiza un paisaje semiárido con poca vegetación, principalmente matorral y pastizal, se tiene evidencia arqueológica (Cóporo - Torreblanca, 2008) que sugiere condiciones ambientales diferentes, con presencia de ríos perennes, vegetación de bosque y sombra, etc. Asimismo, se encuentran algunos relatos donde se describen algunas partes del área de estudio donde se aprecian algunas condiciones físicas naturales que brindan una idea del paisaje antaño, por ejemplo, el capitán Nicolas de Lafora va narrando el panorama con el que se encuentra a lo largo de sus viajes para la formación de un mapa para el Estado español durante los años 1766-1768 (Robles, 1939). Con el relato del capitán de Lafora se aprecia que desde ese tiempo los pobladores buscaban diferentes mecanismos para la obtención de agua, ya fuera a través de presas, pozos, arroyos, etc., por lo que es evidente que en ese entonces el paisaje se tornaba un poco más verde, tierra más fértil que la actual, rica en cultivos; sin embargo, es claro que el agua no era tan abundante como en el caso de la cuenca de México, en Mesoamérica.

El inicio de la transformación del paisaje ocurrió desde antes de este período descrito por el capitán, lamentablemente no se cuenta con suficientes registros que lo documenten; sin embargo, indiscutiblemente la modificación del entorno se ha pronunciado con la presencia del ser humano, debido principalmente a las actividades agrícola, pecuaria, urbanización, etc., todo esto implicando un cambio de uso del suelo que finalmente repercute en el funcionamiento del ambiente. La figura 4.6 corresponde con un mapa de Aguascalientes para el año 1857 que muestra la existencia para ese entonces de diversas

presas en la región, mostrando así la incidencia de las actividades humanas en la transformación del paisaje. Asimismo, la toponimia existente en el área de estudio supone la presencia de agua en diferentes lugares, cuyos nombres indican la posible existencia de zonas de descarga, como es el caso de Ojo Caliente, San Juan de los Lagos, Lagos de Moreno, Ojuelos, El Ojo de Agua, entre otros.

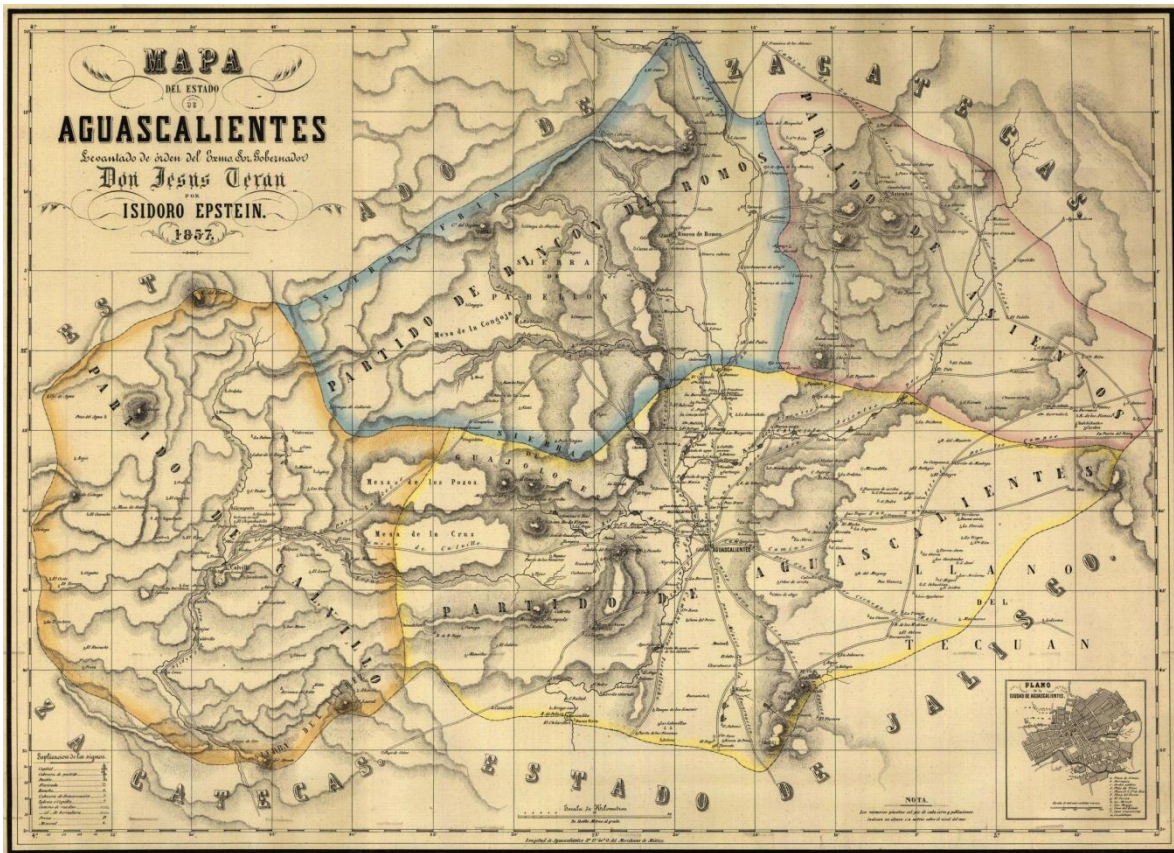


Figura 4.6. Mapa del estado de Aguascalientes, 1857. Mapoteca Manuel Orozco y Berra

En el atlas de la República Mexicana de 1858 se menciona que el estado de Aguascalientes debe su nombre a la abundancia de fuentes termales, de las cuales las más notables eran: "la de la capital y la de la hacienda de la Canteras, y en el partido de Calvillo las de Ojocaliente y Ojocalientillo", asimismo, señalan que "en la Sierra existen multitud de ojos de agua como el de la Ardilla y el de la hacienda del Pabellón, que son los más notables" (García y Cubas, 1858). De igual modo, Molina-Maldonado (1996) menciona que el nombre de Aguascalientes se relaciona con los manantiales que hasta hace cuando menos 30 años descargaban en la zona de Ojo Caliente como agua termal. Diversas fuentes (INEGI, 1993; CAPAMA, CNA, 1994; citados por Molina-Maldonado, 1996) mencionan que los manantiales de Ojo Caliente aseguraron la supervivencia de la población por más de 300 años, desde la fundación de la Villa de Aguascalientes en 1575, a lo largo de toda la época colonial y el siglo XIX. La misma autora se refiere a otros indicadores (presencia de vegetación freatofita, salinidad en el agua, nivel freático somero, suelo salino) que sugieren la presencia de zonas de descarga en algunas partes de tal estado, como es el caso de la existencia de un lago perenne dentro del área que ocupa actualmente la ciudad, presencia de pequeños escurrimientos perennes hacia el valle del río Chicalote, una zona entre el poblado del Salitrillo y Rincón de Romos (sobre la

carretera federal No. 45) que se asocian con diferentes tipos de flujo, regional en el caso de este último.

En la figura 4.7 se exhibe el mapa de ubicación de manantiales de aguas termales que publicó la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1976 donde claramente se observa una apreciable cantidad de éstos, por ejemplo, en el estado de Aguascalientes. De igual modo, se cuenta con la información que generó la Comisión Federal de Electricidad (Prol, 1988) que consiste en un mapa con la localización de manantiales termales para la República Mexicana (figura 4.8), información base que se incluye en el análisis histórico para la obtención de antiguas zonas de descarga en el área.

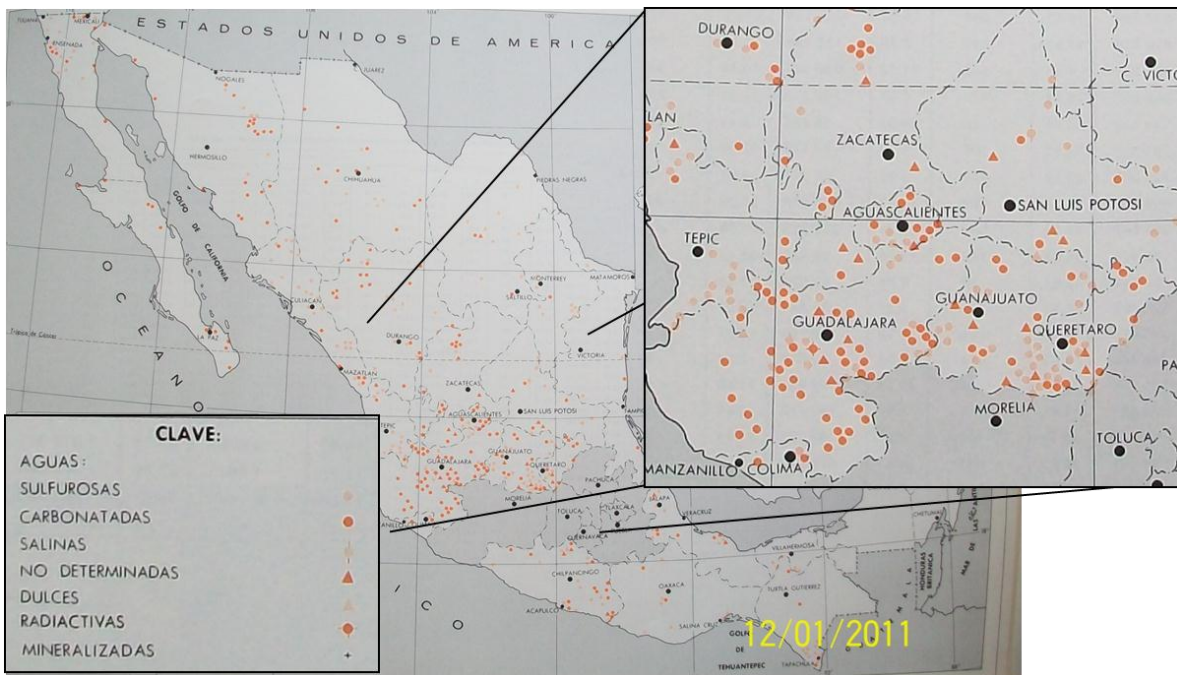


Figura 4.7. Manantiales de agua termal de México, década de los setenta (Fuente: SARH, 1976)

Otra evidencia de manifestación superficial de agua termal se aprecia en el estudio de Cardona (2007), quien infiere que la naturaleza del flujo del Grupo I (regional) definido en su trabajo para la región de SLP continua hacia el sur y sureste, donde en tiempos históricos descargaba tal agua de manera natural en la superficie alimentando el caudal base del río Santa María. Asimismo, Carrillo (1992) menciona varios manantiales termales reportados por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia como áreas naturales de descarga para el agua que se extrae en SLP, aunque muchos de ellos ya no existen. Entre los más importantes y activos son: Ojo Caliente, Labor del Río, Santa María del Río y las Rusias, cuyas temperaturas reportadas de esta agua van de 37 a 41°C (Carrillo, 1992). En caso de ser cierta dicha afirmación se tendría que el flujo subterráneo traspasaría los límites de las regiones hidrológicas administrativas que maneja hoy día la CONAGUA y resaltaría la importancia de hacer estudios hidrogeológicos con base en los sistemas de flujo.

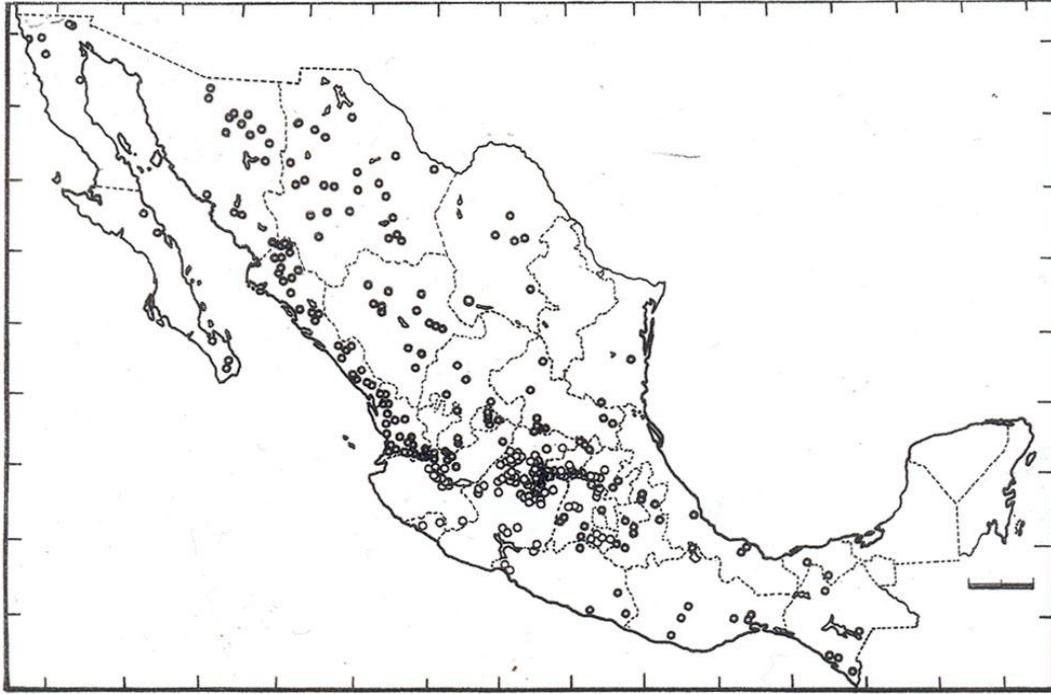


Figura 4.8. Manantiales termales en México, CFE (Fuente: Prol, 1988).

Por otro lado, el estudio geohidrológico del estado de Aguascalientes (SARH, 1987) corresponde con un análisis típico hidrológico que se basa en el balance hídrico y estudio de acuíferos por separado; sin embargo, se puede rescatar algo de la historia del agua en el estado de Aguascalientes que confirma nuevamente la posibilidad de esta región de corresponder con una antigua zona de descarga. Esto es: "En condiciones naturales, el comportamiento del flujo subterráneo era semejante al que observaba la red hidrográfica; ya que el agua del subsuelo circulaba de las áreas de recarga, aguas arriba, hacia las zonas de descarga, aguas abajo, controlada por la estructura geológica en los macizos montañosos, por la distribución espacial de la recarga y por la posición de los niveles base de descarga; probablemente una gran parte del volumen infiltrado alimentaba los acuíferos, y el resto circulaba a gran profundidad incorporándose a los sistemas regionales de flujo, mientras en el subsuelo de las zonas geohidrológicas, de acuerdo con la elevación y profundidad de sus niveles piezométricos las aguas fluían hacia los drenes fluviales aflorando a lo largo de los cauces, ascendían a la atmósfera por evaporación en las zonas de aeración o por transpiración a través de la vegetación freatofita y, la porción restante de ellas, continuaba su curso natural para alojarse en los rellenos de aluvión que subyacen las amplias planicies fluviales, pero al transcurrir el tiempo, con el crecimiento de los asentamientos humanos, de las áreas de producción agropecuaria y de los centros industriales, la extracción intensiva del agua, fue modificando gradualmente el comportamiento migratorio del agua en el subsuelo, ya que el abatimiento de los niveles por causa de la extracción, al orientar el sentido predominante del flujo subterráneo hacia las concentraciones del bombeo, ha disminuido y agotado los caudales que antaño circulaban con destino a las zonas de descarga natural, dando lugar incluso al fenómeno inverso, pues ahora son los decaídos cauces que existen en la entidad, los que infiltran parte de sus escasos escurrimientos al subsuelo".

Asimismo, en este estudio de la SARH se menciona que desde que se inició la extracción de agua subterránea por pozos en gran escala, los niveles del agua han venido descendiendo progresivamente en las áreas de bombeo, al grado que, en las proximidades del río Aguascalientes, donde en condiciones naturales afloraban las aguas del subsuelo, ahora los niveles freáticos se encuentran entre 60 y 80 metros bajo la superficie del terreno; en el lapso de 1971 a 1986 se registraron en la zona de Aguascalientes abatimientos de orden superior a los 15 metros; en el periodo 1982-1987, la tendencia descendente se extendió a la zona de El Llano, y el ritmo de abatimientos en la entidad para ese entonces variaba entre 0.3 y 1.5 metros por año. Ante la gravedad de la excesiva extracción y sus consecuencias, con el objeto de localizar fuentes subterráneas independientes de las ya aprovechadas, se efectuaron exploraciones y estudios geohidrológicos para aquel tiempo, cuyos resultados permitieron anticipar lo que se plantea actualmente, que efectivamente existen almacenamientos subyacentes a los captados por los pozos actuales; que se encuentran hidráulicamente interconectados, por lo que tarde o temprano, la extracción en los estratos superiores trascenderá a los inferiores, acentuando los efectos negativos observados induciendo agua de flujos más profundos.

Con base en la recopilación histórica de la hidrología en el área de estudio, la ubicación de manantiales termales (SARH, 1976; CFE-Prol, 1988) y presencia de ríos o corrientes perennes tomados de la cartografía del INEGI (2000a) se realizó un mapa que incorpora de manera general la ubicación de aquellas regiones que presentaban alguna manifestación de descarga de agua subterránea hasta hace unos 100-150 años (ver figura 4.9). Este análisis permite obtener una visualización del funcionamiento hídrico natural (o menos modificado) del área de estudio.

Teniendo en cuenta la gran alteración que se presenta en parámetros físicos del área de estudio, como vegetación y suelo, se considera que los resultados obtenidos a través del análisis histórico es el más confiable para la ubicación de zonas de descarga. Por su parte, la elevación topográfica arrojó resultados cercanos al histórico; sin embargo, se tienen algunas dudas sobre la porción noreste del área que de acuerdo con la elevación estaría asociada con zonas de descarga, sin embargo, no se tienen evidencias históricas que validen tal posibilidad.

Desde el punto de vista de los sistemas de flujo de agua subterránea, la reconstrucción histórica indica que en el área de estudio se presentan las tres diferentes zonas hidrológicas (recarga, tránsito y descarga), con presencia de manantiales termales, en especial en el estado de Aguascalientes, que son la manifestación en superficie de posibles flujos regionales, junto con aquellos otros manantiales termales hacia Santa María del Río, SLP. Por su parte, la presencia de lagos naturales que se señalan en los relatos históricos, tales como Ciénega de Mata, Altos de Jalisco y los nombres de localidades que hacen referencia a presencia de manantiales o cuerpos de agua (Ojuelos, Lagos de Moreno, Ojo de Agua, etc.) pueden estar asociados con zonas de descarga de flujo local.

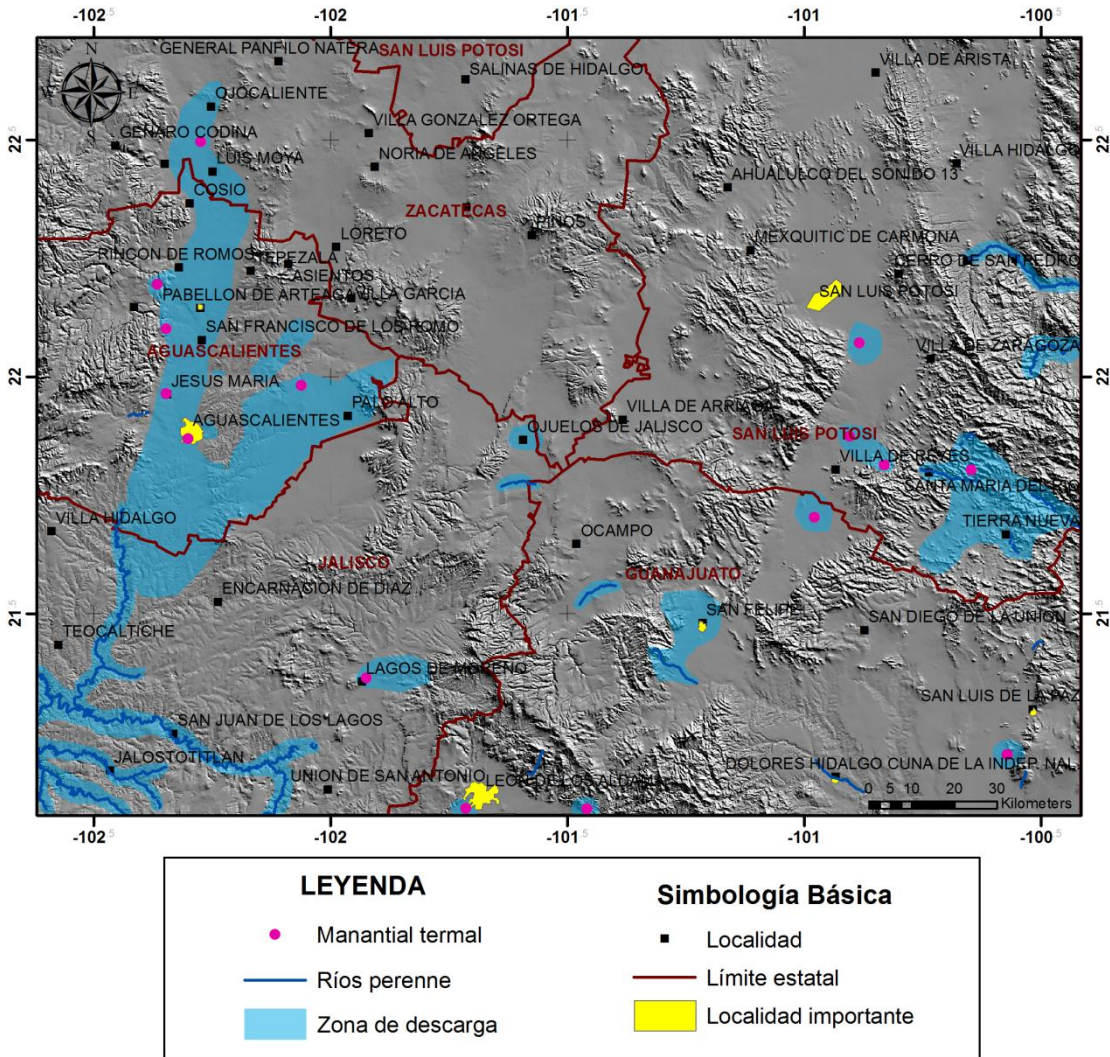


Figura 4.9. Zonas potenciales de descarga con base en información histórica, los manantiales termales son extraídos del mapa de la CFE (Prol, 1988).

Por otro lado, resulta interesante ver que desde 1963 que se estableció la zona de veda del Estado de Aguascalientes, mediante Decreto publicado en el Diario oficial de la Federación el día 24 de mayo de 1963, sigue el problema de perforaciones clandestinas y extracción de volúmenes mayores que los autorizados. Tampoco se han tomado medidas o acciones adecuadas para su control, como por ejemplo que sea obligatorio instalar y mantener un medidor de flujo en cada pozo y otras acciones de vigilancia del agua obtenida. Desde entonces ya se menciona sobre los posibles efectos por la extracción no controlada como: reducción gradual de la oferta de agua subterránea, incremento en los costos de extracción, deterioro de la calidad del agua, abatimiento, entre otras. El agua es indispensable para el desarrollo de la entidad, la agricultura de riego por bombeo usaba ya para ese entonces el 78% del volumen de agua subterránea utilizada del Estado (de acuerdo con cálculos reportados), y la creciente necesidad de agua para uso público-urbano (donde se señala que una parte de la industria también queda inmiscuida en este porcentaje). Así resalta que no solamente se deben realizar estudios científicos para conocer la situación hídrica del país sino también implementar acciones adecuadas para su

protección, que incluye reformas legislativas que conduzcan y permitan la adecuada extracción y aprovechamiento del agua, tanto superficial como subterránea.

- Movimiento del agua subterránea en el plano horizontal

La figura 4.10 muestra una reconstrucción de la elevación de la carga piezométrica para el área de estudio a partir de datos de la década de los setenta (SARH, 1978), incluyendo adicionalmente información de Villa de Reyes (Carrillo-Rivera, 1985). Tales elevaciones se consideran representativas de las condiciones para ese entonces debido a que en esa época no existía tanta extracción como hoy en día, por esta razón no se realizó el cálculo para la corrección por cambio de densidad en el agua en el plano vertical. Como se aprecia, en el margen oeste del área de estudio el flujo de agua tiene dirección preferencial norte-sur, dirigiéndose hacia los Altos de Jalisco. Al sureste del área de estudio, hasta donde se tiene información, en el estado de Guanajuato la dirección de flujo aproximada del agua es norte-suroeste. No obstante, al analizar a menor escala (regional), los dos flujos descritos continúan su recorrido hasta desembocar en el Océano Pacífico y pertenecen a la Región Hidrológica Administrativa Lerma-Santiago-Pacífico.

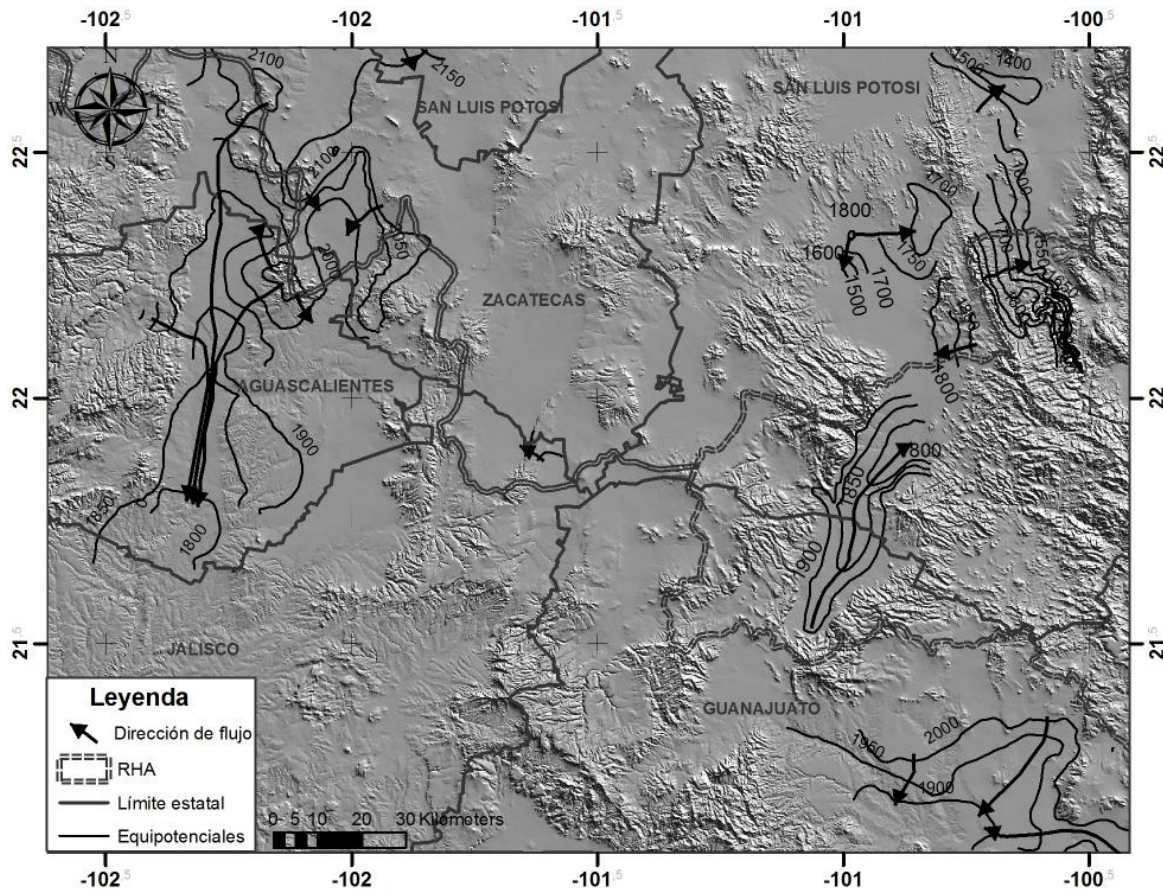


Figura 4.10. Elevación de superficies piezométricas en el área de estudio, décadas setenta y ochenta

El movimiento del agua subterránea en la zona de Villa de Reyes es de suroeste a noreste, de acuerdo con Carrillo-Rivera (1985), el agua inicia su curso en los materiales de relleno en el estado de Guanajuato, prosigue a lo largo del valle hacia Villa de Reyes y continúa hasta la región de El Pardo. El mismo autor señala una profundidad del nivel estático de

menos de 3 m (posible zona de descarga) hacia el suroeste de la presa San Bartolo (GTO), al norte de El Pardo y de Villa de Reyes (SLP). Esta parte del área de estudio corresponde con la RHA Golfo Norte, cuya agua superficial desemboca en el Golfo de México.

Como se observa, la dirección obtenida de flujo del agua subterránea presenta una correspondencia con las RHA definidas por la CONAGUA no siendo la excepción la porción noreste y norte-centro del área de estudio que queda incorporada en la RHA conocida como Cuencas Centrales del Norte, la cual está compuesta por cuencas endorreicas (CONAGUA, 2007); no obstante, cabe resaltar que esta situación sólo considera el flujo más cercano a la superficie pero no incorpora el flujo profundo del agua subterránea.

Actualmente, la configuración de la carga piezométrica es diferente a la elevación del nivel freático debido a la excesiva extracción de agua subterránea por medio de pozo que trae como consecuencia la inducción de agua termal profunda, la cual presenta diferente temperatura y composición química que le atribuye una densidad diferente a la del agua que se extraía inicialmente. Por tal razón, es necesario realizar una corrección para obtener la elevación de carga piezométrica real con base en el concepto de carga piezométrica de Hubbert (1940; citado por Carrillo-Rivera, 1992).

Un ejemplo de los resultados de este cálculo se exhibe en la figura 4.11 para el acuífero profundo de la región de San Luis Potosí (Carrillo-Rivera, 1992), donde claramente se aprecia el efecto de la intensiva extracción del agua subterránea y por ende, el error que comúnmente se tiene en las interpretaciones hidrogeológicas al no realizar esta corrección en la determinación de la carga piezométrica. Como se aprecia en la figura 4.11 el flujo se dirige principalmente hacia el área de extracción en la ciudad de San Luis Potosí y al sureste de la misma ocasionando problemas de salud pública debido al alto contenido de sodio y fluoruro en el agua inducida a través de pozos y que pertenece a flujos (regionales) más profundos. Para el caso particular de San Luis Potosí, Medellín-Milán *et al.* (1993; citado por Hergt *et al.*, 2009) determinaron que el 84% de la población de 6 a 30 años sufre de fluorosis dental.

Esta alteración del movimiento natural del flujo de agua subterránea en el plano horizontal (por efectos de flujo vertical) se considera que ocurre en aquellas porciones del área de estudio donde se encuentran ciudades o localidades con gran extracción de agua subterránea, como en las ciudades de Aguascalientes, León, San Luis Potosí; sin embargo, no se descarta la posibilidad de ocurrencia de manera local en poblaciones cuyo caudal de extracción en los pozos sean lo suficientemente grande como para generar este efecto. La situación adversa para realizar este tipo de análisis es la adquisición de la base de datos actualizada por la CONAGUA y que contenga la mayor cantidad posible de parámetros (profundidad del nivel freático, temperatura del agua, caudal de extracción, perfil litológico, entre otros) para realizar una óptima investigación. Lamentablemente el acceso a este tipo de información es difícil y su calidad no siempre es la óptima.

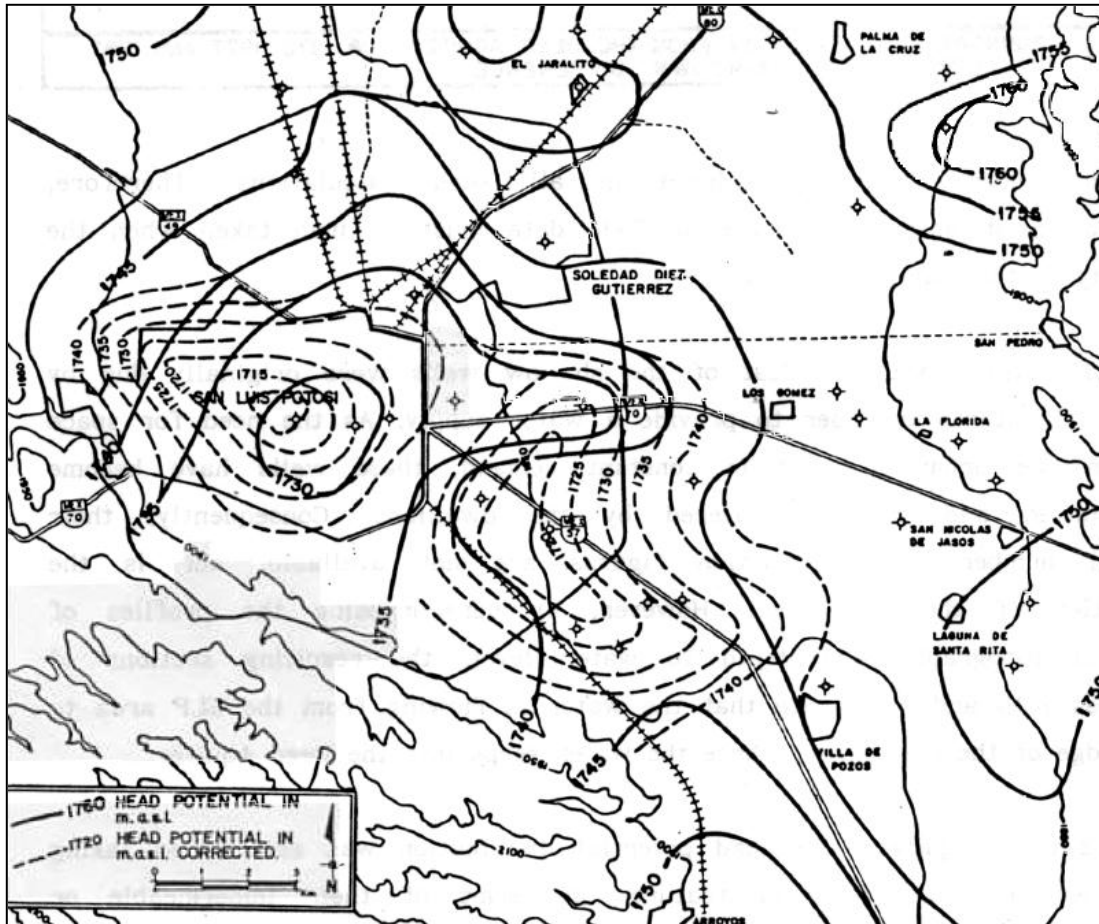


Figura 4.11. Distribución representativa de la elevación de superficie piezométrica para el flujo profundo, Ciudad de San Luis Potosí. Enero 1987. Fuente: Carrillo-Rivera (1992).

4.1.6. Definición de zonas de recarga y descarga a través de indicadores superficiales

Para la definición final de la localización en el área de estudio de las zonas de recarga y descarga de agua subterránea a través de indicadores superficiales se realiza la superposición de los polígonos de zonas de recarga/descarga definidos previamente a partir de los indicadores de cada elemento evaluado (suelo, vegetación, elevación topográfica, hidrología superficial, litología) y se selecciona la intersección entre ellos (figura 4.12). Así, las zonas de recarga para el área de estudio corresponden con las Sierras: Fría, El Cubo, San Miguelito, Santa Bárbara, Jacales; los Cerros: El Tecolote, La Giganta, Los Huacales, Colorado; y por último las Mesas: Chinampas, Los Hoyos, La Cieneguita, Carmona. Por su parte, las zonas de descarga antaño corresponden principalmente con la planicie en el graben de Aguascalientes y porciones hacia los Altos de Jalisco, Santa María del Río, Ojuelos.

El resultado del presente apartado pretende mostrar parte de la metodología necesaria para la determinación de zonas de recarga/descarga y la reconstrucción del comportamiento original (o menos perturbado) de la dinámica del agua, que junto con un análisis químico e isotópico del agua, de las propiedades hidráulicas del material litológico y en general la configuración geológica en el subsuelo permite obtener un mayor

conocimiento del funcionamiento del sistema el cual será adecuado usar como base para cualquier proyecto a realizar en cuanto a aspectos ambientales e hidrológicos y toma de decisiones. No obstante, es necesario realizar estudios locales más detallados para establecer con mayor exactitud las zonas de recarga y descarga pues la metodología empleada en la presente investigación se basa en los sistemas de flujo gravitacionales.

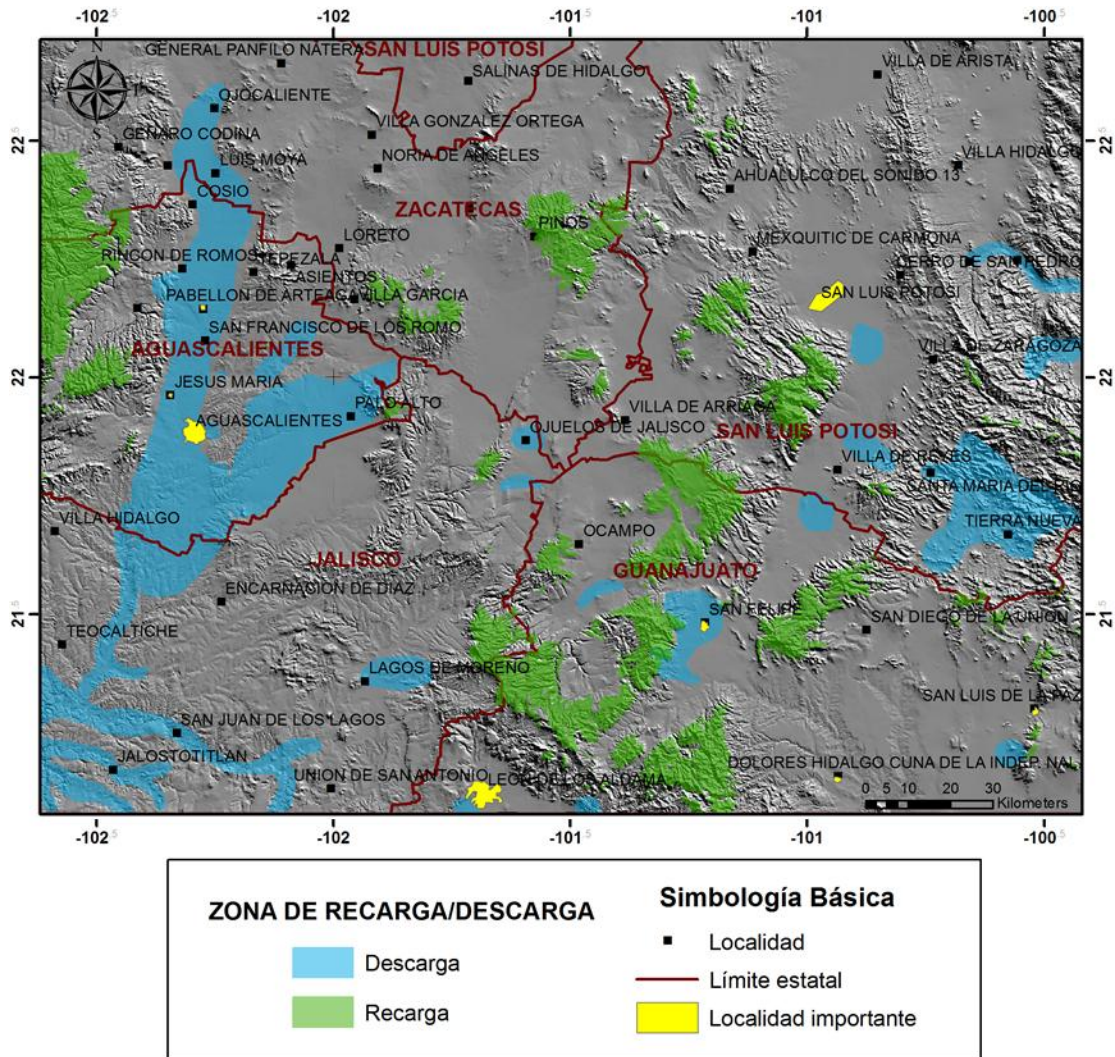


Figura 4.12. Localización de zonas de recarga y descarga de agua subterránea en el área a partir del análisis de diversos indicadores superficiales

4.2. Caracterización del agua subterránea

4.2.1. Evaluación de la calidad química del agua para el área de estudio

Con base en los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSAI-1994 de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, se obtuvo que diversas muestras superan tales límites para elementos como el fluoruro, mercurio y arsénico en 82, 54 y 18 muestras respectivamente, de las 145 asequibles (figura 4.13). La tabla 4.5 exhibe los valores de la norma de los parámetros que son superados por algunas muestras de agua del área de estudio y en el anexo 5 se tiene el

listado completo de las muestras con las concentraciones de aquellos parámetros. Cabe resaltar que para la figura 4.13 corresponde con las 145 muestras totales (base CNA, 1999) debido a que para un elemento se puede tener que tanto la muestra de 1999 como la del 2010 supera el límite, sin embargo, en la cuantificación corresponde con una misma estación.

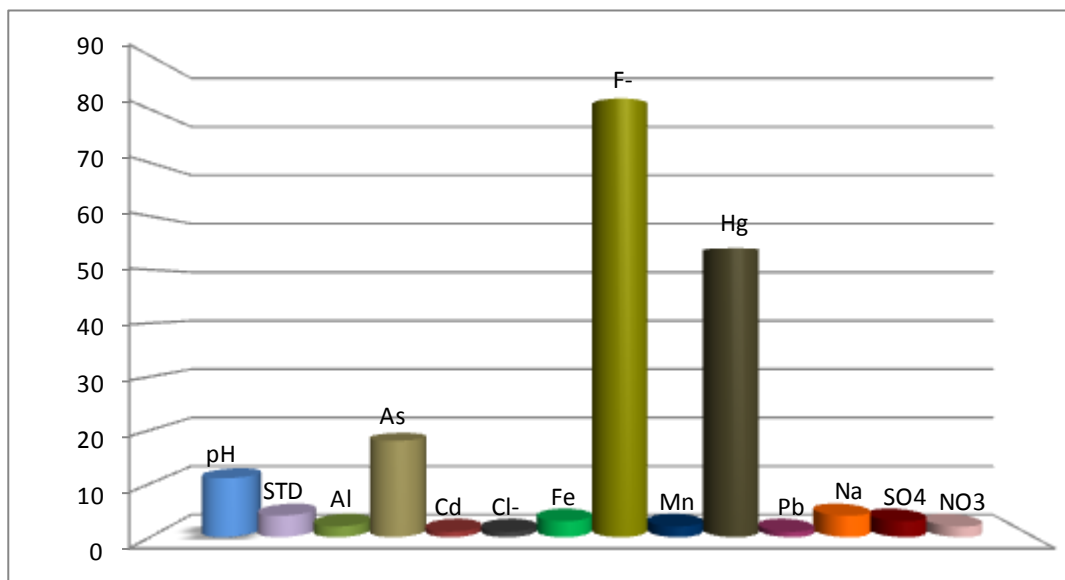


Figura 4.13. Cantidad de muestras que sobrepasan el límite permisible de calidad para agua potable para determinados elementos.

Tabla 4.5. Límite permisible de diversos elementos para agua potable (según la Norma Oficial Mexicana)

Parámetro	Límite permisible	Parámetro	Límite permisible
pH	6.5 - 8.5	F-	1.5 mg/l
STD	1,000 mg/l	Mn	0.15 mg/l
Al	0.2 mg/l	Hg	0.001 mg/l
As	0.05 mg/l	Pb	0.025 mg/l
Cd	0.005 mg/l	Na	200 mg/l
Cl-	250 mg/l	SO4	400 mg/l
Fe	0.3 mg/l	NO3 (N)	10 mg/l

Como señalan Velázquez *et al.* (2011), la norma oficial de agua para uso y consumo humano para México no incluye valores de referencia para el boro, por su parte, los criterios ecológicos de calidad del agua (SEDUE 1989; ; citado por Velázquez *et al.*, 2011) indican un máximo permisible de 1 mg/l para uso público urbano, entretanto, la Organización Mundial de la Salud lo sitúa en 500 µg/l (WHO 2008; citado por Velázquez *op. cit.*), aunque actualmente revisa este límite de concentración de boro y provisionalmente lo marca en 2.6 mg/l (WHO 2010; citado por Velázquez *op. cit.*). Los problemas sanitarios asociados con un consumo excesivo de boro van desde daños al sistema digestivo (estómago, intestino), hígado, riñones, cerebro, hasta la muerte (Selinus 2004, WHO 2008; citado por Velázquez *op. cit.*).

Un excelente indicador de contaminación por actividad antrópica es el contenido de nitrato, el cual se asocia generalmente con un alto valor de cloruro en el agua. No obstante, existen sus excepciones como se aprecia en la figura 4.14 con las muestras 36 y 77 del 2010 y 1999, respectivamente. En tal figura se observa también que la muestra 46 rebasa el límite permisible para agua potable por el contenido de nitratos.

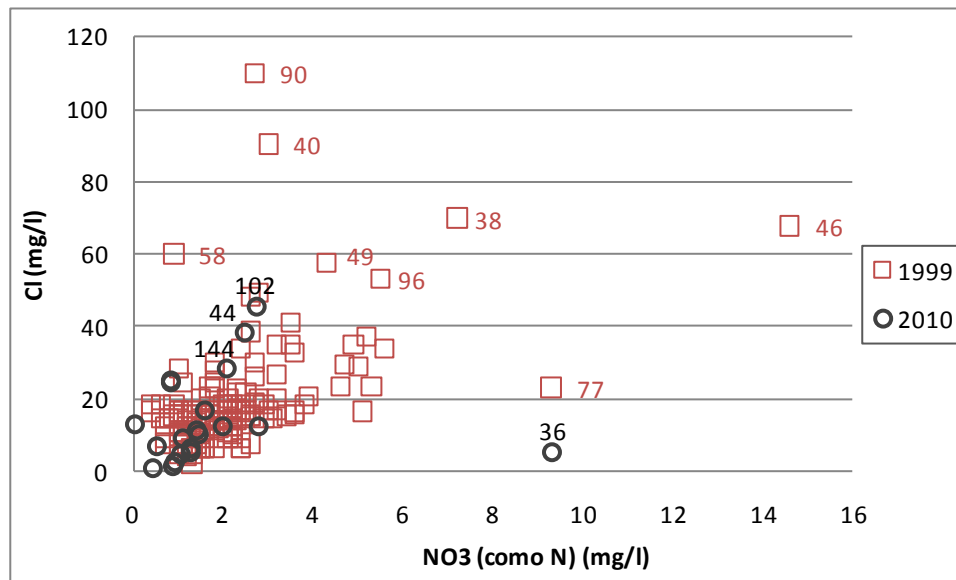


Figura 4.14. Relación de NO_3 (como N) con Cl^- en las muestras del área de estudio

Una manera para determinar algún cambio asociado con factores externos en la composición original del agua es a través del litio, por su carácter conservativo. Por ejemplo, si se tiene una muestra con elevada concentración de cloruro se podría pensar que es un tipo de agua asociada con un flujo intermedio o regional (ie, de larga permanencia en el medio geológico), sin embargo, si presenta a su vez una importante concentración de nitratos y un bajo valor de litio es probable que el cloruro está relacionado con contaminación evidenciado por el contenido de nitratos más que por procesos de interacción agua-roca.

El presente estudio demuestra la importancia de incluir la mayor cantidad de elementos químicos en cualquier estudio de carácter hidrológico ya que por lo general los trabajos realizados en el país se limitan al análisis de elementos mayores, dejando así de lado la información de posibles afectaciones a la salud humana por elementos menores y traza, parámetros que pasan desapercibidos ya que no son comúnmente analizados. Asimismo, la identificación de las múltiples características químicas del agua permite una mejor interpretación del sistema ya que se incorpora información sobre posibles procesos que ayudan a determinar las condiciones existentes del agua.

4.2.2. Facies hidroquímicas y grupos de agua

A partir de los datos químicos del estudio de la CNA (1999) y los resultados analíticos del laboratorio al que fueron enviadas las muestras del 2010 (ver anexo 4) se establecen los diferentes tipos y grupos de agua presentes para tal período en el área de estudio, los cuales se señalan a continuación.

- **Facies hidroquímicas**

La tabla del anexo 6 exhibe las facies hidroquímicas obtenidas a través del cálculo manual y aquel obtenido usando el software AQUACHEM 4.0, donde se aprecia que de acuerdo con la metodología empleada puede variar la facie hidroquímica resultante. El cálculo manual agrupa el Na con el K (Fagundo, 2009), haciendo que el valor del sodio sea mayor de lo que realmente es el original y enmascarando la presencia de potasio en el agua. Por su parte, el método que usa el programa también tiene sus limitantes. A pesar que se establece que las facies químicas se calculan con base en los elementos que están presentes en más del 20% del total de los elementos en concentración equivalente, en ocasiones, especialmente los aniones, no se ven reflejados en el tipo resultante.

En la tabla 4.6 se aprecian aquellas muestras que según el método aplicado manifiestan diferente facie hidroquímica, esto se señala en la presente investigación con el objeto de resaltar la importancia de describir en todo documento la técnica empleada y, en especial, para que las interpretaciones que se realicen sean adecuadas.

Teniendo en cuenta estas discordancias en las facies hidroquímicas, se consideró adecuado definir las facies hidroquímicas aplicando una técnica que agrupa los aspectos positivos del cálculo manual y aquel de AQUACHEM, la cual se aprecia en la columna denominada "complemento" de la tabla 4.6 y se basa en aquellos elementos que se encuentran al 20% o más. De esta manera se obtienen veinticuatro facies hidroquímicas en el área de estudio, predominando el agua bicarbonatada sódica cálcica, bicarbonatada cálcica sódica y bicarbonatada sulfatada sódica cálcica. La tabla 4.7 señala el porcentaje de presencia de cada uno de los tipos de agua encontrados en el área con base en las 165 muestras totales.

En la figura 4.15 se muestra la representación de las facies geoquímicas del agua a través del Diagrama Piper. Predominan las facies bicarbonatada sódica, bicarbonatada cálcica y/o magnésica. La figura 4.16 presenta la ubicación de las facies hidroquímicas en el área, en la que no se aprecia alguna agrupación espacial sino por el contrario, el agua presenta una gran distribución, especialmente aquella bicarbonatada sódica y bicarbonatada cálcica y/o magnésica. Esto se considera posible teniendo en cuenta la gran extensión territorial del área de estudio, la diversidad litológica y que las muestras corresponden con agua de pozo, por lo que realmente es agua que circula por el subsuelo y que no descarga de manera natural, lo que hace que sea más susceptible a mezcla de flujos dependiendo de la forma de extracción. La utilidad de definir las facies hidroquímicas del agua en estudios hidrogeológicos radica en que los aniones pueden dar información referente al posible sistema de flujo (jerarquía), recordando la secuencia de Chevotareb de $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ en zona de recarga e inversa en la de descarga sugiriendo esto distancia y tiempo de recorrido; los cationes, por su parte, suministran indicios de la interacción del agua con la roca, es decir, permite suponer la litología por la que circuló el agua en el subsuelo.

Tabla 4.1. Diferencias en la facie hidroquímica de acuerdo con la metodología empleada

ID	Muestra	Facies hidroquímica		
		Manual	AQUACHEM	Complemento
5	P-70 Las Dalías	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	HCO3>SO4-Na>Ca
19	P-5 Av. México	HCO3>Cl-Ca>Na	Ca-Na-HCO3	HCO3>Cl-Na>Ca
35	pR-Pin-20-X	HCO3>SO4>Cl-Na>Ca	Ca-Na-K-HCO3-SO4	HCO3>SO4>Cl-Ca>Na>K
43	L-NIG-22-X	HCO3-Ca>Na	Ca-HCO3	HCO3-Ca
46	N-NIG2-22-X	SO4>Cl>HCO3-Na>Ca	Na-Ca-SO4-Cl	SO4>Cl>HCO3-Na>Ca
48	P-pACH-2B-23-X	HCO3>SO4>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	HCO3>SO4>Cl-Na>Ca
50	Cañada de Ricos	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
51	La Higuera 3	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	HCO3>SO4-Na>Ca
52	La Higuera 4	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	HCO3>SO4-Na>Ca
57	Peña del Halcón	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3	HCO3>SO4-Na
65	El Alto	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
69	Ornelas	SO4>HCO3-Na	Na-SO4	SO4>HCO3-Na
75	Sta. María de En M.	HCO3-Na	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
79	Griegos	HCO3>SO4-Na>Ca	Ca-Na-HCO3-SO4	HCO3>SO4-Ca>Na
80	Luis Moya	HCO3>SO4-Na>Ca>Mg	Na-Ca-HCO3-SO4	HCO3>SO4-Na>Ca>Mg
82	Tierra Blanca	HCO3>SO4-Na>Ca	Ca-Na-HCO3-SO4	HCO3>SO4-Ca>Na
85	Villa García	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	HCO3>SO4-Na>Ca
90	Villa González (P-GLEZ2)	SO4>HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-SO4-HCO3	SO4>HCO3>Cl-Na>Ca
96	Villa Hidalgo (Noria)	HCO3>Cl-Na>Ca	Ca-Na-HCO3-Cl	HCO3>Cl-Ca>Na
104	Gachupines (Noria)	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-K-HCO3-SO4	HCO3>SO4-Na>K>Ca
107	Lag. Guadalupe	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-HCO3-SO4	HCO3>SO4-Na>Ca
111	Pozo La Venta-1	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
113	Agua superficial	HCO3>SO4-Na>Ca	Ca-Na-HCO3-SO4	HCO3>SO4-Ca>Na
114	Sn. Felipe (SG-02)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
115	Los Fresnos (SG-04)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
116	San Juanita (SG-22)	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl	HCO3-Na>Ca
118	Pedroza II (P-66)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
122	El Mezquite (381A-ZA)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
125	Presa San José	SO4-Ca>Na>Mg	Ca-SO4	SO4-Ca>Mg
126	Milpillas (ZA-393)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
128	Colonia El Paseo	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
129	Col. Del Llano	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
145	P. de la Hacienda	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3	HCO3-Ca>Na
88-2010	Ojuelos	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	HCO3>SO4-Na>Ca

Tabla 4.2. Porcentaje de presencia de las diversas facies hidroquímicas existentes en el área de estudio

Tipo de Agua	%	Facies hidroquímica	%
HCO3-Na>Ca	33.33	HCO3>Cl>SO4-Ca>Na	0.61
HCO3-Ca>Na	15.15	HCO3>Cl>SO4-Na>Ca	0.61
HCO3>SO4-Na>Ca	12.73	HCO3>SO4>Cl-Ca>Na>K	0.61
HCO3-Na	9.09	HCO3>SO4>Cl-Na>Ca	0.61
HCO3>Cl-Na>Ca	5.45	HCO3>SO4-Na>Ca>Mg	0.61
HCO3>SO4-Na	4.85	HCO3>SO4-Na>K>Ca	0.61
HCO3>SO4-Ca>Na	4.24	HCO3-Ca	0.61
SO4>HCO3-Na	2.42	HCO3-Na>Mg>Ca	0.61
SO4>HCO3-Na>Ca	1.82	SO4>Cl>HCO3-Na>Ca	0.61
HCO3>SO4>Cl-Ca>Na	1.21	SO4>HCO3-Ca>Na	0.61
HCO3>Cl-Ca>Na	1.21	SO4-Ca>Mg	0.61
SO4>HCO3>Cl-Na>Ca	1.21	CL>HCO3-Na	0.61

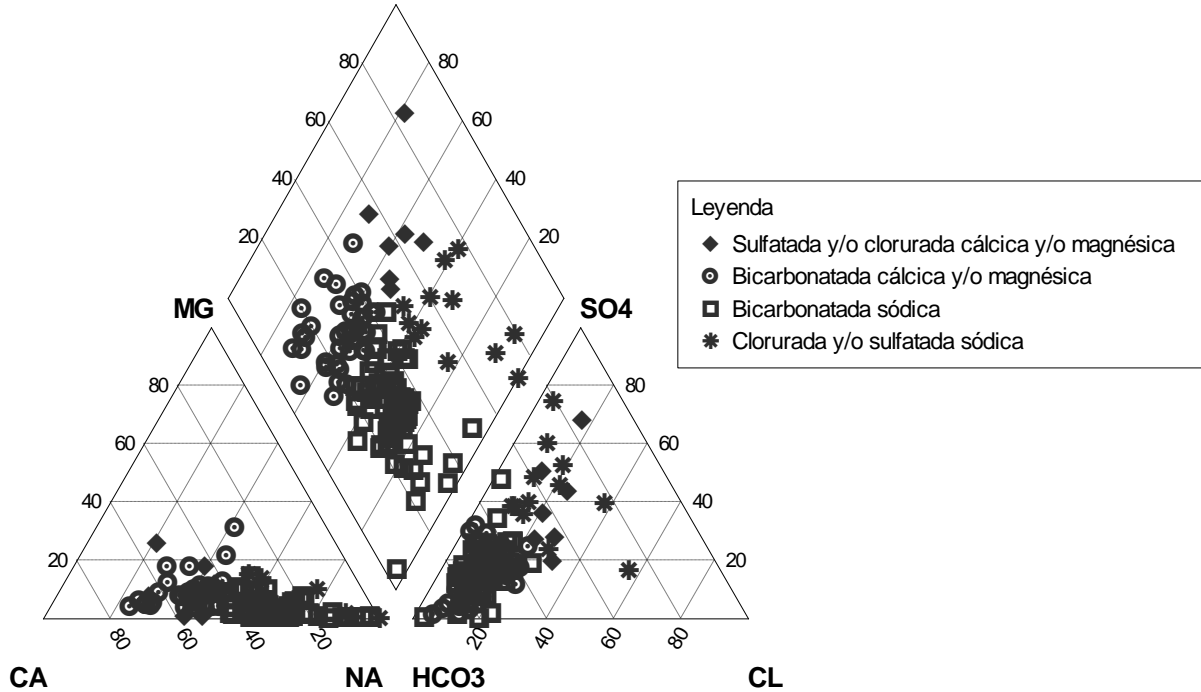


Figura 4.1. Diagrama Piper mostrando las facies hidroquímicas para el agua subterránea del área

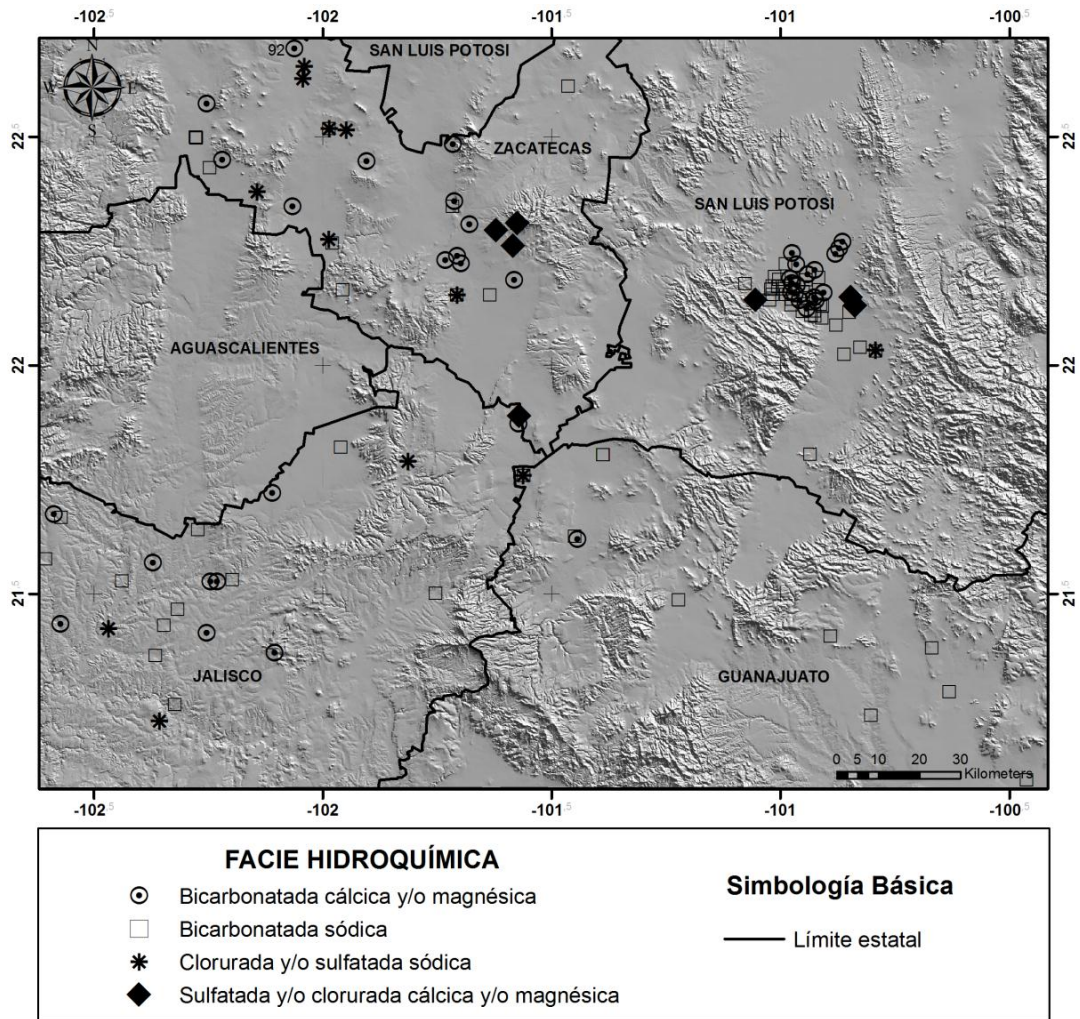


Figura 4.16. Distribución de las facies hidroquímicas (del agua) en el área de estudio

• Grupos de agua

DATOS DE 1999

Los datos hidroquímicos permitieron identificar tres conjuntos de agua (figura 4.17):

- 1) agua fría, con temperaturas que van de los 12° a 21°C
- 2) agua templada, cuya temperatura varía de 22° a 34.3°C
- 3) agua termal, con temperaturas mayores a los 34.3°C

No obstante, con un análisis detallado de diversos elementos químicos en las muestras de agua y su comparación con resultados de diversos estudios hidrogeológicos desarrollados en partes de la región (Cardona 1990, 2007; Carrillo-Rivera 1992; Molina-Maldonado, 1996), se establecieron ocho grupos de agua y una muestra (Salinas) que por sus características fisicoquímicas no se relaciona con algún otro grupo (tabla 4.8, figura 4.18). Cabe resaltar que los intervalos de los grupos concernientes a las características fisicoquímicas en la tabla 4.8 no están uniformemente distribuidos teniendo en cuenta las dimensiones del área de estudio, la diversidad litológica, los sistemas de flujo y diferentes facies hidroquímicas, es decir, puede haber agua con una misma temperatura pero con

diferente concentración de elementos químicos, tales como litio, sodio, cloruro, estroncio, etc., que permiten asumir que pertenecen a grupos de agua específicos.

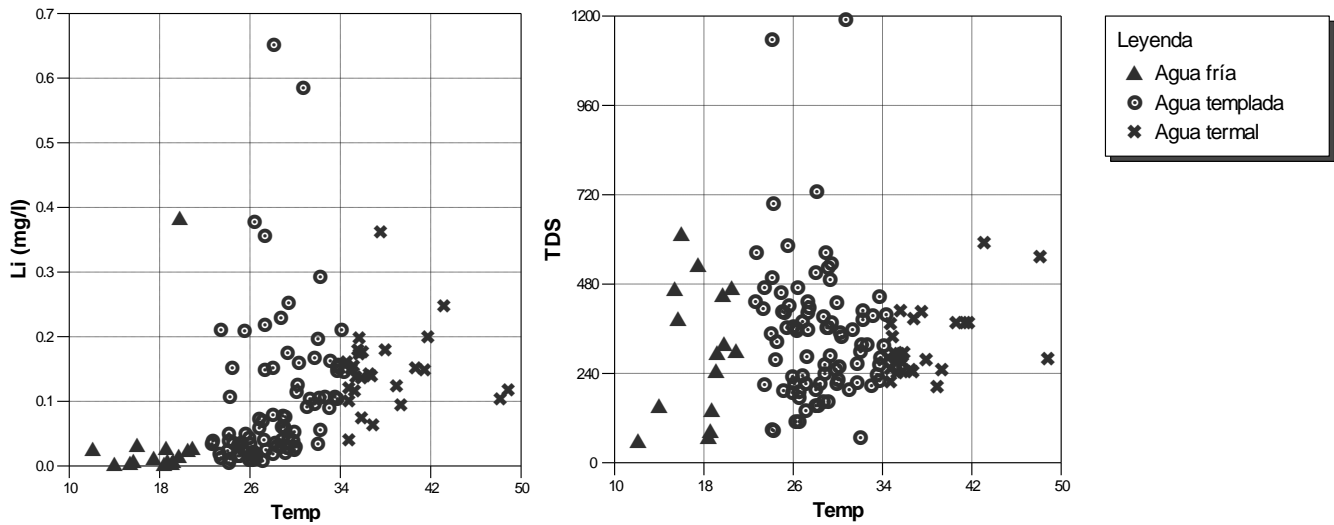


Figura 4.17. Agua presente en el área de estudio

De igual modo, el análisis de los resultados analíticos de las muestras de agua del estudio de la CNA (1999) permitió reconocer varias mezclas de agua, así como tres tipos de sistema de flujo que fueron definidos de acuerdo con la teoría de Tóth (2000): local, intermedio y regional; adicionalmente, se encontraron tres tendencias asociadas con flujo regional, estas son:

- 1) agua con alta CE y baja temperatura que correspondería con agua que se desplaza gran distancia sin alcanzar una profundidad importante, es decir, predomina un movimiento del agua en el plano horizontal;
- 2) agua con alta temperatura y CE, sugiriendo que alcanza profundidad y distancia de recorrido importantes, y
- 3) agua con temperatura alta y baja CE debido a que posiblemente alcanza una importante profundidad pero con una alta velocidad, o corto recorrido, en el subsuelo que no le permite gran interacción con la roca.

Tabla 4.8. Principales características fisicoquímicas por grupo de agua en el área de estudio

		T (°C)	Na (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	Li (µg/l)	CE (µS/cm)
Agua fría	Grupo 1	12-21	7.5-44.6	17-155	2.0-28.8	12-69	3-26	85-472
	Grupo 5	15-20	41.8-74.9	73-241	53.3-90.5	33-120	4-33	554-891
	Salinas	21	69,200.0	61,711	72,692.0	28,750	25	7768
Agua templada	Grupo 2	23-27	10.1-23.7	54-122	6.2-18.5	1-22	5-19	96-270
	Grupo 3	20-32	39.3-275.3	126-344	4.6-60.1	1-500	174-652	355-1,504
	Grupo 7	23-34	14.7-83.8	40-356	4.6-41.1	2-175	18-210	92-668
	Grupo 8	23-25	61.4-265.2	151-332	23.3-48.3	24-325	15-107	476-1,642
Agua termal	Grupo 4	34-43	52.0-166.5	143-245	6.2-49.3	22-175	142-362	297-711
	Grupo 6	35-50	32.0-103.0	119-326	10.3-27.7	16-47	40-139	232-691

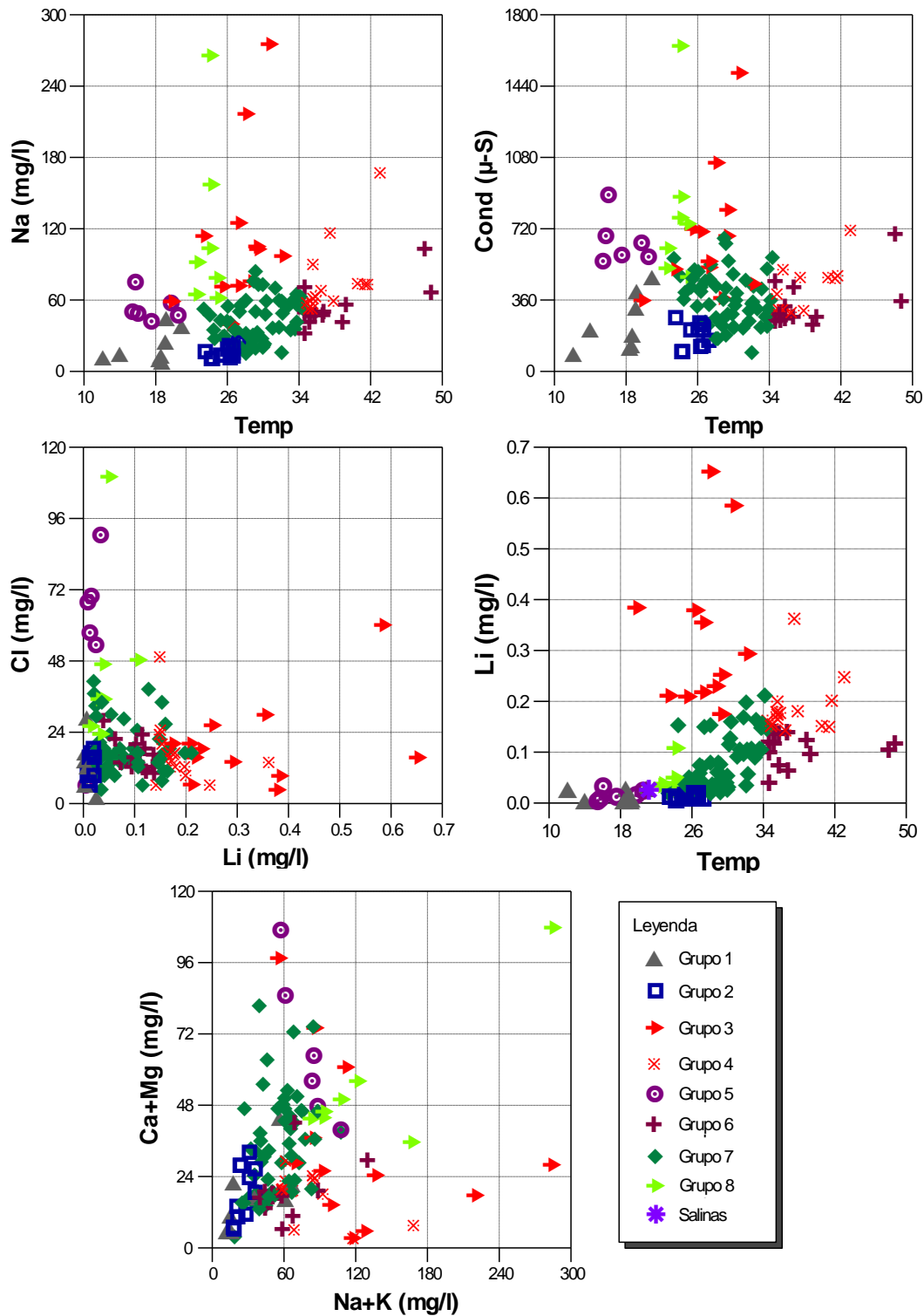


Figura 4.18. Definición de grupos de agua a través del análisis de su temperatura, conductividad eléctrica, cloruro, sodio, litio, potasio, magnesio, y calcio.

A continuación se realiza una descripción de las principales características de los subgrupos definidos en la presente investigación cuya localización se aprecia en la figura

4.20. En el anexo 7 se presentan los diagramas Stiff para cada uno de los subgrupos definidos en este estudio.

GRUPO 1, incluye agua con la temperatura comparativamente más baja (12-21°C) y con valor bajo de: conductividad eléctrica (CE), sodio, cloruro y litio; corresponde con flujos de tipo local que han circulado principalmente por material granular, o bien pertenece al inicio del recorrido de flujos intermedio o regional que han sido captados a través de los diferentes pozos muestreados. El contenido de cationes Na, Ca, K y Mg indican un flujo que viajó por un medio relativamente heterogéneo (ver figura 4.18), por esta razón se presenta gran diversidad en las facies hidroquímicas, de las cuales resaltan: $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl} - \text{Ca} > \text{Na} > \text{K}$, $\text{HCO}_3 > \text{Cl} - \text{Na} > \text{Ca}$ y $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 - \text{Na} > \text{Ca}$ (ver anexo 7).

GRUPO 2, presenta mayor temperatura (23-27°C) que el Grupo 1; las muestras de CNA (1999) pertenecientes a este grupo se extraen preferencialmente en San Luis Potosí, excepto las muestras 66 y 67 ubicadas en el estado de Jalisco (ver figura 4.20). Este Grupo se considera como flujo intermedio que ha circulado principalmente por el material de relleno de las fosas. Las facies hidroquímicas que se presentan asociadas con flujos intermedio son: $\text{HCO}_3 - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 - \text{Ca} > \text{Na}$ y $\text{HCO}_3 > \text{Cl} - \text{Na} > \text{Ca}$ (ver anexo 7).

GRUPO 3, es agua con temperatura media a alta (20-43°C) que incluye entre sus datos las concentraciones máximas de sodio, litio, sulfato y conductividad eléctrica (con excepción de la muestra Salinas), lo que permite proponer que pertenece a un flujo regional que ha circulado especialmente por rocas sedimentarias, incluyendo caliza y material granular pero a moderada profundidad. Las muestras de agua de este grupo se obtuvieron con preferencia en la margen oeste del área de estudio (ver figura 4.20). Las facies hidroquímicas presentes son: $\text{HCO}_3 - \text{Na}$, $\text{HCO}_3 - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 - \text{Na}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 - \text{Ca} > \text{Na}$ y $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 - \text{Na}$ (ver anexo 7).

GRUPO 4, presenta agua con alta temperatura (34-42°C), CE cercana al promedio de la mayoría de los grupos definidos, es decir, presenta una CE baja comparado con el Grupo 3; sin embargo, la concentración de litio es importante sugiriendo que pertenece a un flujo regional que alcanza grandes distancia y profundidad. En esencia se considera que ha circulado por roca volcánica fracturada principalmente y sus facies hidroquímicas son de tipo: $\text{HCO}_3 - \text{Na}$, $\text{HCO}_3 - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 - \text{Na} > \text{Ca}$ y $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4 - \text{Na} > \text{Ca}$ (ver anexo 7).

GRUPO 5, es agua con alta CE y cloruro, independientemente de su baja temperatura (15-20°C). Con base en el contenido de nitrato, descrito previamente en el punto 4.2.1 (calidad química del agua), se establece que la elevada concentración de cloruro en esta agua no se debe a contaminación antrópica debido a que tan sólo una muestra de este grupo presenta valores por arriba de lo que se considera como el nivel natural de referencia de nitrato en el agua subterránea (figura 4.14). Por su parte, teniendo en cuenta lo que establecen Carrillo-Rivera *et al.* (2007) con respecto a cuando la relación molar Na-Cl es aproximadamente 1:1, se puede atribuir que la única fuente de sodio y cloruro para el agua de este grupo es por evaporación del agua de lluvia (ver figura 4.19a), al igual que para las muestras de los grupos 1 y 2. El agua del grupo 5 se encontró preferentemente en el estado de Zacatecas, por lo que se considera viable que haya circulado por rocas sedimentarias debido a su elevado contenido de calcio, moderado contenido de sulfato y estroncio (ver figura 4.19b). Al parecer, el agua de este grupo no

alcanza profundidad importante como lo indica su temperatura a la descarga, por lo que se cataloga como flujo local. Las facies hidroquímicas relacionadas con este grupo son: $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 > \text{Cl} - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4 - \text{Ca} > \text{Na}$, $\text{HCO}_3 > \text{Cl} - \text{Ca} > \text{Na}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl} - \text{Ca} > \text{Na}$ y $\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3 - \text{Na} > \text{Ca}$ (ver anexo 7).

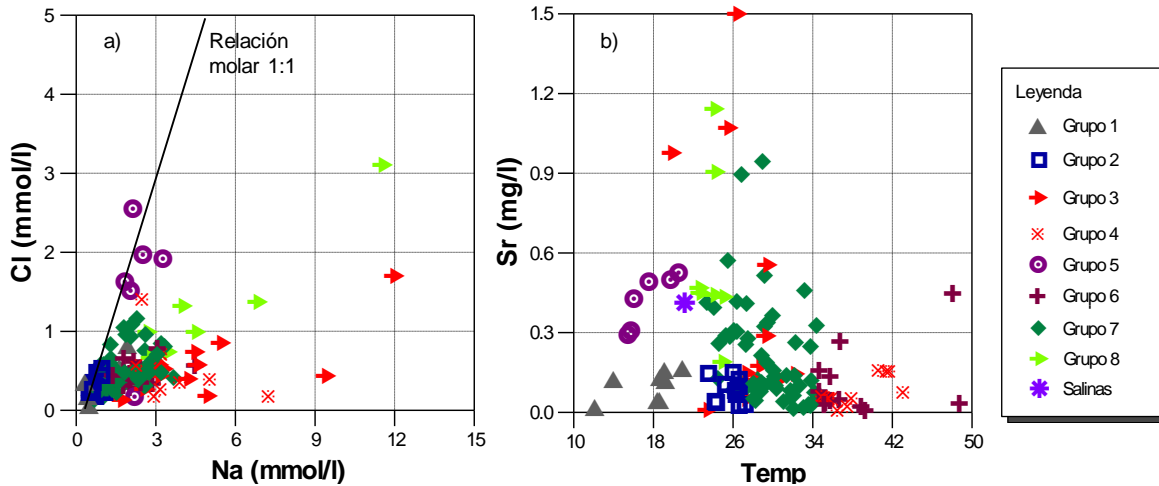


Figura 4.19. Relación de: a) sodio y cloruro, b) temperatura y estroncio para los diferentes grupos.

GRUPO 6, esta agua, junto con aquella del Grupo 4, tienen la mayor temperatura a la descarga en el área de estudio ($35-50^{\circ}\text{C}$); sin embargo, se diferencian entre sí primordialmente por el contenido de litio, presentándose concentraciones más bajas en este grupo, por lo que se considera como agua que alcanza bastante profundidad pero que su velocidad es relativamente alta que no permite mayor interacción entre el agua y la roca. Este grupo es considerado como mezcla de flujos intermedio y regional que ha circulado preferentemente por rocas volcánicas atribuyéndole al agua el predominio del catión sodio y facies hidroquímicas: $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ y $\text{HCO}_3 - \text{Na} > \text{Ca}$ (ver anexo 7).

GRUPO 7, esta agua presenta una temperatura media ($23-34^{\circ}\text{C}$), con una concentración variable de los diferentes elementos analizados (ver tabla 4.8) que sugieren que el agua corresponde con una mezcla de flujos intermedio y regional. El agua de este grupo ha circulado por litología variable, que va desde rocas volcánicas a sedimentarias, contemplando a su vez la posibilidad de interactuar con rocas metamórficas que se encuentran en los estados de Aguascalientes y Zacatecas especialmente. Por esto mismo, se presenta una gran variedad de facies hidroquímicas: $\text{HCO}_3 - \text{Na}$, $\text{HCO}_3 - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 - \text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 - \text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$, $\text{HCO}_3 > \text{Cl} - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl} - \text{Na} > \text{Ca}$, $\text{HCO}_3 - \text{Ca} > \text{Na}$, $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl} - \text{Ca} > \text{Na}$, $\text{HCO}_3 > \text{Cl} - \text{Ca} > \text{Na}$, $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 - \text{Ca} > \text{Na}$ (ver anexo 7).

GRUPO 8, es agua con temperatura relativamente baja ($23-25^{\circ}\text{C}$), elevada concentración de sodio, cloruro, estroncio, etc. De acuerdo con la figura 4.19a se observa que esta agua no presenta la relación molar Na-Cl de 1:1 como el grupo 5, ni elevado contenido de nitrato, por lo que su alta concentración de diversos elementos se postula debido a una mayor profundidad de circulación y disolución de rocas sedimentarias en comparación con las muestras del grupo 5 (ver figura 4.19b). Con base en el contenido de litio, se aprecia que el agua de este grupo contiene valores medios entre aquellas muestras de los grupos 5 y 3 (local y regional, respectivamente), por lo que se considera aceptable catalogar el

agua del presente grupo como flujo intermedio. Sus facies hidroquímicas son: $\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Ca}$, $\text{HCO}_3>\text{SO}_4\text{-Na}>\text{Ca}$, $\text{SO}_4>\text{HCO}_3\text{-Na}>\text{Ca}$, $\text{HCO}_3>\text{SO}_4\text{-Na}$, $\text{SO}_4>\text{HCO}_3>\text{Cl-Na}>\text{Ca}$ (ver anexo 7).

SALINAS, corresponde con una muestra de agua que presenta una concentración sumamente elevada en el total de sales disueltas y con temperatura relativamente baja (21°C). Su facies hidroquímica es $\text{Cl}>\text{HCO}_3\text{-Na}$ (ver anexo 7). La elevada concentración en diversos elementos es resultado de evaporación del agua durante su recarga (posiblemente hace miles de años) lo cual se descubre en su contenido en isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, 3.6 y δD , -18.6, ver figura 4.28, punto 4.3.2). Hayashi y Rosenberry (2002; citado por González-Abraham, 2011) establece que si el nivel freático se encuentra lo suficientemente cerca de la superficie del suelo, como lo es en una zona de descarga, el agua subterránea se evaporará, incluso será transpirada; a medida que el agua se evapora o es transpirada, los solutos aumentarán la concentración de sales en el agua (y en el suelo). Este proceso de evaporación es lo que seguramente sucedió en la zona de la laguna El Tule (ZAC) donde se colectó la muestra. Con base en la concentración de litio (25 $\mu\text{g/l}$), la muestra de Salinas parece corresponder con una mezcla de flujos local e intermedio.

En la figura 4.20 se presenta la ubicación de los grupos de agua identificados en el área de estudio para los datos de 1999 e igualmente se incluyen aquellas muestras del trabajo de Molina-Maldonado (1996) correspondientes con el estado de Aguascalientes. Como se puede apreciar, no existe una distribución geográfica específica de los grupos, lo que se debe primordialmente a que son muestras de pozos que presentan diferente profundidad, diseño, operación y caudal de extracción, entre otros. No obstante, las muestras de los grupos 5 y 8 se encuentran preferentemente en la porción centro-norte y noroeste del área de estudio, en el estado de Zacatecas, y parecen presentar mayor interacción con las rocas sedimentarias que afloran en esta porción. Por su parte, el grupo 3 parece extraerse más al oeste del área de estudio, con excepción de dos muestras localizadas hacia Villa de Reyes (SLP) y oeste de San Luis de la Paz (GTO).

DATOS DEL 2010

Para los datos del 2010 se tomaron muestras de los diferentes grupos de agua definidos previamente, con excepción de aquel de tipo local (ver figura 4.21). Al hacer la comparación entre los datos hidroquímicos de las muestras tomadas en el 2010 con sus correspondientes de 1999 se aprecia alguna variación en la concentración de diferentes elementos (ver figura 4.22) que muestran la inestabilidad en la calidad química del agua, aspecto que no se contempla por las autoridades encargadas de la gestión del agua en el territorio nacional, quienes tienen la creencia que en un pozo se obtiene agua de una misma calidad a través del tiempo. Como se indicó previamente, parte del agua que se extrae en el área de estudio corresponde con mezcla de flujos, esto como resultado de un ineficiente diseño y construcción de pozos, extracción no regulada y en ocasiones excesiva (caudal alto y aumento del número de aprovechamientos), y en general, por desconocer el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea. Esta situación hace evidente el requerimiento de hacer este tipo de estudios con el fin de obtener aproximaciones más cercanas de los múltiples procesos que se tienen en el subsuelo, los cuales a su vez, conducirán a la comprensión del flujo subterráneo que será la base científica para la implementación de cualquier proyecto hidrológico.

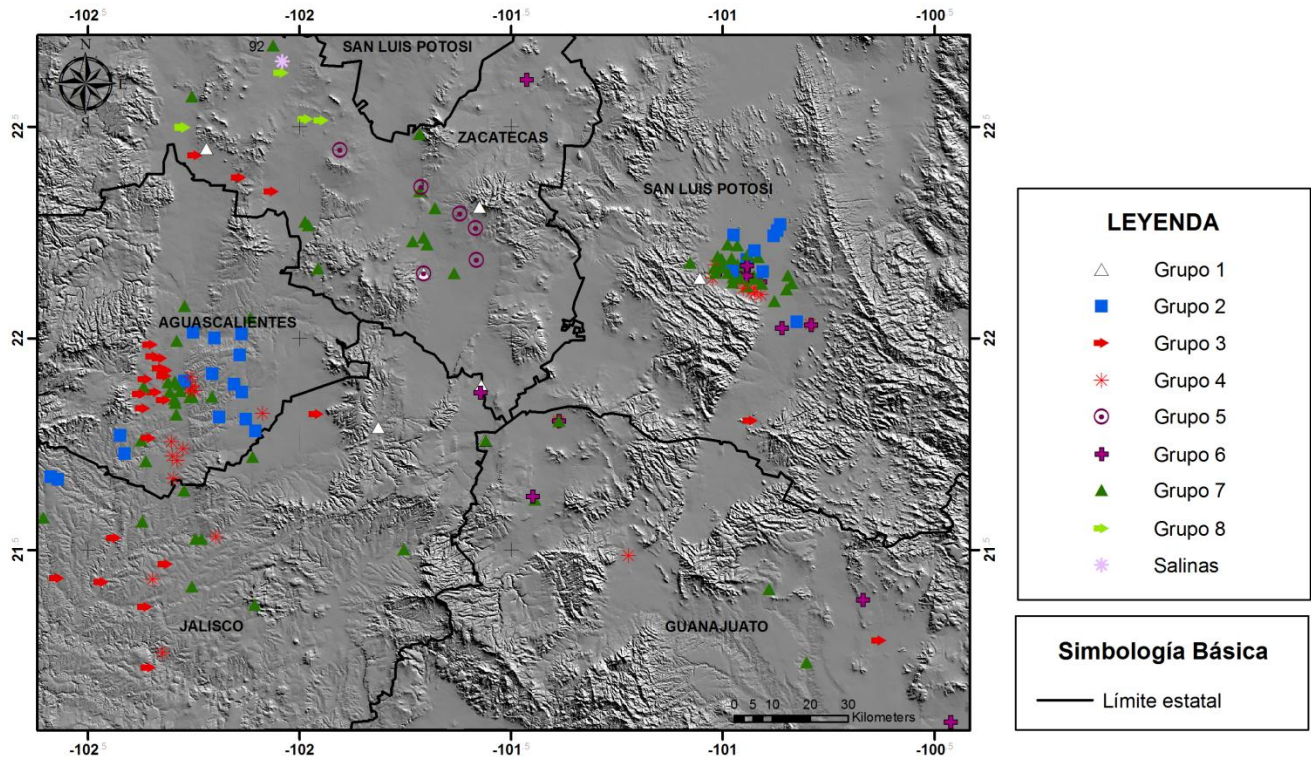


Figura 4.20. Localización de los diferentes grupos de agua definidos en la presente investigación y aquellos definidos previamente por Molina-Maldonado (1996) para el estado de Aguascalientes.

Con base en el análisis hidroquímico, se obtuvo que las muestras 63, 99, 123, 137, 34 (ver tabla 4.9, figura 4.22) no presentan cambios significativos en las concentraciones químicas, considerando a su vez el límite de detección del equipo que puede ocasionar lecturas variables en el intervalo de incertidumbre. A continuación se describen algunas variaciones que se observaron en la química del agua de diversas muestras, iniciando con aquellas cuyos cambios son más leves.

Muestra 102: aumentó su temperatura en 1° C, sin embargo, disminuyó levemente en cloruro, litio, calcio y magnesio (2.7, 0.02, 4.8 y 2.1 mg/l, respectivamente).

Muestra 132: aumentó su temperatura en 1.4° C y contenido en sodio (6.2 mg/l), disminuyó en cloruro y calcio (6.9 y 4.1 mg/l, respectivamente).

Muestra 68: aumentó temperatura 3° C pero disminuyó en cloruro y litio (4 mg/l y 17 µg/l, respectivamente).

Muestra 69: aumentó el sodio (31 mg/l), su temperatura (1.5° C), duplicándose el contenido de calcio (de 17.6 a 35.6 mg/l) y aumentando considerablemente la concentración de magnesio (de 0.13 a 0.4 mg/l).

Muestra 64: disminuyó temperatura casi 6° (5.7° C) y cloruro casi la mitad (de 6.2 a 2.6 mg/l); aumenta más de un tercio su contenido en calcio (de 30.5 a 41.8 mg/l) y magnesio (de 2.6 a 4.4 mg/l).

Muestra 29: disminuyó notablemente concentraciones de la mayoría de los elementos, entre ellos: cloruro (de 20 a 5 mg/l), sulfatos (de 48 a 15.5 mg/l), sodio (de 103 a 72 mg/l), potasio (de 27.2 a 1.3 mg/l), magnesio (de 5.54 a 0.03 mg/l): el calcio bajó más de la mitad (de 23.9 a 10.3 mg/l), el litio y la temperatura quedaron prácticamente igual (el litio aumentó de 0.104 a 0.109 mg/l y la temperatura tan sólo aumento 0.2° C).

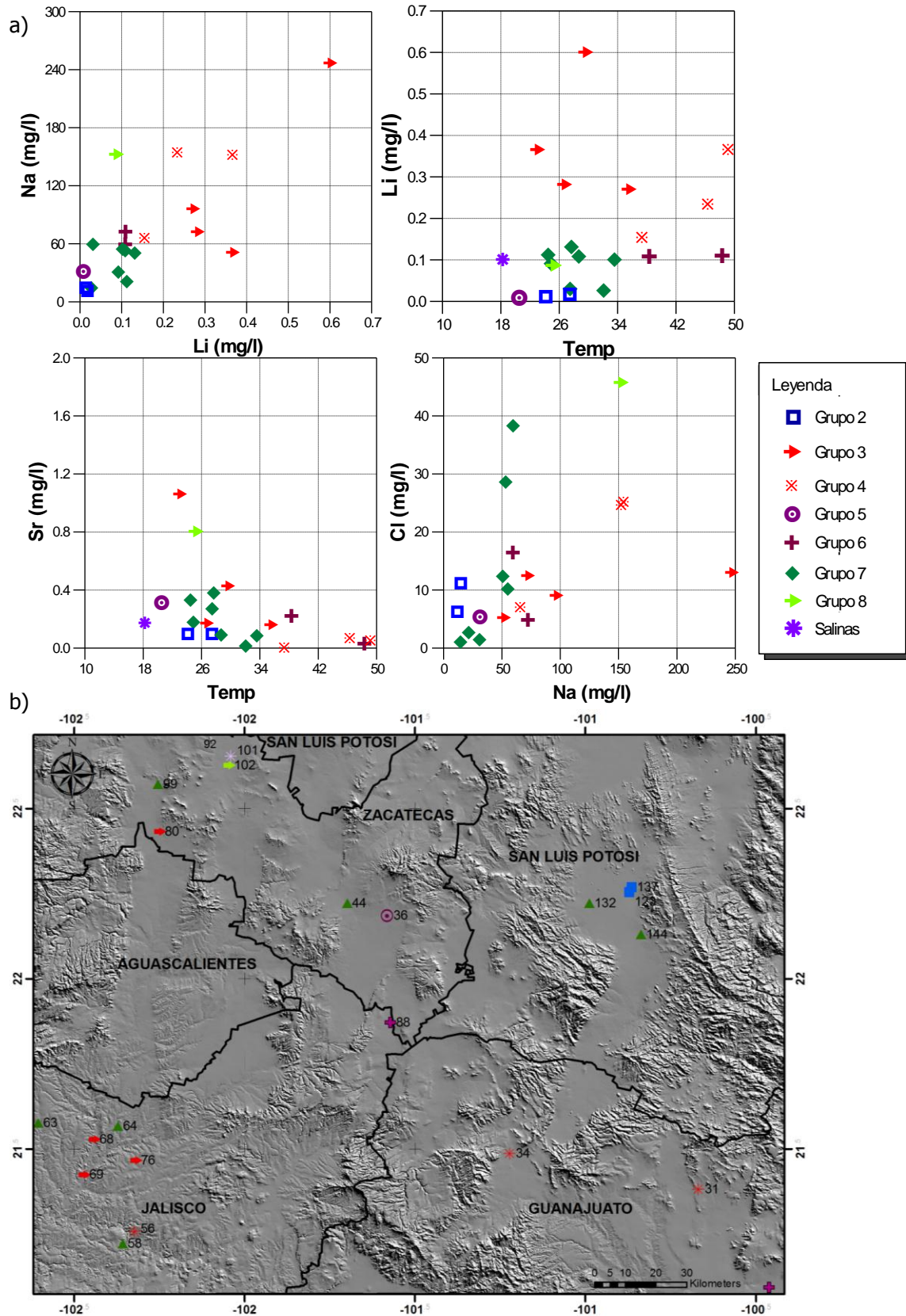


Figura 4.21. a) Grupos definidos para las muestras del 2010 a través del análisis hidroquímico; y b) su ubicación espacial

Tabla 4.9. Comparación entre las muestras de agua de 1999 y 2010 donde se aprecia la ganancia o pérdida de diferentes elementos (temperatura en ° C)

Muestra	Temp	Na	Li	Mg	K	Ca	Cl	HCO ₃	SO ₄
29	+0.2	-30.9	0.00	-5.52	-25.90	-13.6	-15.1	-172.8	-32.5
31	+0.3	+85.5	+0.25	+0.05	+0.60	-5.1	+12.7	+29.7	+16.9
34	+0.8	-2.0	+0.01	-0.02	-0.10	+0.3	+0.9	-17.7	-6.7
36	+5.1	-19.2	0.00	+0.07	-16.17	+2.0	-0.8	-122.5	-32.8
44	0.0	+4.1	0.00	+0.21	+1.82	-3.2	+19.1	-73.9	-11.9
56	+3.2	-12.5	-0.01	-0.16	-0.27	-0.9	+19.0	-102.5	+2.0
58	-5.9	-244.9	-0.49	+1.47	-7.00	+25.3	-58.7	-79.5	-499.1
63	0.0	-1.4	-0.01	-0.05	-0.08	-0.3	-3.6	+7.5	-0.3
64	-5.7	-2.0	0.00	+1.80	+4.15	+11.2	-3.6	+15.0	+2.6
68	+3.2	-7.0	-0.02	+0.73	+0.41	0.0	-4.0	+17.8	-7.4
69	+1.5	+31.0	-0.05	+0.27	+1.39	+18.0	-2.4	+57.3	+152.0
76	+3.3	-0.3	-0.02	0.00	+0.40	-0.7	-4.8	-5.4	-12.3
80	-0.6	0.0	+0.06	+0.09	+0.97	-1.5	-2.9	-6.5	-13.7
88	+1.5	+9.1	+0.05	-0.07	-1.75	-3.8	-5.1	-38.9	-7.9
99	+0.3	+0.5	-0.02	-0.38	-0.87	-2.0	-2.6	+37.8	+10.4
101	-2.9	-21900.0		+0.16	-194.20		-24592.0	-61711.3	-9250.0
102	+1.0	-4.8	-0.02	-2.13	-5.66	-4.8	-2.7	+0.8	-39.0
123	-1.1	+0.3	0.00	+0.11	+0.03	-0.6	-1.2	-3.2	+2.2
132	+1.4	+6.2	0.00	-0.37	-4.44	-4.1	-6.9	-16.6	-10.7
137	+0.8	-1.9	0.00	-0.20	-1.24	+1.1	-3.0	+4.5	+2.5
144	+0.6	-6.9	-0.05	-0.15	-2.09	-11.0	-5.3	-27.3	-71.0

Las muestras que se señalan a continuación presentan cambios importantes que condujeron al cambio de tipo de agua obtenida a la hora de la extracción:

Muestra 76: aumentó temperatura 3°C, disminuyó en cloruro (4.83 mg/l), litio (21 µg/l) y sulfato (12.3 mg/l), pasando de agua tipo HCO₃>SO₄-Na a HCO₃-Na

Muestra 80: aumentó en litio (64 µg/l), disminuyó en sulfato (13.7 mg/l), cambió de tipo de agua de HCO₃>SO₄-Na>Ca a HCO₃-Na>Ca

Muestra 56: aumentó su temperatura en 3.2° C, asimismo, su concentración en cloruros incrementó considerablemente (de 6 a 25 mg/l); bajó un poco su contenido de cationes (sodio: 12.5 mg/l, calcio: 0.9 mg/l) y litio (14 µg/l), cambió de agua HCO₃>SO₄-Na a SO₄>HCO₃-Na.

Muestra 44: aumentó casi el doble en cloruros (de 19 a 38 mg/l), pasó de agua HCO₃>SO₄-Na>Ca a HCO₃>Cl-Na>Ca, disminuyendo levemente en calcio (de 41 a 38 mg/l).

Muestra 36: cambió de agua HCO₃>SO₄-Na>Ca a HCO₃>SO₄-Ca>Na, aumentó su temperatura en 5° C y disminuyó un tercio su contenido de Na+K (de 88 a 52 mg/l).

Muestra 88: aumentó 1.5°C en su temperatura, 9.1 mg/l de sodio y casi el doble de litio (de 63 a 108 µg/l); disminuyó 7.9 mg/l de sulfato, 39 mg/l de bicarbonatos, 3.8 mg/l de calcio y casi un tercio de cloruro (de 21.6 a 16.5 mg/l), entre otros. El agua pasó de HCO₃-Na>Ca a HCO₃>SO₄-Na>Ca.

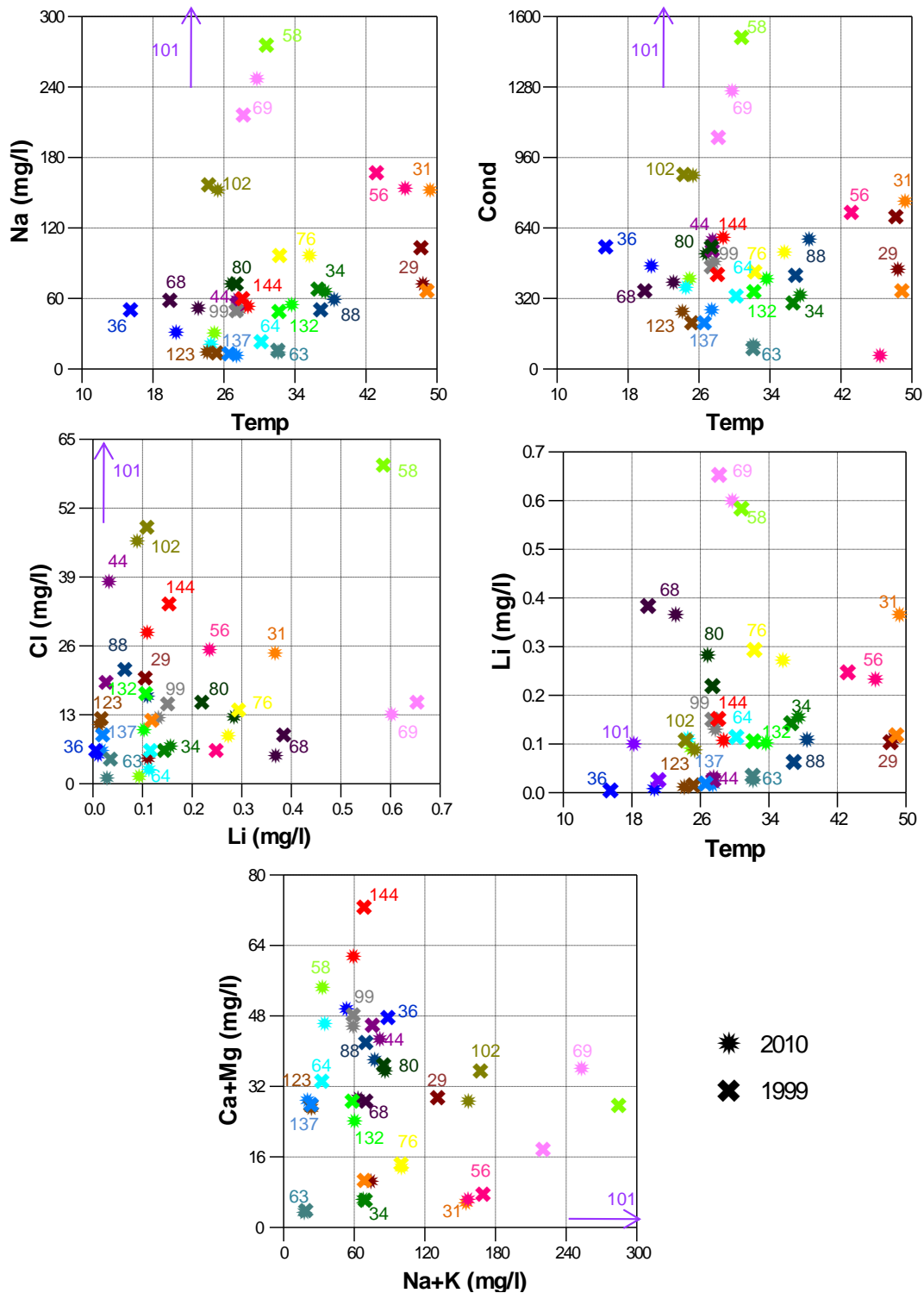


Figura 4.22. Comparación química entre las muestras de agua de 1999 y 2010.

Muestra 144: pasó de agua $SO_4 > HCO_3 - Ca > Na$ a $HCO_3 > SO_4 - Ca > Na$, aumentó su temperatura $0.6^\circ C$ pero de manera general, disminuyó su concentración de diversos elementos químicos, entre ellos: cloruro (5.31 mg/l), calcio (11 mg/l), litio (45 $\mu g/l$), sodio (6.9 mg/l), bicarbonatos (27 mg/l), sulfato (71 mg/l).

De los cambios más significativos se tiene la muestra 31, la cual estaba clasificada como mezcla de flujo regional e intermedio (grupo 6) pero con los datos del 2010 queda incluida en el grupo 4 como flujo regional, ya que se duplicó el contenido de sodio (de 66.5 a 152 mg/l), cloruro (de 12 a 24 mg/l) y se triplicó la concentración de litio (117 a 365 µg/l).

Por su parte, la muestra 58 es la que presenta mayor variación en comparación con las demás; clasificada con los datos de 1999 como regional (grupo 3), de tipo $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 - \text{Na}$, con la nueva toma del 2010 se cataloga como mezcla entre flujos intermedio y regional (grupo 7), tipo de agua $\text{HCO}_3 - \text{Ca} > \text{Na}$. Disminuyó notablemente en las concentraciones de sodio (casi nueve veces, de 275 a 30 mg/l), cloruro (de 60 a 1.42 mg/l), litio (casi 5 veces, de 584 a 91 µg/l), sulfato (de 500 a 0.9 mg/l), entre otros. Por su parte, aumentó el doble de su contenido en calcio (de 25 a 50 mg/l) y magnesio (de 2.6 a 4.1 mg/l; ver figura 4.22 y tabla 4.9).

Por último, la muestra salinas disminuyó su temperatura en casi 3°, así como la mayoría de los elementos medidos, tales como: sodio, cloruro, potasio, magnesio, etc. (ver tabla 4.9), con excepción del calcio y el litio que se desconocen los valores del 2010 debido al límite de detección que manejó el laboratorio.

De acuerdo con estos resultados, se corrobora lo que señalan diversos autores (Huizar, 1998; Carrillo-Rivera *et al.*, 2002; Edmunds *et al.*, 2002; Huizar-Álvarez *et al.*, 2004; Carrillo-Rivera *et al.*, 2007; entre otros) referente al cambio que se produce en la calidad química del agua que se extrae de pozo con el tiempo de extracción, que va ligado con el diseño y operación de cada pozo particular. Las investigaciones al respecto se han desarrollado a través de pruebas de bombeo realizadas especialmente en las cuencas de México y San Luis Potosí. Por lo tanto, las autoridades gubernamentales encargadas del suministro y administración del agua deben considerar esta situación, dejar así aquel pensamiento errático que contemplaba el agua subterránea como un elemento que no sufre modificaciones, pudiendo ser estas últimas de origen natural (procesos en el subsuelo) o por actividades humanas (extracción, contaminación).

La comparación de aquellas muestras de agua del estudio de CNA (1999) y las tomadas en el presente estudio (2010) señalan que no existe un patrón generalizado que permita establecer un cambio colectivo de las muestras sino que por el contrario éste ocurre de manera puntual debido principalmente a la operación que se le dé a cada pozo o ligado a posibles impactos locales, es decir, por la extracción de agua en zonas cercanas.

4.2.3. Vulnerabilidad del agua subterránea a la variación en la precipitación

El deterioro del entorno natural evidentemente ha sido resultado del crecimiento poblacional, no obstante, existen otras variables que deben contemplarse en estudios ambientales tales como temperatura, precipitación, etc., las cuales están sujetas a procesos naturales de carácter continuo y dinámico que son parte de un sistema cuyas condiciones han cambiado y lo seguirán haciendo. Por esta razón, entre otras, es deseable tener mayor precaución y preocupación por conocer a mayor detalle posible el funcionamiento del sistema naturaleza ya que se es dependiente de las condiciones actuales creadas por la humanidad en el planeta y por ende más vulnerable a cambios en las condiciones originales del mismo.

En el presente apartado se pretende identificar efectos negativos asociados con la historia de la dinámica de la precipitación sobre los sistemas de flujo del agua subterránea, teniendo en cuenta que la lluvia es su principal fuente de abastecimiento y que ésta se encuentra relacionada con la variación climática, referida a una disminución en la lluvia, y en consecuencia de la recarga de agua al subsuelo. En esta investigación se utiliza el término *variación climática*, el cual originalmente se emplea para referirse al cambio en el clima debido a aspectos naturales; no obstante, aquí el primer término no descarta la posibilidad de alteración al clima por actividad antrópica o lo que se conoce con el término de *cambio climático*.

De esta manera, la técnica para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea a la variación en la precipitación consiste en definir los diferentes sistemas de flujo presentes en el área de estudio y su grado de dependencia con la lluvia, estableciendo así lo que aquí se denomina *vulnerabilidad a la variación de la precipitación*. Estos resultados permiten proponer una metodología alterna que conduzca a identificar áreas prioritarias para un manejo integrado, que a su vez genere conciencia a la población para lograr un uso razonable del agua subterránea y, en general, lograr el entendimiento de cómo ésta funciona para lograr una protección positiva del ambiente.

- Susceptibilidad vs Vulnerabilidad

Al igual que otros términos relacionados con la jerga economicista, los conceptos de susceptibilidad y vulnerabilidad muestran en la literatura un gran número de definiciones, sin existir alguna establecida o acordada desde la perspectiva internacional. Por el contrario, se presentan definiciones asociadas con algún proceso físico específico (ej. vulnerabilidad a la contaminación, a la inundación, a deslizamientos, etc.). Generalmente, al hablar de agua subterránea y vulnerabilidad se hace referencia a la contaminación, sin establecer con claridad si esto es "*vulnerabilidad del acuífero*" que incluye el material geológico y agua de saturación, o sólo vulnerabilidad del agua a contaminarse. Sin embargo, es común encontrar trabajos en este sentido donde una perspectiva de los sistemas de flujo de agua subterránea se encuentra ausente.

En ocasiones se presenta confusión entre susceptibilidad y vulnerabilidad, por lo que es necesario mostrar su diferencia. La susceptibilidad se considera como "*el grado de exposición de un elemento a sufrir un fenómeno físico de origen natural o antrópico potencialmente dañino*" (Peñuela y Miranda, 2001), aquí se puede indicar que el elemento corresponde con el agua subterránea y el fenómeno físico es la disminución de la precipitación ya sea por variación y/o cambio climático. Las definiciones de *vulnerabilidad* encontradas en la literatura sobre Ciencias de la Tierra muestran sólo un análisis disciplinario, lo cual crea confusión al usar la misma palabra para establecer diferentes y, en casos, contrastantes conceptos. Algunas de estas definiciones son:

- 1) Vrba y Zaporozec (1994, citado por Auge, 2004): "una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales"
- 2) Committee on Techniques for Assessing Ground Water Vulnerability (1993) "la tendencia o probabilidad de los contaminantes de alcanzar una posición específica en el sistema de agua subterránea después de su introducción en algún lugar por encima del acuífero superior"

- 3) De acuerdo con el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007), la vulnerabilidad al cambio climático es "el grado en que los sistemas geofísico, biológico y socio-económico son susceptibles e incapaces de hacer frente a impactos adversos del cambio climático. Asimismo, Watson *et al.* (1996; citado por Olmos, 2001) señalan que esta vulnerabilidad no sólo depende de la sensibilidad del sistema sino también de su capacidad para adaptarse a nuevas condiciones climáticas.

Así, en el presente documento se establece como vulnerabilidad del agua subterránea al grado de variación en la precipitación que se refleja en menor/mayor cantidad de recarga como resultado de un proceso físico (variación y/o cambio climático) de origen natural con influencia antrópica indirecta; lo que implica que la vulnerabilidad a la precipitación no sólo está en función de la variación en la cantidad de lluvia sino que a su vez incluye propiedades intrínsecas del elemento expuesto (obtenidas a través de la definición de los sistemas de flujo) que permiten determinar con mayor aproximación la afectación al agua subterránea.

- Vulnerabilidad de los sistemas de flujo

Con base en la TSF (Tóth 2000), un flujo local es el sistema de flujo de agua subterránea más simple dentro de la jerarquía definida de redes de flujo en el plano vertical. Se presenta con preferencia en territorio con topografía abrupta, donde las zonas de recarga y descarga se localizan en la misma cuenca hidrográfica. Este tipo de sistemas se encuentra incluido en un territorio de pocos kilómetros cuadrados, por lo que representa un sistema dinámico donde la descarga de agua (manantial) se refleja inmediatamente posterior a un periodo de lluvia particular y es por tanto de corta duración; siendo la presencia de la descarga dependiente de la época de lluvia.

A medida que un flujo es de jerarquía mayor (intermedio y regional) su descarga se torna más estable siendo menos dependiente de variaciones en la precipitación. Debido a su gran trayectoria de recorrido y gran volumen involucrado será más difícil de detectar el impacto por cambios en el régimen de precipitación en comparación con un flujo local. Por ejemplo en la zona de la ciudad de San Luís Potosí se le atribuye al agua regional extraída que tiene una calidad y potencial constantes, una edad promedio de 5,900 años (Cardona *et al.*, 2012). Es evidente que la zona de recarga para estos flujos se encuentra a centenares de kilómetros de distancia por lo que el exceso o ausencia de lluvia desde el inicio de la extracción a mediados del siglo XX no se ha manifestado en el cambio en calidad fisicoquímica o en disminución (o incremento) de caudal.

Esto sugiere que el agua de un flujo local es muy dependiente de la precipitación, en caso de presentarse una temporada de sequía estas manifestaciones serán las primeras afectadas debido a su corto recorrido desde su recarga hasta su descarga. Adicionalmente, un flujo local es de suma importancia debido a que su calidad química es la más apta para consumo humano sin generar afectaciones en la salud de la población, por lo que no hay necesidad de remover elementos químicos dañinos a través de plantas de tratamiento u otros procedimientos que en muchas ocasiones no son del todo útiles.

Los sistemas de flujo presentan una susceptibilidad similar de efecto a su recarga por variación en la precipitación; sin embargo, los flujos de tipo local serán los primeros en que se manifestarán los cambios en la dinámica de la lluvia debido a que el volumen de almacenamiento en el subsuelo es reducido, comparativamente con los otros flujos (intermedio y regional), cuyo recorrido del agua tarda centenas a miles de años en moverse de su zona de recarga a la de descarga. Esta es la principal diferencia entre susceptibilidad y vulnerabilidad a la precipitación. Es decir, la vulnerabilidad incorpora las propiedades del agua subterránea desde el punto de vista de su funcionamiento sistémico; con base en la definición de la jerarquía de flujos se obtiene a su vez información sobre la influencia de la precipitación en el volumen del agua subterránea. Por lo tanto, es factible asignar a los flujos locales un grado de vulnerabilidad a la precipitación más alto (5), a los flujos regionales el más bajo (1) y aquellos intermedios un valor medio (3). Para calcular la vulnerabilidad del agua de mezcla se puede hacer un promedio de acuerdo con los flujos incorporados, obteniéndose así una susceptibilidad de 4 para el flujo de mezcla local e intermedio y de 2 para la mezcla de intermedio y regional (tabla 4.10).

Tabla 4.10. Vulnerabilidad de los sistemas de flujo por la variación en la precipitación

Grupo de agua	Flujo	Vulnerabilidad
Grupo 1 y 5	Local	5 Muy Alta
Salinas	Mezcla local-intermedio	4 Alta
Grupo 2 y 8	Intermedio	3 Media
Grupo 6 y 7	Mezcla intermedio-regional	2 Baja
Grupo 3 y 4	Regional	1 Muy baja

La figura 4.23 muestra la zonificación de la vulnerabilidad del agua subterránea con base en los datos del estudio de CNA (1999), por lo que resalta la necesidad de actualizar los datos e incluir la mayor cantidad posible de datos de pozos y manantiales existentes en el área de estudio; sin embargo, se considera como una metodología alterna o complemento de las actuales y de suma importancia por manejar la información con base en la definición de los sistemas de flujo de agua subterránea.

4.2.4. Cálculo de la temperatura mínima de equilibrio del agua subterránea con geotermómetros

El geotermómetro es una herramienta que permite determinar la temperatura mínima de equilibrio a profundidad del agua subterránea basándose en la composición química del agua y las diversas reacciones teóricas que se generan por la interacción agua-roca. El uso de geotermómetros se basa en los supuestos que: i) las reacciones químicas generadas a profundidad dependen de la temperatura, ii) todos los constituyentes involucrados en la reacción agua-roca son abundantes (Molina-Maldonado, 1996). Asimismo, Cardona (2007) señala algunas limitantes que restringen este tipo de cálculos, estos son:

- 1) No hay mezcla de aguas
- 2) No existe precipitación de sílice y otros minerales durante el ascenso del agua subterránea
- 3) No se presente adsorción y/o desorción de reactantes en el acuífero
- 4) Existe equilibrio químico entre agua y roca

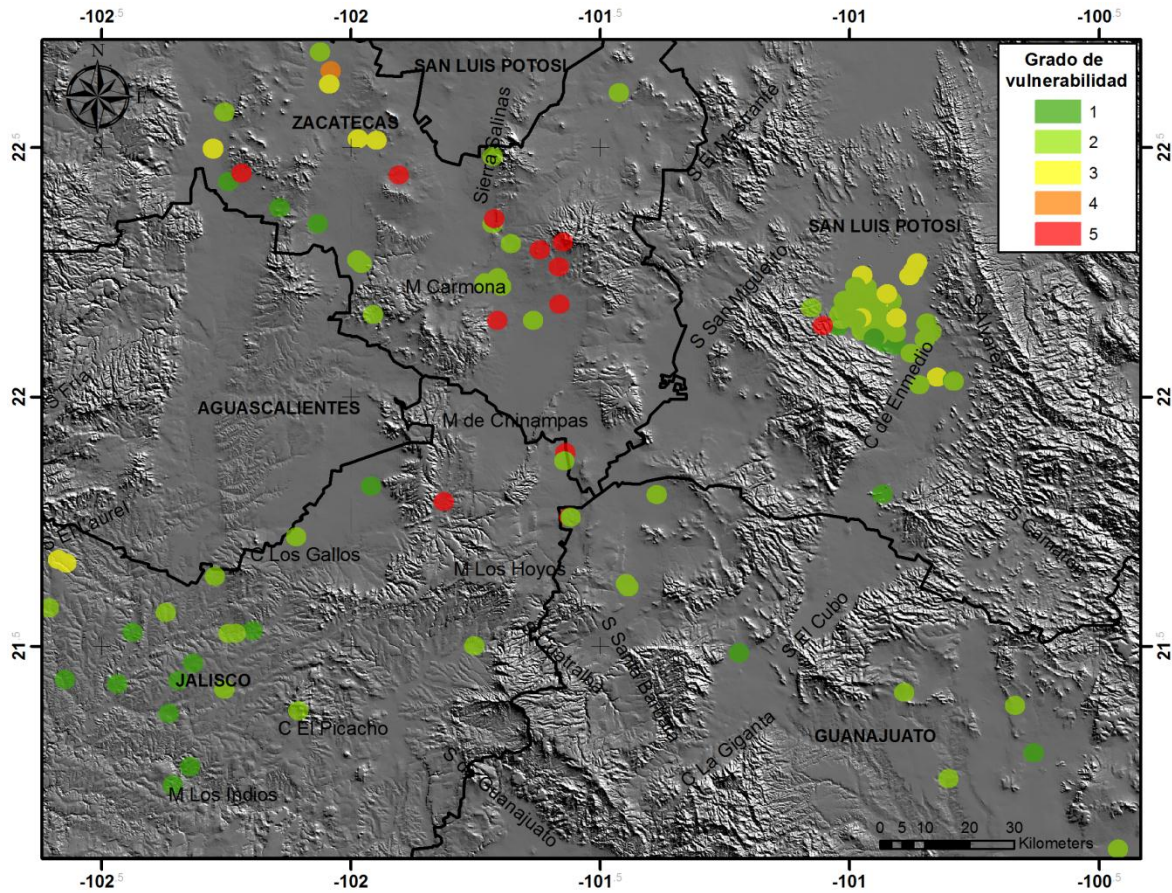


Figura 4.23. Zonificación de la vulnerabilidad del agua subterránea a la variación en la precipitación

En los estudios hidrogeoquímicos se emplean diferentes tipos de geotermómetros de acuerdo con la posible temperatura que alcance el agua a profundidad, así como del tipo de minerales con que el agua estuvo en contacto y quedó manifiesto en su composición. Los geotermómetros más usados son aquellos basados en la solubilidad del sílice y sus polimorfos (calcedonia, cristobalita y sílice amorfo), así como los basados en las relaciones de dos o más constituyentes en solución (Na-K, Na-K-Ca, entre otros). Para el uso del geotermómetro de cationes existe el cálculo de un índice de madurez (IM), definido por Giffenbach (1988), que indica el grado de equilibrio agua-roca. Su ecuación es:

$$IM = 0.315 \log(K/Mg) - \log (K/Na)$$

Así, el uso de geotermómetros es confiable en aguas maduras, y por el contrario no lo es en aguas inmaduras debido a que tan sólo refleja los efectos de disolución de la roca encajonante más no el equilibrio con la misma. Un IM de 2.66 es considerado de agua en equilibrio y aquel con un valor de 2 representa la línea que divide las aguas inmaduras de aquellas con equilibrio parcial (ver figura 4.24; citado por Aguilera, 2008). Se considera adecuado implementar los geotermómetros de cationes a aquellas muestras que presentan un IM mayor o igual a dos.

Los valores obtenidos de índices de madurez para las muestras de agua de 1999 y 2010 se encuentran en el anexo 8, su representación gráfica en el diagrama triangular de Giggenbach se exhibe en la figura 4.25. Por su parte, en la tabla 4.11 se presentan aquellas muestras cuyo IM es mayor a dos y que por tal razón es confiable el uso del geotermómetro de Na-K-Ca.

Debido a que no todas las muestras alcanzaron el equilibrio agua-roca que permita el uso del geotermómetro de Na-K-Ca, se considera adecuado utilizar el geotermómetro de calcedonia ya que es uno de los más recomendados para agua de baja temperatura (<110°C).

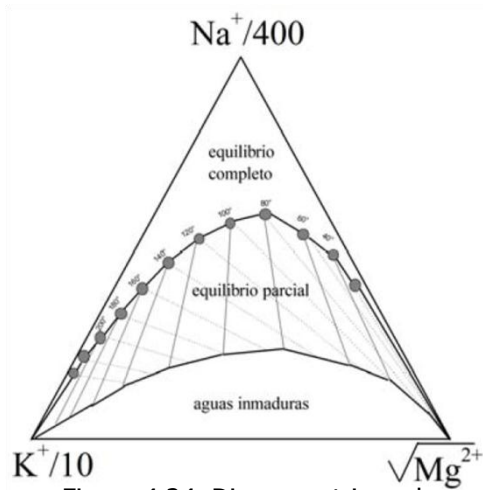


Figura 4.24. Diagrama triangular Giggenbach teórico

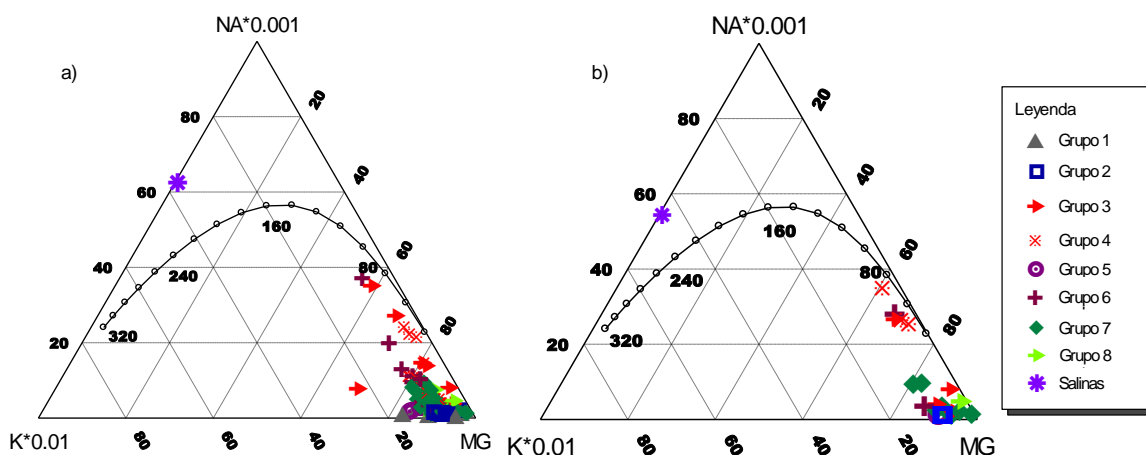


Figura 4.25. Diagrama triangular Giggenbach para las muestras de agua de: a) 1999 y b) 2010

Tabla 4.11. Muestras de agua subterránea con índice de madurez mayor a dos

Datos de 1999			Datos de 2010		
Muestra		IM	Muestra		IM
30	Agua Clara	2.17	29-2010	Nacimiento	2.28
31	Ex-Hacienda	2.31	31-2010	Ex-Hacienda	2.36
34	pSMI2-19-X	2.18	34-2010	pSMI2-19-X	2.28
56	Pozo 4	2.13	56-2010	Pozo 4	2.22
69	Ornelas	2.21	69-2010	Ornelas	2.03
70	S Sebastián	2.13	101-2010	Salinas	2.36
101	Salinas	2.60			

El cálculo de la temperatura mínima de equilibrio con estos dos geotermómetros se realizó usando el software AQUACHEM (1997) obteniéndose valores incongruentes para aquellas muestras de agua de tipo local e intermedio, lo cual se cree es por su elevado contenido de SiO₂, resultado de la interacción del agua con material arcilloso como señala Cardona (2007). Tal software incluye en su base de datos los geotermómetros definidos por

Fournier (1977 y 1979), para los geotermómetros de Calcedonia y Na-K-Ca, respectivamente. Sus fórmulas son:

$$T = \left(\frac{1032}{4.69 - \text{Log}(\text{SiO}_2)} \right) - 273.15 \quad T = \left(\frac{1647}{\text{Log} \left(\frac{\text{Na}}{\text{K}} \right) + \beta \text{Log} \left(\left(\frac{\sqrt{Ca}}{\text{Na}} \right) + 2.06 \right) + 2.47} \right) - 273$$

Donde $\beta = 4/3$ para $T < 100^\circ\text{C}$ y $\text{Log} \left(\left(\frac{\sqrt{Ca}}{\text{Na}} \right) + 2.06 \right) > 0$, o por el contrario $\beta = 1/3$

La temperatura es en grados Celsius y la concentración de cationes en mg/l. De esta manera, las temperaturas mínimas de equilibrio determinadas y consideradas confiables se muestran en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Temperatura mínima de equilibrio para las muestras de agua tipo regional. Las casillas grises corresponden con las muestras cuyo IM es mayor a dos.

DATOS 1999		TEMPERATURA (°C) Δ TEMPERATURA (°C)				PROFUNDIDAD (m)				
Muestra	Grupo	Calcedonia		Na-K-Mg		Calcedonia		Na-K-Mg		
		Calcedonia	Na-K-Mg	Calcedonia	Na-K-Mg	31.4°C/km	39.3°C/km	31.4°C/km	39.3°C/km	
1	Villa de Reyes	3	113	208	96	191	3,057	2,443	6,083	4,860
30	Agua Clara	3	98	107	81	90	2,580	2,061	2,866	2,290
58	Pozo 9	3	79	130	62	113	1,975	1,578	3,599	2,875
59	Labor Montoya	3	87	137	70	120	2,229	1,781	3,822	3,053
60	Teocaltiche3	3	97	221	80	204	2,548	2,036	6,497	5,191
68	Belen de Refugio	3	105	193	88	176	2,803	2,239	5,605	4,478
69	Ornelas	3	99	106	82	89	2,611	2,087	2,834	2,265
71	La Cuadra	3	75	117	58	100	1,847	1,476	3,185	2,545
76	Acosta	3	74	111	57	94	1,815	1,450	2,994	2,392
80	Luis Moya	3	67	189	50	172	1,592	1,272	5,478	4,377
81	Noria Molinos	3	52	156	35	139	1,115	891	4,427	3,537
82	Tierra Blanca	3	108	194	91	177	2,898	2,316	5,637	4,504
86	Azulitos	3	109	237	92	220	2,930	2,341	7,006	5,598
5	Las Dalias	4	91	161	74	144	2,357	1,883	4,586	3,664
10	Z Industrial	4	90	155	73	138	2,325	1,858	4,395	3,511
11	Z Termal1	4	87	154	70	137	2,229	1,781	4,363	3,486
12	Z Termal2	4	86	153	69	136	2,197	1,756	4,331	3,461
13	J Sarabia	4	91	157	74	140	2,357	1,883	4,459	3,562
34	pSMI2-19-X	4	67	53	50	36	1,592	1,272	1,146	916
56	Pozo 4	4	57	77	40	60	1,274	1,018	1,911	1,527
70	San Sebastián	4	74	111	57	94	1,815	1,450	2,994	2,392
106	P-GUA4	4	58	188	41	171	1,306	1,043	5,446	4,351
107	Lag. Guadalupe	4	59	190	42	173	1,338	1,069	5,510	4,402
108	L Guada1	4	66	194	49	177	1,561	1,247	5,637	4,504
124	Lomas III (P-57)	4	61	171	44	154	1,401	1,120	4,904	3,919
135	Simón Díaz	4	67	170	50	153	1,592	1,272	4,873	3,893
139	V Zaragoza1	4	70	147	53	130	1,688	1,349	4,140	3,308
DATOS 2010										
68	Belén del Refugio	3	118	200	101	183	3,230	2,581	5,828	2,581
69	Ornelas	3	111	110	94	93	2,997	2,394	2,962	2,366
76	Acosta	3	83	117	66	100	2,103	1,680	3,185	1,680
80	Luis Moya	3	80	194	63	177	2,020	1,614	5,637	1,614
31	Ex-Hacienda	4	94	78	77	61	2,458	1,964	1,943	1,552
34	pSMI2-19-X	4	84	50	67	33	2,127	1,699	1,051	840
56	Pozo 4	4	66	75	49	58	1,557	1,244	1,847	1,476

La temperatura mínima de equilibrio obtenida, junto con el gradiente geotérmico local, permite determinar la profundidad mínima alcanzada por el agua subterránea en el subsuelo. Este gradiente se desconoce para el área de estudio y al igual que otros trabajos hidrogeológicos que incorporan el análisis con geotermómetros (Cardona, 1990; Carrillo-Rivera, 1992; Molina-Maldonado, 1996; Cardona, 2007) se considera viable el uso del gradiente geotérmico definido por Smith *et al.* (1979) para rocas similares en Zacatecas y Chihuahua que varía de 31.4 a 39.3°C/km. Asimismo, para el cálculo de la profundidad se requiere determinar la diferencia entre la temperatura calculada a través de geotermómetros y aquella ambiental a la hora de ingresar el agua al subsuelo, es decir, en la zona de recarga, para esto se consideró una temperatura ambiental de 17°C. Los resultados de estos cálculos se aprecian en la tabla 4.12; las casillas grises corresponden con las muestras cuyo IM es mayor a dos, por lo que el uso del geotermómetro Na-K-Ca se considera confiable, de igual modo, los cálculos para las demás muestras se incluyen sólo para comparación.

De acuerdo con los resultados (tabla 4.12), se aprecia que las profundidades determinadas con el geotermómetro de Na-K-Ca son congruentes con aquellas obtenidas con calcedonia, en especial aquellas asociadas con el grupo 3, por su parte, las del grupo 4 presentan diferencias significativas entre sí y con los resultados del geotermómetro de calcedonia. Al ver la diferencia entre las muestras que cuentan con datos de 1999 y 2010 (34, 56 y 69) se presenta un aumento en la temperatura del agua en su extracción (ver tabla 4.9) que indica un posible incremento en la profundidad de circulación. Para el caso de las muestras 34 y 56 el geotermómetro de Na-K-Ca refleja lo contrario, es decir, una disminución en la profundidad de circulación mientras que aquel de calcedonia muestra un aumento; adicionalmente, el agua clasificada como del grupo 4 se encuentra asociada con las rocas volcánicas, por lo que la disolución de sílice es un factor importante. Por último, la columna de resultados de profundidades obtenidas con la calcedonia exhibe valores más homogéneos entre sí, por lo que el presente estudio considera el geotermómetro de calcedonia como más confiable para el agua perteneciente al grupo 4.

Se obtuvieron profundidades que van de 900 hasta 3,200 m para el grupo 3 y de 1,000 a 2,500 m para las muestras del grupo 4. Estos resultados incorporan un mayor intervalo de profundidad que aquellos definidos por diversos autores para agua asociada con el grupo 4 (ver tabla 4.13).

Tabla 4.13. Profundidades determinadas por otros autores para agua termal en el área de estudio

Profundidad (km)	Fuente
1.5 a 1.9	Cardona (1990), Carrillo-Rivera (1992)
1.6 a 2.2	Molina-Maldonado (1996)
1.4 a 2.1	Cardona (2007)

4.2.5. Análisis comparativo regional

Aún no se conoce la localización de los límites físicos naturales del sistema de flujo subterráneo en la Mesa Central (que seguramente va más allá del área de estudio), por lo que se compararon algunos datos químicos del área con muestras de diferentes regiones como la cuenca de México (Edmunds *et al.*, 2002; Peñuela-Arévalo 2007), Aguascalientes (Molina-Maldonado, 1996), San Luis Potosí (Carrillo-Rivera, 1992), Lerma (CONACYT-SEMARNAT, 2005) (ver figura 4.26). La comparación permitió la definir tres tipos básicos de agua:

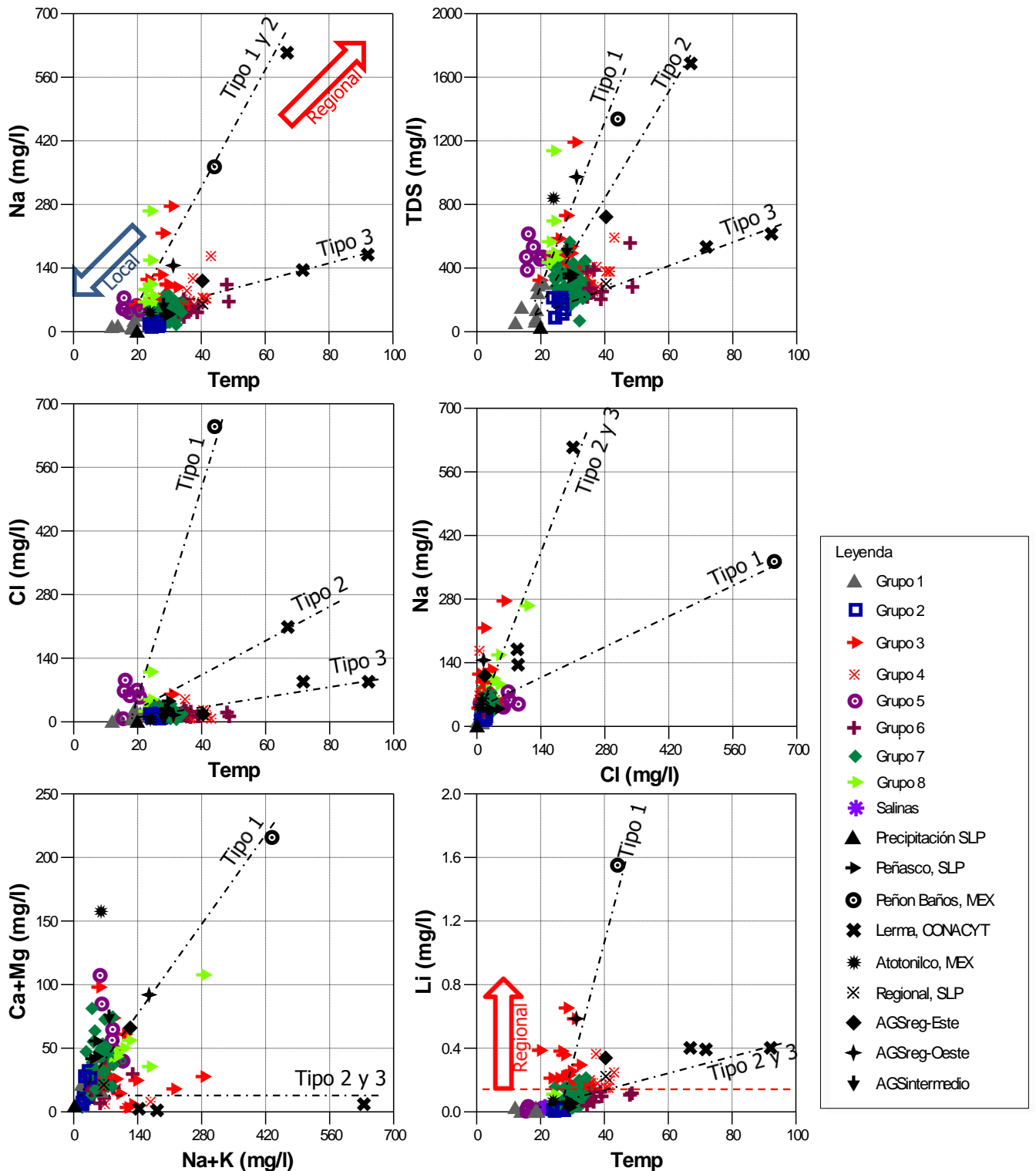


Figura 4.26. Comparación hidroquímica entre las muestras de agua analizadas en el presente estudio y de la cuenca de México (Edmunds *et al.*, 2002; Peñuela-Arévalo 2007), Aguascalientes (Molina-Maldonado, 1996), San Luis potosí (Carrillo-Rivera, 1992), Lerma (CONACYT-SEMARNAT, 2005)

- Tipo 1: Agua caracterizada por el agua del Peñón de los Baños (cuenca de México), la cual corresponde con un flujo regional que adquiere importantes concentraciones de diversos elementos (Na: 362 mg/l, Cl: 650 mg/l, Li: 1.55 mg/l, etc.; ver figura 4.26) y temperatura (44°C) durante su trayecto por el subsuelo.
- Tipo 2: Agua cuyo miembro extremo está representado por el manantial Paraíso Escondido (margen del Lago de Cuitzeo). De sus características fisicoquímicas resaltan los altos valores de sodio (613.6 mg/l), temperatura (66.7°C), moderada presencia de cloruro ((209 mg/l), litio (0.4 mg/l) y bajo contenido de Ca+Mg (5.7 mg/l).
- Tipo 3: Agua asociada con los manantiales "La Pitaya" en la cuenca del Lerma, estado de Guanajuato. Las principales características fisicoquímicas de este tipo de agua es su alta temperatura (~92°C) pero concentración de moderada a baja de diferentes aniones y cationes (Cl, 88 mg/l; Na, 169 mg/l; Li, 0.4 mg/l; Ca+Mg, 2.2 mg/l). Este patrón, junto con el análisis isotópico sugiere que la alta temperatura está ligada a procesos relacionados con un sistema geotérmico con minerales de la unidad geológica por donde circula (CONACYT-SEMARNAT, 2005).

El análisis regional permite apreciar que en el área de estudio se presentan, al parecer, los tres tipos de agua definidos previamente, sugiriendo: *i*) una posible conexión hidráulica que permita la circulación del agua por extensas distancias, incluso a través de diferentes provincias fisiográficas; y/o *ii*) configuración hidrogeológica semejante que atribuya al agua propiedades fisicoquímicas similares. No obstante, es necesario tener en cuenta que los datos del presente estudio provienen de muestras de pozo, es decir que el agua extraída corresponde con flujos que continúan su recorrido por el subsuelo y de los cuales se desconoce su manifestación superficial, inclusive históricamente no se contemplan zonas de descarga de dimensiones importantes en el área de estudio, por lo que posiblemente la primera suposición es factible y el agua subterránea, en este caso particular, presenta importantes distancias de recorrido.

4.3. Análisis isotópico

4.3.1. Agua de lluvia

Carrillo-Rivera *et al.* (2007) definieron la línea meteórica local (LML) para la cuenca de San Luis Potosí ($\delta^2\text{H} = 8.28 \delta^{18}\text{O} + 14.15$) que presenta un gran rango de variación del contenido isotópico seguramente por su posición geográfica, atribuyéndole humedad del Golfo de México, Mar Caribe y Océano Pacífico (Calva, 2011). Los datos usados para la determinación de la LML indican que los isótopos de la precipitación media son más pesados que aquellos del agua subterránea, lo que sugiere que la recarga fue favorecida por algunos eventos de precipitación particular, probablemente unos con alta tasa de precipitación (Carrillo-Rivera *et al.*, 2007). Asimismo, en este estudio se sugiere que la recarga al agua subterránea para diferentes sistemas de flujo (local, intermedio y regional) ocurrió en condiciones climáticas similares aunque aconteció en diferente periodo.

Calva (2011) presenta los resultados de los análisis isotópicos del agua de lluvia que se llevan hasta el momento del estado de San Luis Potosí, del proyecto conjunto entre el Área de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, el Instituto de Geografía de la UNAM y el Organismo Internacional de Energía Atómica. Este autor establece que los principales factores que controlan la distribución isotópica en la precipitación de tal región son: la longitud, la altitud y la temperatura. La línea meteórica

local se determinó para cada una de las zonas geográficas involucradas: Región Huasteca, Región Media, Región Centro y Región Altiplano (figura 4.27).

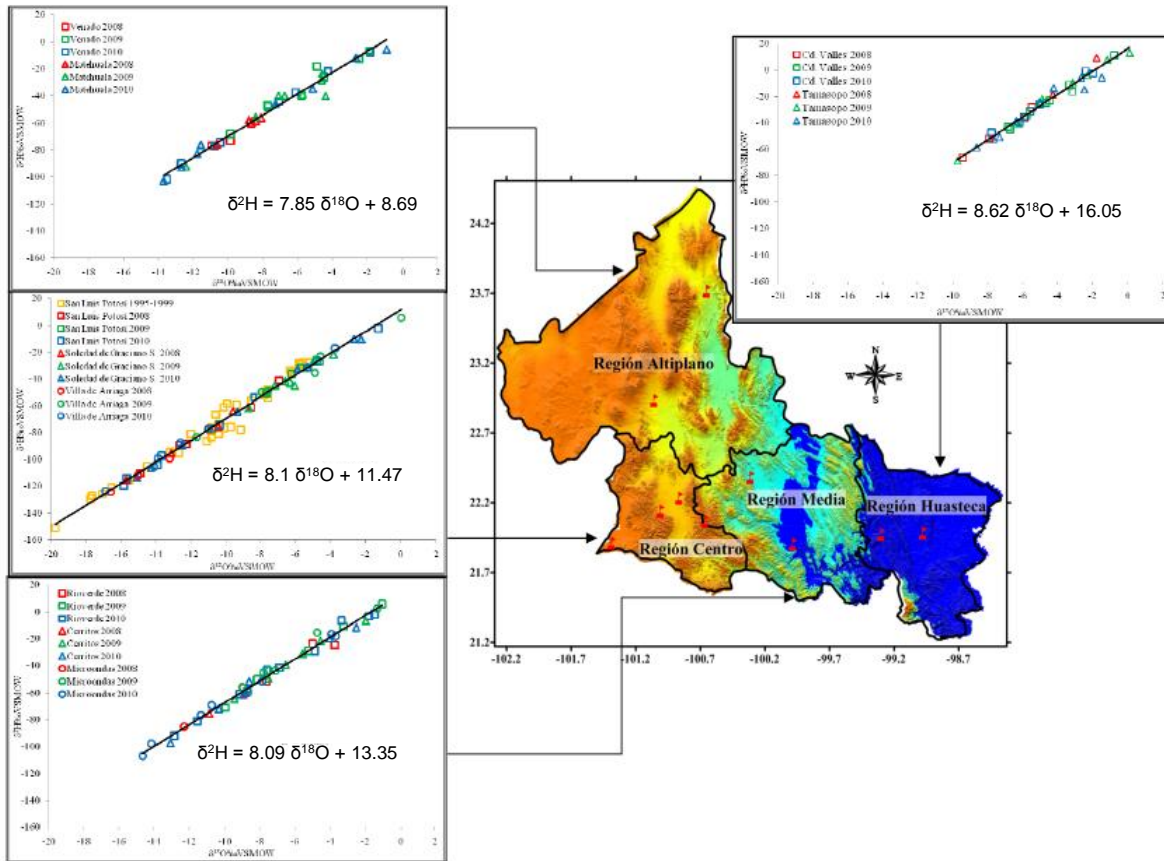


Figura 4.27. Líneas meteóricas locales definidas para el estado de SLP. Fuente: Calva, 2011

El Golfo de México y Mar Caribe brindan las fuentes de masa de vapor de agua para la región Huasteca. Por su parte, el Océano Pacífico es la principal fuente de masa de vapor de agua de la región Centro y Altiplano, alcanzando la región Media en menor proporción. De este modo, para las regiones Centro y Media se considera que existe interacción de masas de vapor de agua del Golfo de México, Mar Caribe y Océano Pacífico. Asimismo, Calva (2011) señala que los valores más altos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en el estado de San Luis Potosí se presentan en la región Huasteca debido a la cercanía con el mar (efectos continental y longitud). Calva (*op. cit.*) considera la posibilidad que los datos isotópicos en el estado de SLP pueden representar un período anormal en el origen y cantidad de la precipitación como resultado del fenómeno de "El Niño", sin embargo, esta afirmación sólo puede ser verificada dándole continuidad a la toma y análisis de isótopos en la región.

El área de estudio de la presente investigación incorpora la región centro del estado de San Luis Potosí. Al analizar los datos isotópicos, hasta abril del 2009, de las estaciones de San Luis Potosí con respecto a su elevación topográfica se aprecia una correspondencia (figura 4.28), las estaciones con menor altitud presentan valores menos negativos de $\delta^{18}\text{O}$ y por el contrario aquellas con mayor elevación se asocian con valores más negativos excepto la estación de Sierra Álvarez. Es necesario tener en cuenta que esta relación que

se muestra en la figura 4.28 es para un periodo determinado, es decir, sólo se puede emplear para agua reciente (flujos locales), adicionalmente, se requiere de más investigaciones específicas en relación con las diferentes masas de vapor de agua que afectan las regiones Centro y Media de acuerdo con lo señalado previamente, resultados que permitirán definir con mayor exactitud la línea meteórica local para las diferentes regiones.

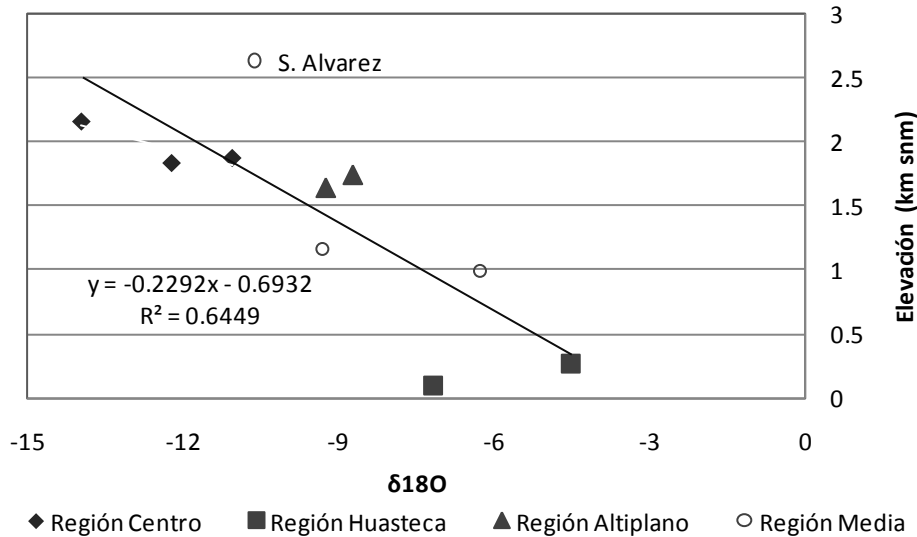


Figura 4.28. Relación entre elevación topográfica y contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en la lluvia, estaciones SLP

4.3.2. Agua subterránea

El uso de isótopos ambientales es una herramienta muy útil para determinar el origen del agua subterránea y determinar procesos de recarga. Para el presente estudio se enviaron a laboratorio las veintiuna muestras colectadas en el trabajo de campo para determinar la concentración relativa de isótopos estables ambientales $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ (tabla 4.14). La precisión analítica de los resultados es $\delta^2\text{H} \text{‰} = 0.9$ y $\delta^{18}\text{O} \text{‰} = 0.08$.

Los promedios isotópicos calculados para las treinta y un muestras del año 1999 son $\langle \delta^2\text{H} \rangle = -74.7$ y $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle = -10.2 \text{‰}$ y para aquellas tomadas en campo (2010) son $\langle \delta^2\text{H} \rangle = -75.4$ y $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle = -10.1 \text{‰}$. Como se observa, estos valores promedio son muy cercanos, lo que sugiere que la altitud de recarga es semejante. Cabe resaltar que estos promedios no incorporan la muestra 101-Salinas ya que como se puede apreciar en la figura 4.29a corresponde con agua sumamente evaporada. Al excluir esta muestra, cambiar la escala de la figura y agregar datos de muestras representativas de las cuencas de México, Alta de Lerma y otras de San Luis Potosí (figura 4.29b), se observa que existe una concordancia entre la concentración de isótopos y el sistema de flujo asociado pues se aprecia que las muestras correspondientes con flujo local presentan valores isotópicos más negativos que aquellas de flujos regionales, lo que indica que posiblemente el agua de flujo regional se recargó en una época más cálida que la relacionada con el flujo local. Tal suposición parece ser válida teniendo en cuenta que la edad promedio del agua de flujo regional es de 5,900 años (Cardona *et al.*, 2012) y de acuerdo con la reconstrucción climática de algunos autores (Alley, 2000; citado por la página web del Western Institute

for Study of the Environment Commentary-westinstenv.org; Harris y Mann en su página web: longrangeweather.com) quienes reportan que hace aproximadamente 4,500-5,000 años atrás se presentaba un periodo cálido en la Tierra (figura 4.30). En el caso de México se reportan igualmente temperaturas altas y condiciones secas (Heine, 1973; Metcalfe, 1997; Bradbury, 2000; entre otros).

Tabla 4.14. Valores de isótopos ambientales

DATOS 1999			DATOS 2010				
Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰		
10	Z Industrial	-9.91	-69.4	29-2010	Nacimiento	-9.6	-69
20	CFE-2	-9.76	-73.5	31-2010	Ex-Hacienda	-10.1	-74
30	Agua Clara	-10.14	-72.2	34-2010	pSMI2-19-X	-10.2	-74
41	MPIN21X99	-12.01	-87.5	36-2010	NZAC-20X	-11.2	-80
51	Higuera3	-9.99	-72.2	44-2010	P-NIG-22-X	-9.3	-71
62	Pozo 4	-10.41	-73.9	56-2010	Pozo 4	-9.9	-74
70	S Sebastián	-9.93	-74.5	58-2010	Pozo 9	-9.9	-76
80	Luis Moya	-10.52	-78.3	63-2010	Los Yañez	-10.5	-77
89	Paso El 40	-10.19	-78.4	64-2010	Corral Blanco	-9.2	-73
101	Salinas	3.63	-18.6	68-2010	Belén del Refugio	-9.9	-74
120	H Jaralito	-10.98	-79.4	69-2010	Ornelas	-10.3	-77
124	Lomas III	-9.81	-74.5	76-2010	Acosta	-9.6	-73
125	Presa S José	-13.14	-97.1	80-2010	Luis Moya	-10.4	-80
126	Milpillas	-11.49	-81.1	88-2010	Ojuelos	-9.4	-72
127	G PILGRIM	-11.27	-82.7	99-2010	P-OCA	-10	-75
128	C Paseo	-9.51	-74.7	101-2010	Salinas	-1.3	-37
129	C Llano	-10.80	-80.6	102-2010	Tule	-9.3	-72
130	Mercado R	-9.32	-66.6	123-2010	ZA-1171	-11.9	-89
131	Polvillo-M	-9.18	-71.5	132-2010	San Juanico G y C	-9.7	-72
132	Sn Juanico	-10.09	-73.9	137-2010	Candido Navarro	-11.3	-84
133	Salazar	-9.94	-70.5	144-2010	Los Jasos	-9.6	-72
134	N Zapata	-9.82	-70.5				
135	Simón Díaz	-9.78	-69.1				
136	Ciudad 2000	-9.65	-69.9				
137	Candido	-11.34	-84.7				
138	La Pila	-9.19	-66.1				
139	V Zaragoza1	-9.25	-66.7				
141	V de Pozos	-10.46	-76.1				
142	Gja Florida	-10.15	-72.0				
143	Santa Rita	-8.38	-62.7				
144	Los Jasos	-9.47	-70.1				

De esta manera, es evidente la importancia que tiene el clima con respecto a los isótopos ambientales estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) ya que los estudios hidrogeológicos convencionales incorporan agua de diferente edad y que por lo tanto pueden estar relacionados con condiciones climáticas contrastantes, las cuales a su vez, como señalan Carrillo-Rivera y Ouyse (2011), controlan el enriquecimiento (clima cálido) o depleción (clima frío) de isótopos estables en el agua de lluvia que finalmente es la recarga de agua al subsuelo.

Teniendo en cuenta que la mayoría de las muestras analizadas en el presente estudio con valor isotópico corresponden con flujos intermedio, regional, y su mezcla, la determinación de altitud de recarga no es posible debido a que no se tiene ningún registro histórico de las concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua de lluvia para el área de estudio; sin embargo, se puede apreciar una correspondencia entre los valores de isótopos y algunos elementos químicos de las muestras de agua subterránea que le otorga mayor confiabilidad a los grupos de agua definidos en el presente estudio (figura 4.31).

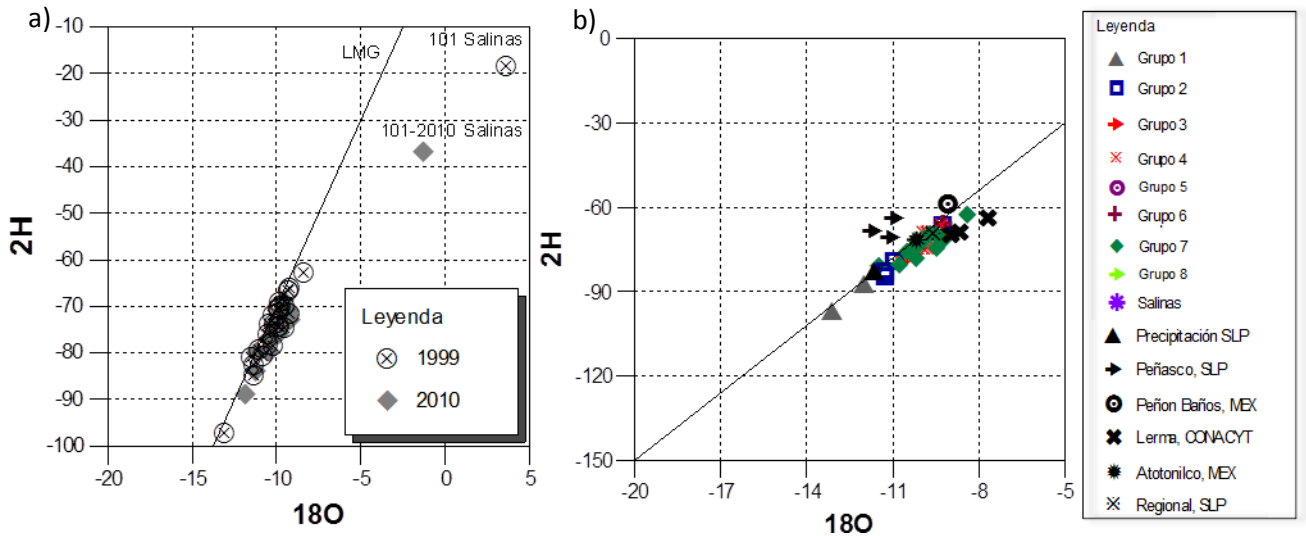


Figura 4.29. Relación $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de: a) muestras del área de estudio donde se aprecia el proceso de evaporación que presenta la muestra 101 Salinas para los años 1999 y 2010; b) grupos de agua definidos para las muestras de 1999 junto con muestras representativas de las cuencas de México, Alta Lerma y otros de SLP.

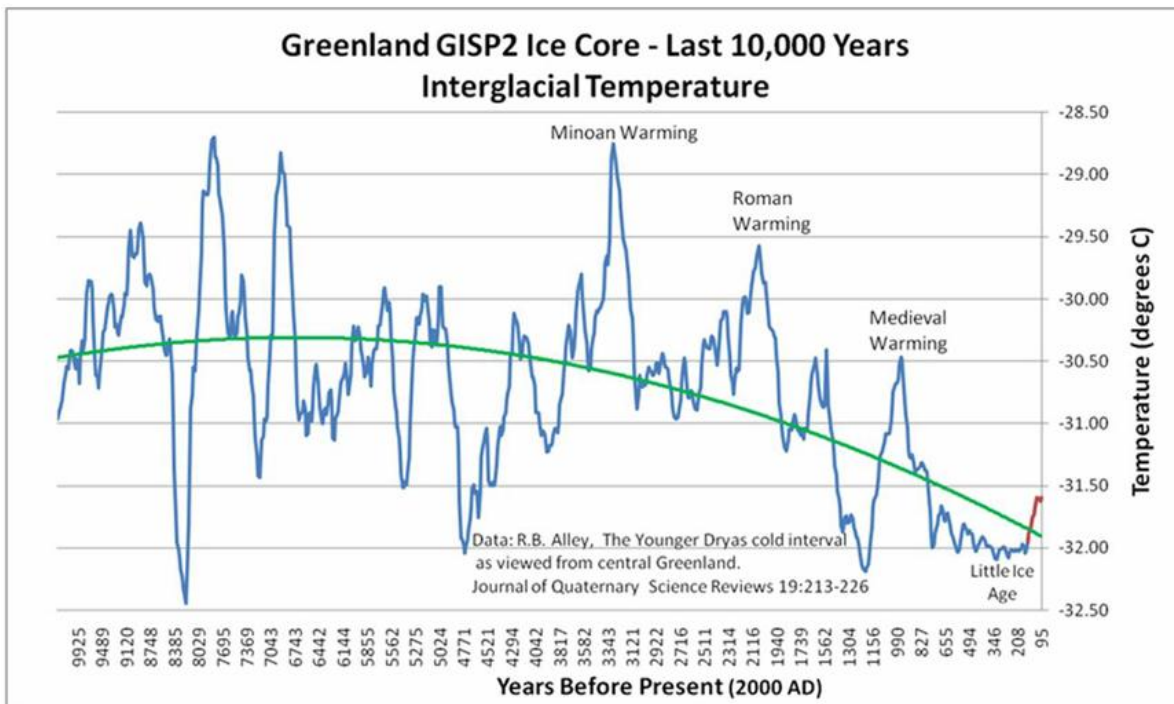


Figura 4.30. Reconstrucción de la temperatura global para aprox. 10,000 años atrás. FUENTE: Alley, 2000; tomado de: www.westinstenv.org.

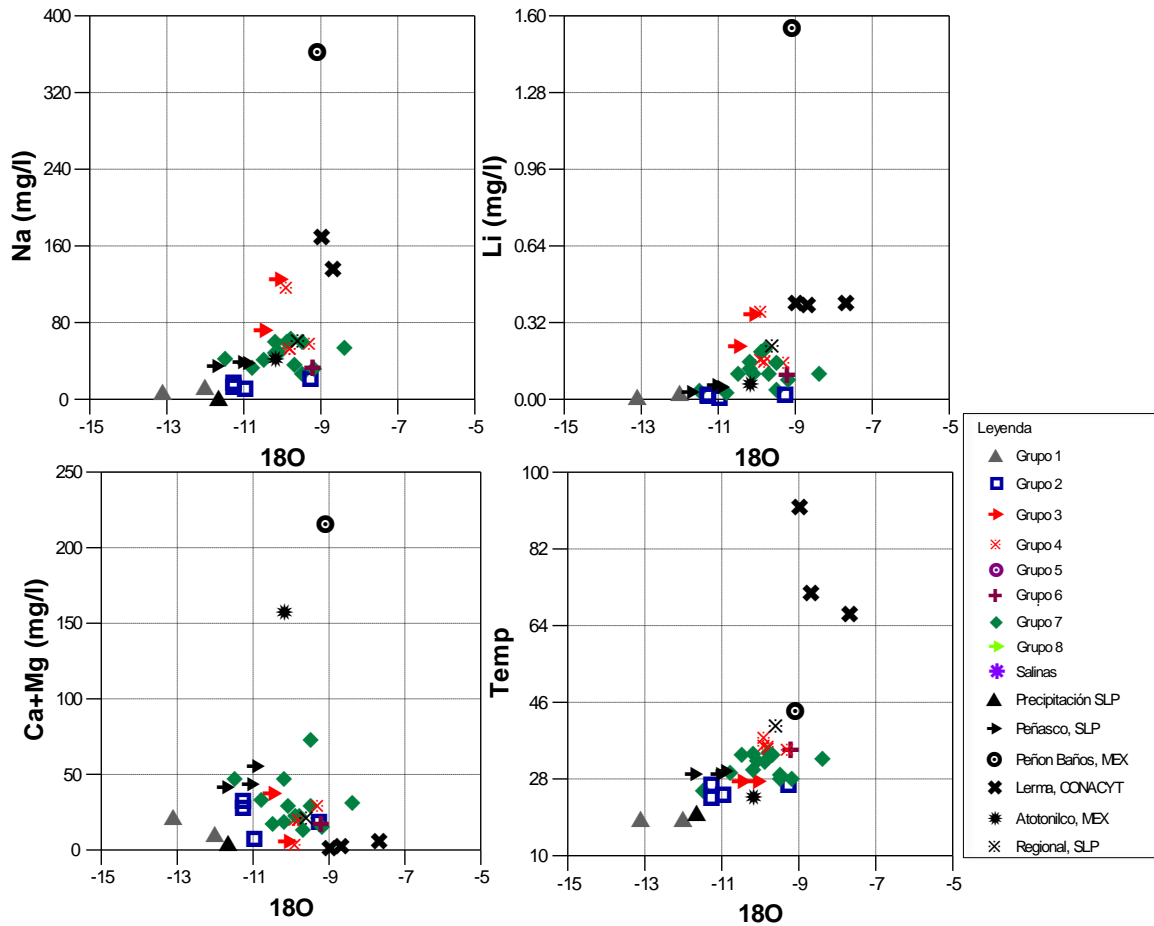


Figura 4.31. Relación del $\delta^{18}\text{O}$ con respecto a la temperatura, sodio, litio y Ca+Mg

4.4. Definición de zonas de recarga

En este apartado se pretende determinar las zonas de recarga específicas relacionadas con el agua subterránea que se induce a través de la extracción por pozos en el área de estudio, los cuales corresponden con flujos regional e intermedio. Como se ha señalado en el referente teórico, los isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) son de suma utilidad para definir el origen del agua subterránea (zonas de recarga). Sin embargo, en este caso de estudio donde se tiene agua de flujos intermedio y regional, cuya edad puede ser mayor a 5,000 años, el uso de los isótopos estables ambientales no es recomendable para determinar zonas de recarga debido a que se requiere el conocimiento de la relación elevación topográfica-isótopos en el agua de lluvia, es decir, conocer la concentración de isótopos que tenía el agua lluvia hace 5,000 años. Desafortunadamente, no se cuenta con un registro histórico de la variación climática (que incluya isótopos) en la República Mexicana, ni estudios detallados de paleoambientes, mucho menos en el área de estudio como se señaló previamente en el apartado de análisis de isótopos.

Por esta razón, se buscó una alternativa para definir zonas de recarga, la cual consistió en el cálculo de la distancia de recorrido del agua subterránea para obtener una idea preliminar de la ubicación de las zonas de recarga del agua que se extrae en el área de estudio. Evidentemente, los resultados que se lograron son preliminares, están sujetos a verificación y mejora por futuras investigaciones.

4.4.1. Cálculo de la distancia de recorrido del agua subterránea

La definición de las zonas de recarga al agua subterránea en el presente estudio se basa en un cálculo que permite determinar, de manera general, la posible distancia de recorrido del agua subterránea. Carrillo-Rivera (1992) señala que el referente geológico del área de San Luis Potosí indica la presencia de los medios granular y/o fracturado bajo condiciones confinadas y/o no confinadas, lo que es corroborado posteriormente con el análisis de pruebas de bombeo en ese mismo estudio, estableciendo la posible existencia de dos acuíferos principales: uno de tipo poroso y otro fracturado, los cuales pueden encontrarse bajo condiciones confinadas, semi-confinadas y libres. Por lo que el cálculo de la distancia de recorrido del agua subterránea en la presente investigación se realizó para cuatro situaciones diferentes ligadas con flujo regional, de las cuales tres están asociadas con un medio fracturado bajo condiciones confinadas, semi-confinadas y libres (no confinadas); y una cuarta situación asociada con un medio de doble porosidad y bajo condiciones confinadas. Se realizó este ejercicio para flujo intermedio con fines comparativos, teniendo en cuenta que éste puede presentar gran parte de su recorrido en el medio poroso, por lo que se requerirá más investigación en aspectos de hidráulica subterránea.

Como señala Carrillo-Rivera (*op. cit.*), la determinación de características hidráulicas en un medio fracturado no es posible a través de un método específico de análisis teniendo en cuenta que cada método fue diseñado para problemas particulares; una breve descripción de algunos modelos puede apreciarse en el estudio de este autor. Así, las características hidráulicas se obtuvieron a través de la aplicación de diferentes métodos. Para los cálculos, la conductividad hidráulica (K) se determinó a partir de la fórmula $T=Kb$, donde T es la transmisividad y b corresponde con el espesor saturado de la unidad litológica por donde fluye el agua. Este cálculo se usa tradicionalmente para medio poroso, debido a la complejidad del medio fracturado; en el presente trabajo se usó el factor entre 0.3 y 0.1 que señala Carrillo-Rivera (*op. cit.*) con el que se pretende llegar a una mayor aproximación del espesor real saturado. Según este autor, observaciones de campo indican que la longitud de la formación geológica productora en un medio fracturado es más pequeña que el espesor definido de la unidad geológica. En esta investigación se usaron los datos de T_f (valor no corregido de transmisividad obtenido a partir del análisis estándar de pruebas de bombeo) y b reportados en ese mismo estudio, así como el factor de 0.3 como corrección del espesor saturado. Por lo que se recalca, el valor de K obtenido a través de esta fórmula corresponde con una aproximación general debido a que se usan valores de pruebas de bombeo que requieren mayor estudio, asimismo, no se cuenta con el conocimiento específico de los espesores de las diferentes unidades de la columna estratigráfica del área de estudio, mucho menos el espesor saturado en medios tan complejos como el fracturado; no obstante, para obtener un conocimiento inicial se considera válido.

Una vez obtenida la K (mínima, máxima y promedio) se determinó la velocidad lineal media del agua subterránea (V) con base en la fórmula $V=(K i)/n_e$, donde: i es el gradiente hidráulico y n_e la porosidad eficaz. Esta velocidad no es la real ya que en la fórmula no se contempla la tortuosidad del recorrido; en la presente investigación se determina la distancia de recorrido de manera general y lineal. Se considera que esta carencia en el cálculo no afecta de manera importante los resultados, sin embargo, debe tenerse en cuenta para estudios futuros este aspecto que afecta principalmente el tiempo de recorrido entre dos puntos. El gradiente hidráulico se estimó a través de la

reconstrucción de las elevaciones de las superficies piezométricas, obteniéndose como valores mínimo 0.003, máximo 0.042 y promedio de 0.018. Otro punto a considerar en el cálculo realizado es la porosidad eficaz ya que por falta de conocimiento de este parámetro, teniendo en cuenta a su vez la escala regional del estudio, se usa la porosidad total. Al usar esta última debe contemplarse la posibilidad que la velocidad sea mayor a la obtenida usando la porosidad eficaz, por esta razón se usó el mayor factor (0.3) señalado por Carrillo-Rivera (*op. cit.*) para el espesor saturado de la unidad litológica, tratando de equilibrar el cálculo pues al usar el mayor factor aumenta la velocidad y viceversa.

Los valores de porosidad total de cada unidad geológica fueron extraídos igualmente del estudio de Carrillo-Rivera (*op. cit.*) tomándose para el cálculo valores mínimo, máximo y promedio. Con estas velocidades calculadas y conociendo las estimaciones de la edad para el agua de la región de San Luis Potosí (Cardona *et al.*, 2012), se calculó la distancia a partir de la fórmula básica $V=x/t$, donde: x es la distancia y t el tiempo. Con base en las características químicas de los datos reportados por Cardona *et al.* (2012) se realizó su equiparación con aquellos analizados en la presente investigación, dando como resultado la tabla 4.15 en la que se muestran las edades cercanas para agua de flujo intermedio, así como para mezcla entre flujos regional e intermedio; es importante señalar que en el cálculo y resultados se hará referencia como flujos "regionales" por desconocimiento de la verdadera edad de éstos con base en la asociación de grupos de la presente investigación, sin embargo, debe contemplarse la posible existencia de mayores distancias de recorrido.

Tabla 4.15. Edades del agua subterránea para SLP. Datos obtenidos de Cardona *et al.* (2012)

	Edad (años)		
	Mínima	Máxima	Promedio
Flujo Mezcla Regional e Intermedio	5300	6500	5900
Flujo Intermedio	1000	3300	2150

Dos cálculos fueron realizados, uno corresponde con los aspectos generales tanto para flujos "regionales" como flujos intermedios, es decir, usando los valores mínimo, máximo y promedio de K , i , n , edad. En el segundo cálculo se usaron las edades de pozos específicos de SLP (datos de Cardona *et al.*, 2012), junto con los valores mínimo, máximo y promedio de K , i , n descritos previamente. Los diversos cálculos realizados, así como los resultados del presente apartado, se muestran en el anexo 9, obteniéndose mínimo 81 valores diferentes de x para cada situación (medio fracturado y confinado, etc.) por la interacción de los valores mínimo, máximo y promedio de: K , i , n y edades; no obstante, en las tablas 4.16, 4.17 y 4.18 se señalan los valores obtenidos, considerados posibles y congruentes, de distancia recorrida del agua subterránea para flujos "regionales", intermedios, así como para los pozos de SLP, respectivamente. En el caso del medio de doble porosidad bajo condiciones confinadas se realizó el cálculo para dos conductividades hidráulicas, una correspondiente con K_f y la otra considerada como la total ($K_t = K_f + K_m$), en la que incorpora la conductividad de la matriz (K_m) y cuyo valor se extrajo de los resultados del estudio de Carrillo-Rivera (*op. cit.*); obteniéndose así con la K_t resultados más semejantes a los adquiridos para medio fracturado (condiciones confinadas y no confinadas). Por su parte, los resultados del medio fracturado bajo condiciones semi-confinantes se parecen a los del medio de doble porosidad con K_f , aspecto posible teniendo en cuenta que en las pruebas de bombeo de Carrillo-Rivera (*op. cit.*) la curva resultante de abatimiento contra tiempo se asemeja a aquella típica del medio de doble porosidad, debido a la entrada de agua proveniente de un flujo vertical (agua termal).

Tabla 4.16. Posibles distancias de recorrido obtenidas para flujos de tipo "regional"

Medio fracturado, condiciones confinadas

	n modelo mat		
	i mínimo		
	e min	e max	e prm
K mínimo	529	649	589
K promedio	657	806	732

Medio fracturado, condiciones semi-confinadas

	n mínimo			n mínimo			n máximo		
	i máximo			i promedio			i máximo		
	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm
K máximo							46	57	52
K promedio	167	204	185	71	88	79			

Medio fracturado, condiciones no confinadas

	n mínimo						n máximo				n modelo matemático								
	i mínimo			i máximo			i prm	i máximo			i mínimo			i máximo			i promedio		
	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm
K mínimo	143	175	159				858				42	52	47	589	722	656	252	310	281
K máximo				78	96	87		47	57	52	670	822	746						
K promedio											245	300	273						

Medio de doble porosidad, condiciones confinadas (Kt + Km)

	n mínimo						n máximo						n promedio								
	i mínimo			i mínimo			i máximo			i promedio			i mínimo			i máximo			i promedio		
	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm
K máximo				52	64	58	735	901	818	315	386	351	105	129	117				630	772	701

Tabla 4.17. Posibles distancias de recorrido obtenidas para flujos de tipo intermedio

Medio fracturado, condiciones confinadas

	n modelo mat			
	i mínimo			
	e min	e min	e max	e prm
K mínimo	200	100	330	215
K máximo	305			
K promedio	248	124	409	267

Medio fracturado, condiciones semi-confinadas

	n mínimo						n máximo		n prm
	i máximo			i promedio			i máximo		i max
	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e max	e prm	e max
K máximo							29	19	17
K promedio	31	104	68	13	44	29			

Medio fracturado, condiciones no confinadas

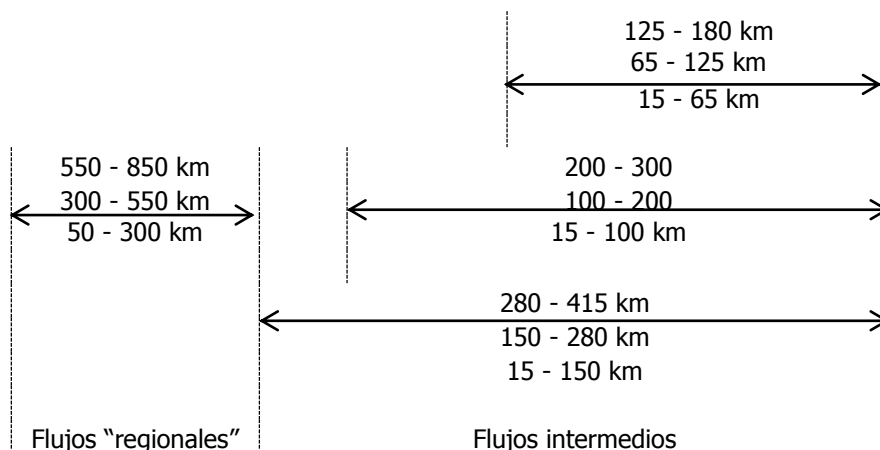
	n mínimo									n máximo		n modelo matemático								
	i mínimo			i máximo			i promedio			i máximo		i mínimo			i máximo			i promedio		
	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm
K mínimo	27	89	58	378				162	348			26	17	111	367	239	48	157	102	
K máximo	1	3	2	15	49	32			21	14	29	19	126	417	272					
K promedio	0	2	1	7	22	14					46	152	99						277	

Medio de doble porosidad, condiciones confinadas (Kf + Km)

	n mínimo				n máximo									n promedio						
	i mínimo			i prm	i mínimo			i máximo			i promedio			i mínimo			i max	i promedio		
	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e max	e prm	e min	e min	e max	e prm	
K máximo				33	21	139	458	298	59	196	128	20	65	43	277	119	392	255		
K promedio	60	199	130	363	22	14	93	308	200	40	132	86	12	40	26	168	72	238	155	

Tabla 4.18. Posibles distancias de recorrido obtenidas para pozos de SLP

Pozo	Distancia calculada (km)						
	M-3	M-10	M-7	M-15	M-14	M-9 y M-5	M-13
Edad (años)	6500	5300	3300	2300	1400	1300	1000
Medio fracturado, condiciones confinadas	649	657	409	230	174	130	100
	806	529	330	285	140	161	124
Medio fracturado, condiciones semi-confinadas	204	167	104	72	44	41	31
	88	71	44	31	19	18	13
Medio fracturado, condiciones no confinadas	822	670	417	291	177	164	126
	722	589	367	256	156	144	111
	310	252	157	110	67	62	48
	300	245	152	106	65	60	46
	175	143	89	62	38	35	27
	96	78	49	34	21	19	15
Medio de doble porosidad, condiciones confinadas							
Kf	286	233	145	101	62	57	44
	123	100	62	43	26	25	19
Kf + Km	772	630	392	273	166	154	119
	606	494	308	214	131	121	93
	901	735	458	319	194	180	139
	393	320	199	139	85	79	60
	386	315	196	137	83	77	59
	260	212	132	92	56	52	40
	129	105	65	46	28	26	20
	78	64	40	28	17	16	12



En la parte inferior de la tabla 4.18 se muestran los intervalos posibles de distancia de recorrido (máximo, promedio y mínimo) para flujos "regional" e intermedio. En el presente estudio se tomó como distancia representativa de recorrido de flujos intermedios aquel intervalo obtenido para los pozos M-5, M-9, M-13 y M-14 para así realzar el contraste entre éstos y aquellos de carácter "regional". De esta manera se obtuvieron las posibles distancias de recorrido del agua subterránea para los sistemas de flujo tipo "regional" e intermedio (ver figuras 4.32 y 4.33). El punto de origen de los polígonos representados en tal figura corresponde con San Luis Potosí ya que se conoce la existencia de pozos asociados con estos dos tipos de flujos, sin embargo, las distancias calculadas aplican para cualquier lugar con presencia de estos flujos.

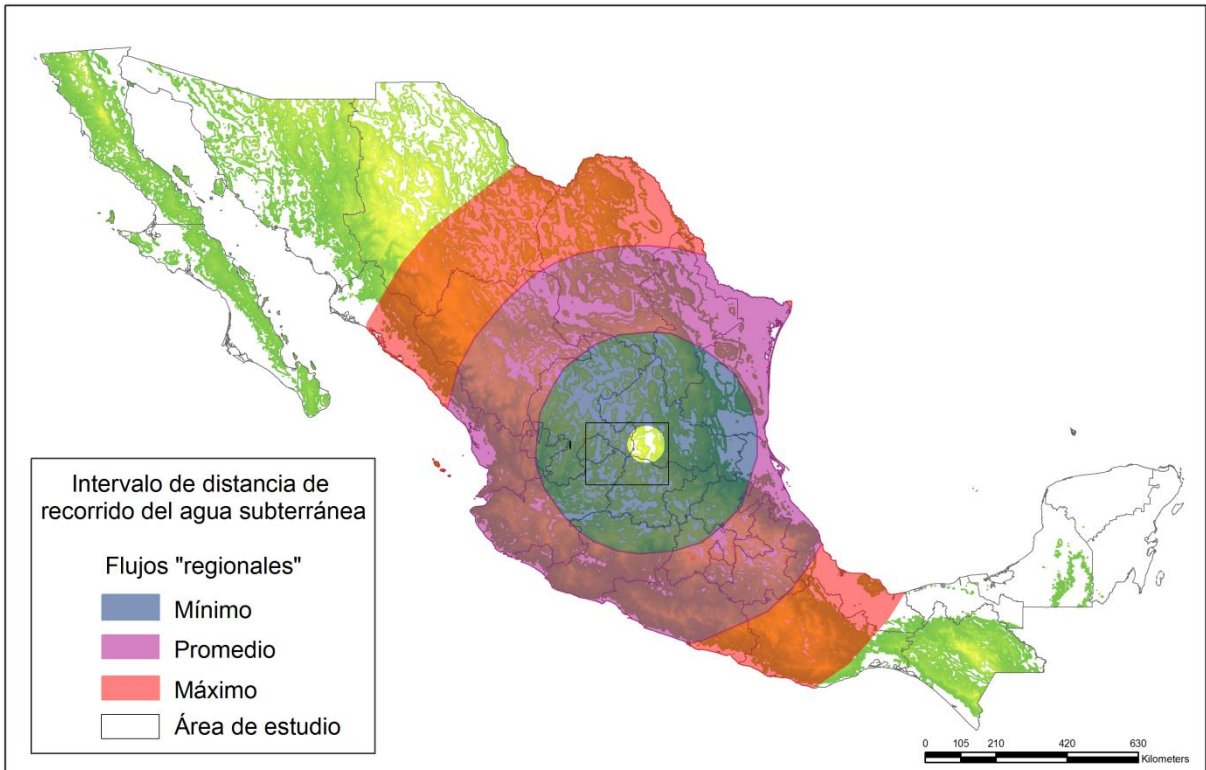


Figura 4.32. Distancia de recorrido del agua subterránea calculada para el pozo M-3 perteneciente a un flujo "regional"

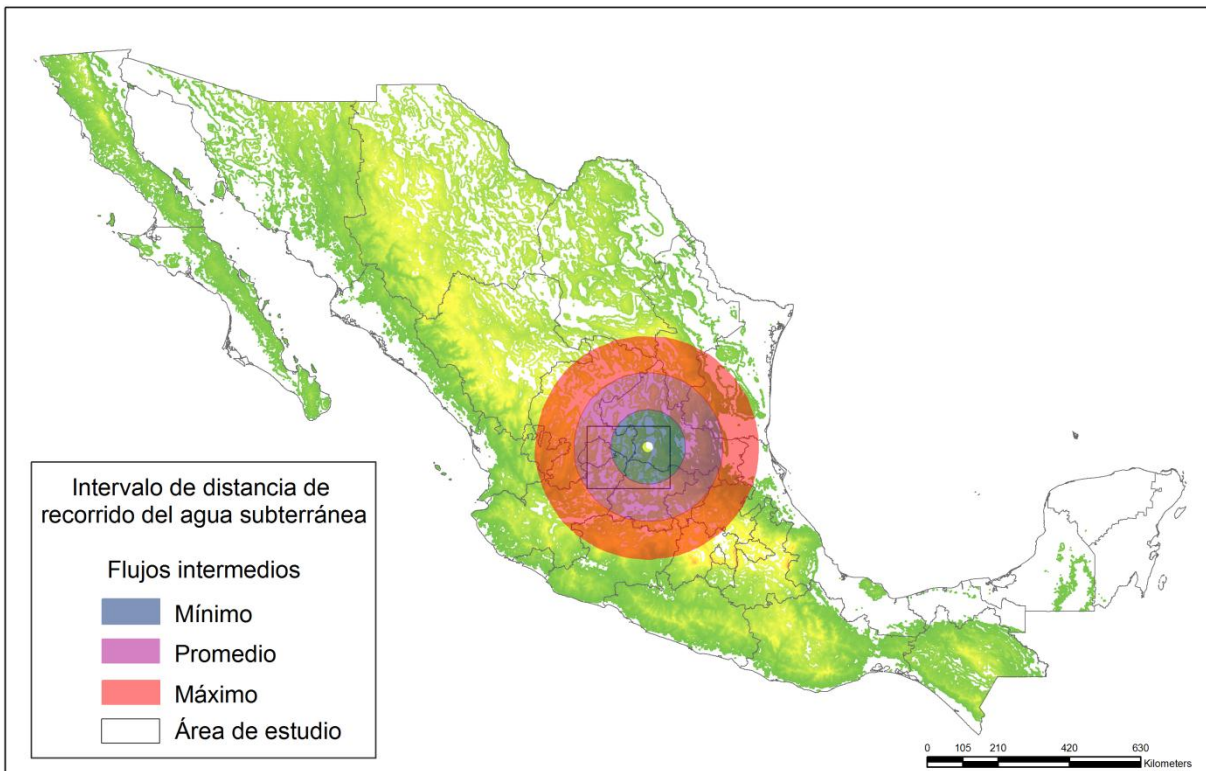


Figura 4.33. Distancia de recorrido del agua subterránea calculada para el pozo M-14 perteneciente a un flujo intermedio

Kohn (2009) reporta velocidades de 0.28 y 0.13 m/d en agua de lavas fracturadas y material de doble porosidad, respectivamente. Al realizar el cálculo de la distancia de recorrido con estas velocidades y las edades promedio de la tabla 4.15 se obtienen los valores de la tabla 4.19, resultados cercanos a los intervalos promedio calculados previamente en la presente investigación. No obstante, surge la inquietud en cuanto a la confiabilidad de este último cálculo debido a que esta autora no señala la fuente bibliográfica o método que usó para determinar la velocidad del agua subterránea en estos dos medios. Por esta razón, se realizó el cálculo presentado anteriormente, del cual sobresale la necesidad de realizar estudios que conduzcan a un mayor conocimiento de las características hidrogeológicas de las rocas y el comportamiento hidráulico del medio.

Tabla 4.19. Distancias de recorrido con base en las velocidades reportadas por Kohn (2009)

Material	Distancia de recorrido (km)	
	Flujo regional	Flujo intermedio
Lava fracturada	595	217
Medio de doble porosidad	279	102

La aplicación general de la técnica usada en la presente investigación para el cálculo de la distancia de recorrido se considera válida debido a que la química del agua, según los datos del estudio de Cardona *et al.* (2012), exhiben una relación entre los principales parámetros indicadores usados en estudios hidrogeológicos (litio, sodio y temperatura; figura 4.34 a, b, c), por su parte, las concentraciones de cloruro de tal estudio muestran valores muy similares por lo que no se consideran confiables, sin embargo, al eliminar el dato de cloruro menos representativo se aprecia también una relación entre la edad y tal elemento (figura 4.34 d).

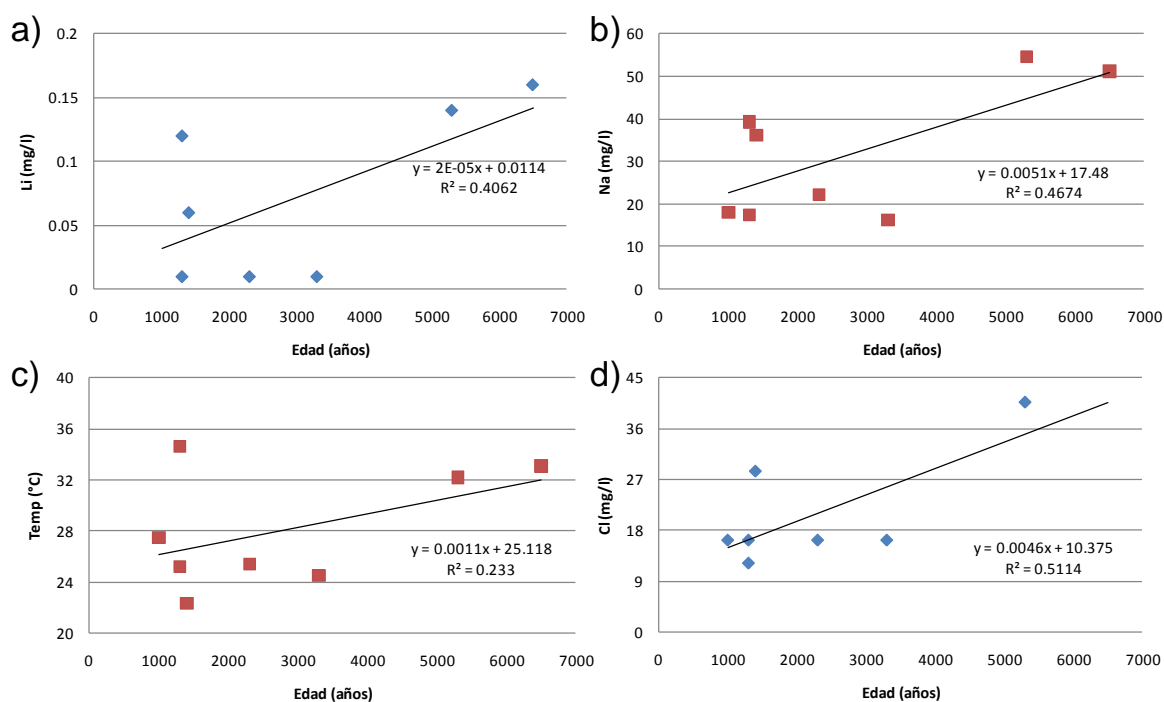


Figura 4.34. Relación de la edad del agua con: a) litio, b) sodio, c) temperatura y d) cloruro

De esta manera, los resultados del cálculo realizado en esta investigación demuestran la posibilidad de una conexión hidráulica entre diversas cuencas hidrográficas y sugieren que la recarga del agua perteneciente a flujos regional e intermedio ocurre incluso más allá del límite del área de la presente investigación, por lo que a continuación se realiza un esfuerzo por definir con mayor claridad las zonas de recarga asociadas con el agua que se extrae en los pozos del área a través del análisis de diferentes indicadores superficiales. Cabe resaltar nuevamente que éste es un estudio inicial cuyos resultados están sujetos a revisión, comparación y lo ideal sería continuar con análisis más detallados al respecto para obtener cada día una mayor aproximación del funcionamiento del flujo subterráneo.

4.4.2. Análisis de indicadores superficiales a escala nacional

A continuación se realiza el análisis de indicadores superficiales con base en tres parámetros de suma importancia para la definición de zonas de recarga, estos son: elevación topográfica, vegetación y litología. La figura 4.35 muestra la información utilizada con base en lo descrito a continuación.

- Elevación topográfica

De acuerdo con la teoría de los sistemas de flujo (Tóth, 2000) que establece que los flujos regionales se originan en las zonas topográficas más elevadas, junto con el análisis previo realizado en el punto 4.1.3 donde se establece para el área de estudio que la altitud mayor a 2,300 m corresponde con zonas de recarga, a escala nacional se seleccionó la cota de 2,400 m snm como asociada a altitud de recarga debido a que la información asequible al público de las curvas topográficas a nivel nacional, por parte del INEGI (2000b), se encuentra cada 200 metros (figura 4.35a).

- Vegetación

Como se ha señalado anteriormente, las zonas de recarga al parecer se encuentran asociadas con bosque de pino, encino, conífera y mesófilo de montaña, por lo que se seleccionó este tipo de vegetación de la información cartográfica de CONABIO (1999) para su posterior relación con otros indicadores superficiales (figura 4.35b). Asimismo, se escogió el pastizal natural que se presenta a una elevación mayor a los 2,400 m snm.

- Litología

Con base en la cartografía asequible de rocas en la página del INEGI (2000c), se descartaron aquellos polígonos asociados con rocas de baja permeabilidad, tales como caliza, lutita, esquisto (del Cretácico), así como las rocas ígneas intrusivas, teniendo en cuenta que la litología asociada con zonas de recarga debe presentar alta a moderada conductividad hidráulica.

4.4.3. Integración de la información cartográfica y superposición de polígonos

La técnica empleada para la definición final de zonas de recarga consistió en sobreponer los diferentes polígonos determinados previamente, es decir, aquellos que corresponden con la distancia de recorrido (máxima, mínima y promedio; figuras 4.32 y 4.33), altitud y vegetación (figura 4.35). Por su parte, la litología fue asociada con los polígonos que se obtuvieron con la superposición de los otros parámetros con el fin de facilitar y minimizar el trabajo en lo referente a la búsqueda y eliminación de rocas de baja conductividad hidráulica ya que el número de polígonos es mucho mayor que para los demás parámetros evaluados.

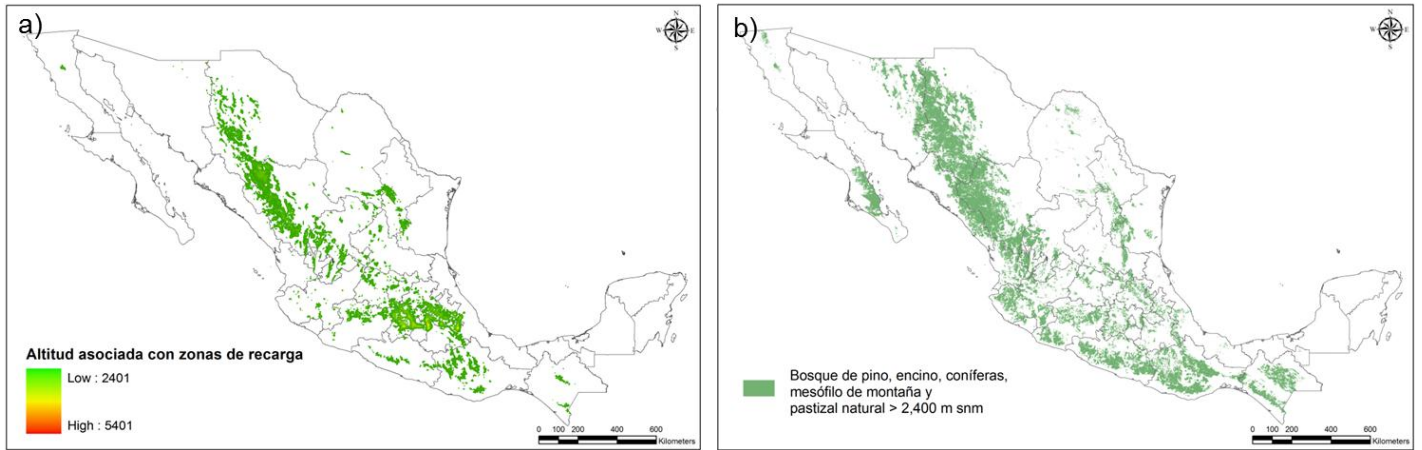


Figura 4.35. Indicadores evaluados para la definición de zonas de recarga. a) altitud, b) vegetación

Las figuras 4.36 y 4.37 exhiben el resultado de la superposición de polígonos, incluyendo la litología, obteniendo así las posibles zonas de recarga de aquella agua que se extrae en el área de estudio, asociada con flujos "regionales" e intermedios, respectivamente. En estas figuras se observa que los flujos pueden provenir de zonas de recarga ubicadas más allá del área de estudio de la presente investigación, generándose posiblemente la recarga en la Sierra Madre Occidental o incluso en el Cinturón Volcánico Transmexicano. Así, se confirma que las distancias recorridas por el agua que se extrae por pozo se relacionan con agua generada fuera de la cuenca superficial. Así los estudios regionales permitan visualizar de manera más veraz y completa el sistema hidrogeológico.

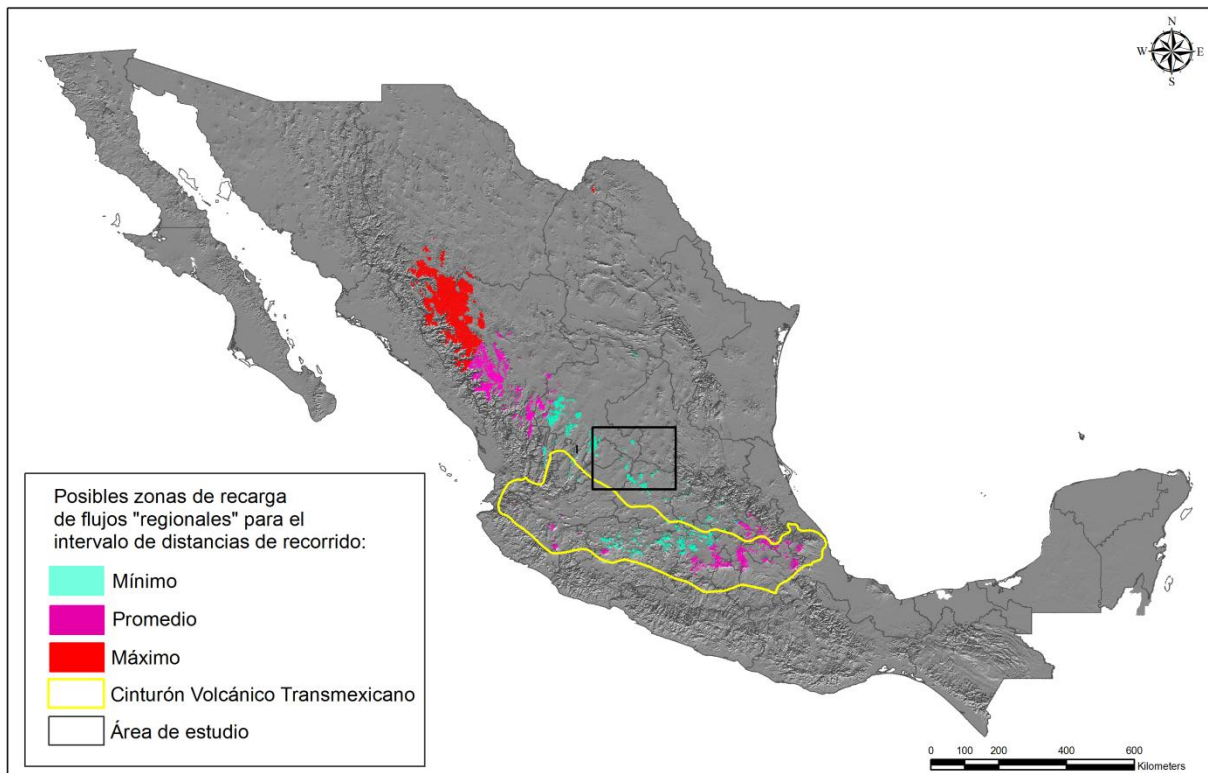


Figura 4.36. Posibles zonas de recarga de flujos "regionales" incorporando un análisis litológico, hidrogeológico y geomorfológico.

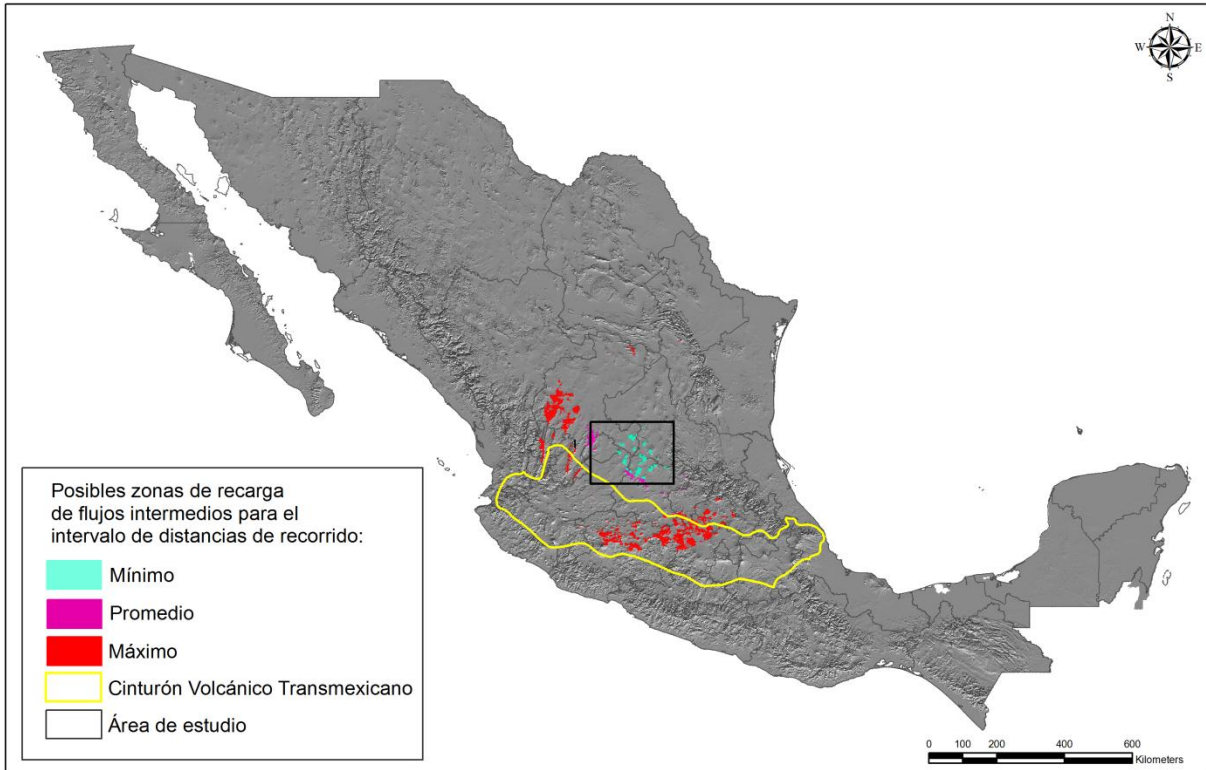


Figura 4.37. Posibles zonas de recarga de flujos intermedios incorporando un análisis litológico, hidrogeoquímico y geomorfológico

4.5. Definición de zonas de descarga de agua subterránea

En el área de estudio no se presentan manifestaciones superficiales de importancia (manantiales calientes, cuerpos de agua perennes, suelos salinos, etc.), con excepción de los manantiales termales del estado de Aguascalientes expuestos en el punto de hidrología histórica (4.1.5.), por lo que se considera que el área de estudio corresponde con lo que Tóth (2000) denomina "zona de tránsito", que como su nombre indica es un segmento intermedio entre la zona de recarga y aquella de descarga. Esta clasificación de zona de tránsito también fue asignada a la cuenca superficial de San Luis Potosí en diversos trabajos (SARH, 1988; Carrillo, 1992; Cardona, 2007; entre otros) estableciéndose que a pesar de la naturaleza cerrada de la cuenca de SLP, el agua que se extrae en los pozos corresponde con un flujo en tránsito hacia zonas fuera del límite superficial de la misma ya que no se presentan manifestaciones naturales de flujo vertical ascendente.

El análisis para establecer la ubicación de zonas de descarga se basó principalmente en cuatro aspectos (figura 4.38): 1) la presencia de manantiales termales con base en el trabajo de Prol (1988), 2) existencia de vegetación halófila y gipsófila obtenida de la cartografía temática de CONABIO (1999), 3) elevación topográfica igual o menor a los 2,000 m y 4) dirección de movimiento del agua subterránea con base en la reconstrucción realizada en el punto 4.1.5 (hidrología histórica) de elevación de carga piezométrica para las décadas de los setenta y ochenta, la cual indica (de manera general) un movimiento con dirección casi norte-sur en la porción noroeste del área de estudio y suroeste a noreste hacia Villa de Reyes.

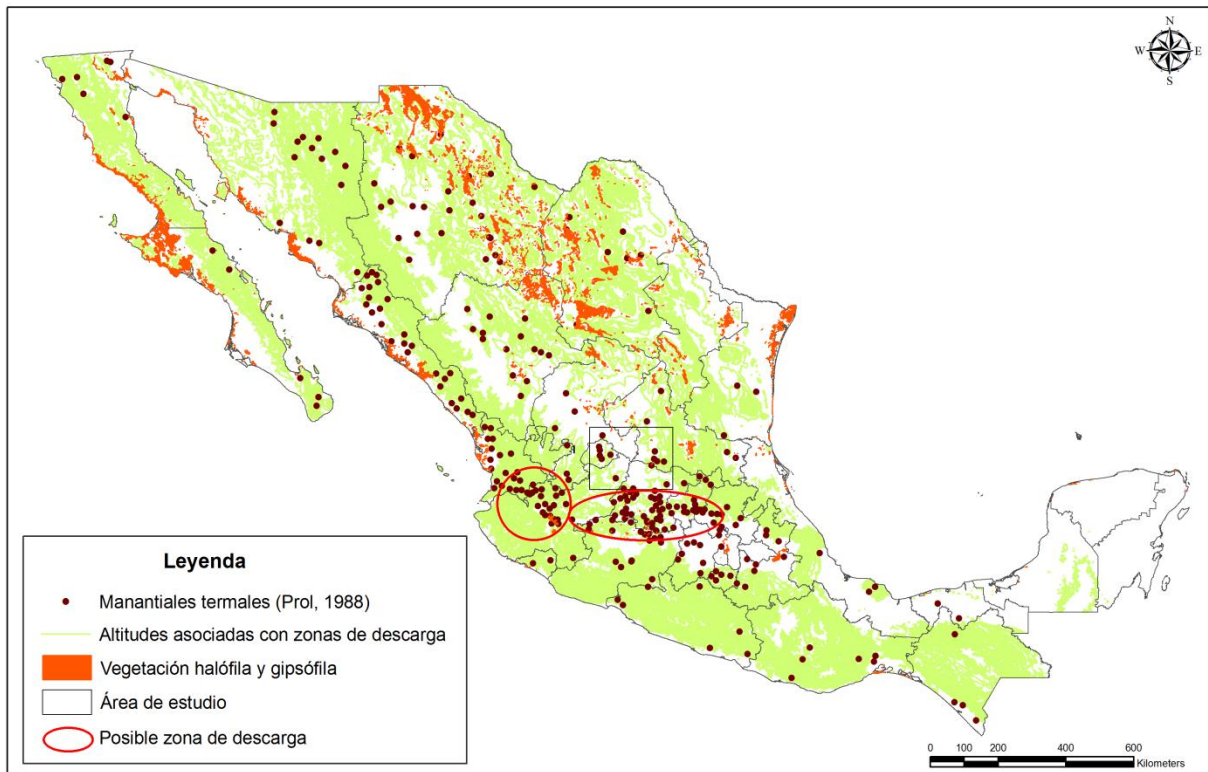


Figura 4.38. Posibles zonas de descarga de flujos regional e intermedio(?)

4.6. Los sistemas de flujo y su trayectoria

En la figura 4.39 se presenta una sección hidrogeológica esquemática que cruza el área de estudio con dirección cercana W-NNE (ver figura 2.10), esta incluye: litología, tipo de suelo y su uso, la vegetación y manantiales. La configuración geológica se obtuvo del Servicio Geológico Mexicano (1997a, 1997b, 1998a, 1998b). El análisis de indicadores superficiales del punto 4.1 permitió definir la localización de zonas de recarga y descarga en el área de estudio (ver figura 4.39). Sin embargo, al realizar el análisis geoquímico de las muestras de agua del estudio de CNA (1999) y aquellas tomadas en campo para la presente investigación, junto con el cálculo de distancia de recorrido del agua basándose en las propiedades hidráulicas del material litológico, se obtuvo que las zonas de recarga definidas no estaban asociadas con el agua que se induce en la extracción en el área de estudio, pertenecientes a flujos regionales e intermedios. Las zonas de descarga obtenidas, en especial las de Aguascalientes, correspondían con la manifestación superficial de flujo regional del oeste del área hace unos cientos de años. Manifestaciones que debido a la extracción intensiva y sin control del agua subterránea generó un descenso del nivel freático que ocasionó la desaparición de manantiales y cuerpos de agua.

Teniendo en cuenta que los resultados del presente estudio arrojaron la ubicación de las zonas de recarga y descarga asociadas con el agua que se extrae en el área de estudio, más allá de los límites establecidos, se realizó un esfuerzo por tratar de identificarlas (ver puntos 4.4 y 4.5). Para esto fue necesario analizar la situación desde una perspectiva aún más regional a la contemplada en un inicio, usando así información a escala nacional para

la definición de zonas de recarga/descarga, metodología descrita previamente. Cabe resaltar que los resultados que se muestran a continuación son de tipo general, sin embargo, reflejan la relevancia de analizar sistemática y regionalmente los elementos naturales asociados con el agua.

En los apartados anteriores se determinaron las posibles zonas de recarga y descarga a partir de diferentes indicadores superficiales; en las figuras 4.40 y 4.41 se presenta adicionalmente el posible trayecto de los flujos "regionales" e intermedios, respectivamente. De este análisis sobresale la relevancia de la dirección del movimiento del agua subterránea reconstruida en el presente estudio para las décadas de los setenta y ochenta, en el punto 4.1.5 (hidrología histórica), debido a que permite obtener con mayor detalle la asociación recarga-descarga, p. ej., el agua del oeste y noroeste del área de estudio presenta un movimiento casi norte-sur, lo que indica que es factible que el agua provenga de la SMOc según las posibles zonas de recarga obtenidas anteriormente. El agua continúa su recorrido por el subsuelo a través de esa porción del área de estudio y se considera que descarga naturalmente al sur, suroeste de la misma.

Cabe señalar lo mencionado previamente respecto a los manantiales y cuerpos de agua de unos cientos de años atrás en el estado de Aguascalientes, los cuales correspondían con zonas de descarga de flujos intermedio y/o regional; sin embargo, se contempla la posibilidad de otras descargas naturales como se muestra en las figuras 4.40 y 4.41.

Por su parte, la dirección de movimiento del agua hacia el área de Villa de Reyes es de suroeste a noreste, indicando una mayor probabilidad que la recarga se origine en el CVT para la porción oriental del área de estudio. Así, es ilógico que su descarga natural ocurra al sur como sucede con aquella agua que se recarga en la SMOc sino que por el contrario debe continuar su rumbo hacia el noreste y posiblemente descargar hacia el este-noreste del área de estudio como se aprecia en las figuras 4.40 y 4.41.

Los resultados de la presente investigación corroboran lo establecido en otros estudios (Carrillo-Rivera *et al.*, 1996; CNA, 2000; Carrillo-Rivera, 2000; Cardona, 2007) con referencia a una conexión horizontal atribuida a la presencia de rocas volcánicas fracturadas del Terciario que permite la circulación del agua subterránea por centenares de kilómetros (de acuerdo con lo obtenido, un mínimo de 50 - 300 km los flujos "regionales" y 15 - 100 km los flujos intermedios), asimismo, su gran espesor (promedio de 1,700 m) permite la formación de los tres tipos de sistemas de flujo (regional, intermedio y local) en una superficie de mayor dimensión que el área de estudio de la presente investigación.

De acuerdo con los geotermómetros, se obtuvieron profundidades mínimas de recorrido del agua subterránea de 1,000 a 2,900 m en promedio para muestras de agua del grupo 3, así como de 950 a 2,700 m para flujos regionales definidos como grupo 4. Las figuras 4.40 y 4.41 exhiben un panorama esquemático general en 3D del comportamiento del agua subterránea extraída por pozos en el área de estudio (flujos "regional" e intermedio).

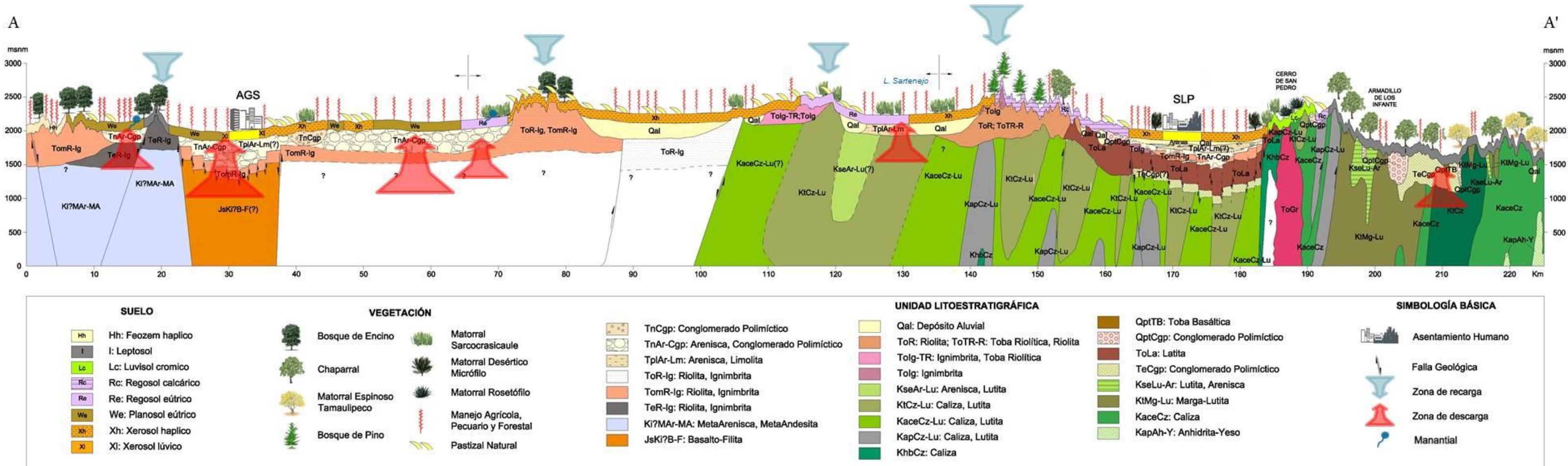


Figura 4.39. Sección hidrogeológica esquemática regional

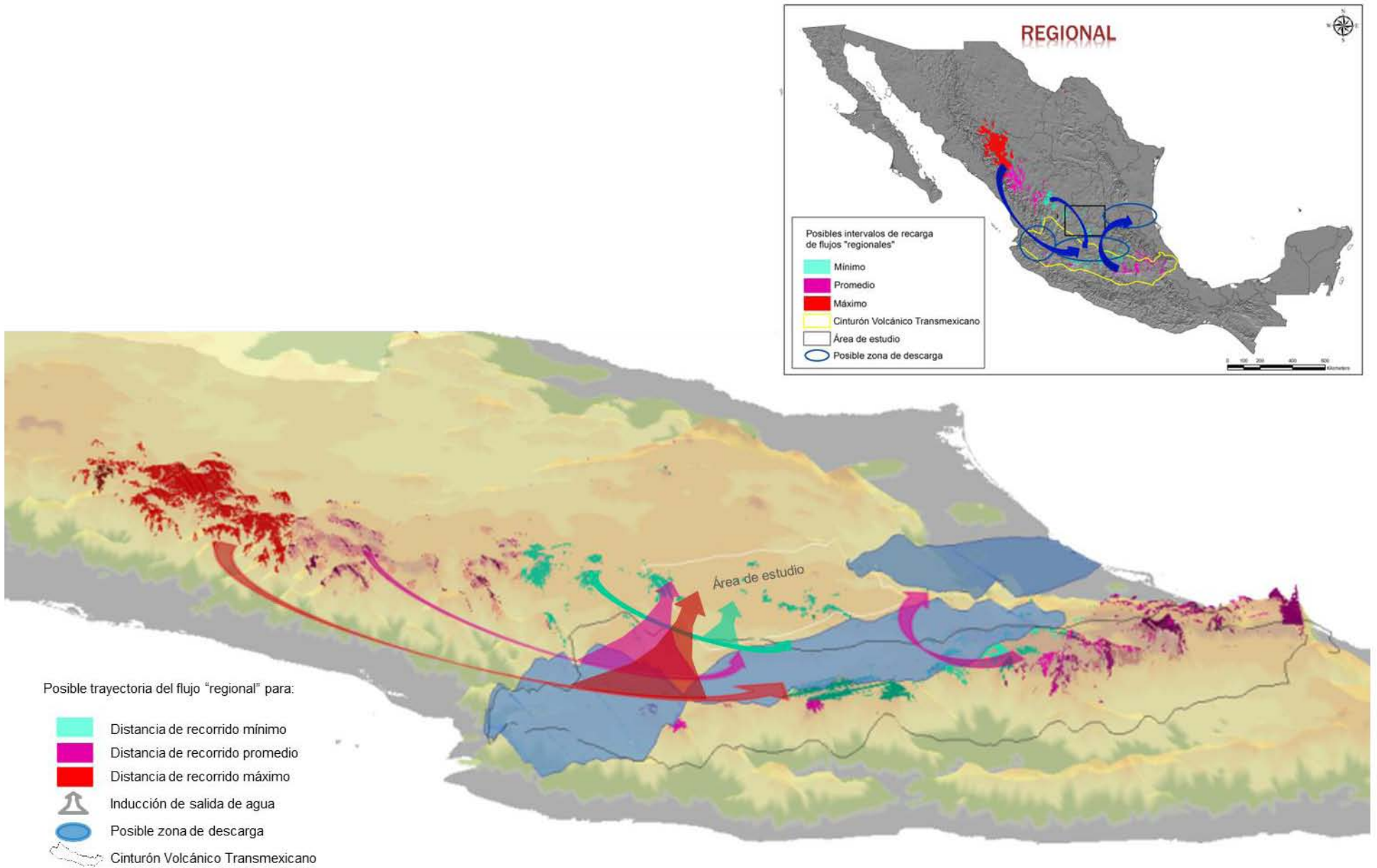


Figura 4.40. Ubicación de posibles zonas de recarga, descarga y trayectoria de flujo para flujos regionales

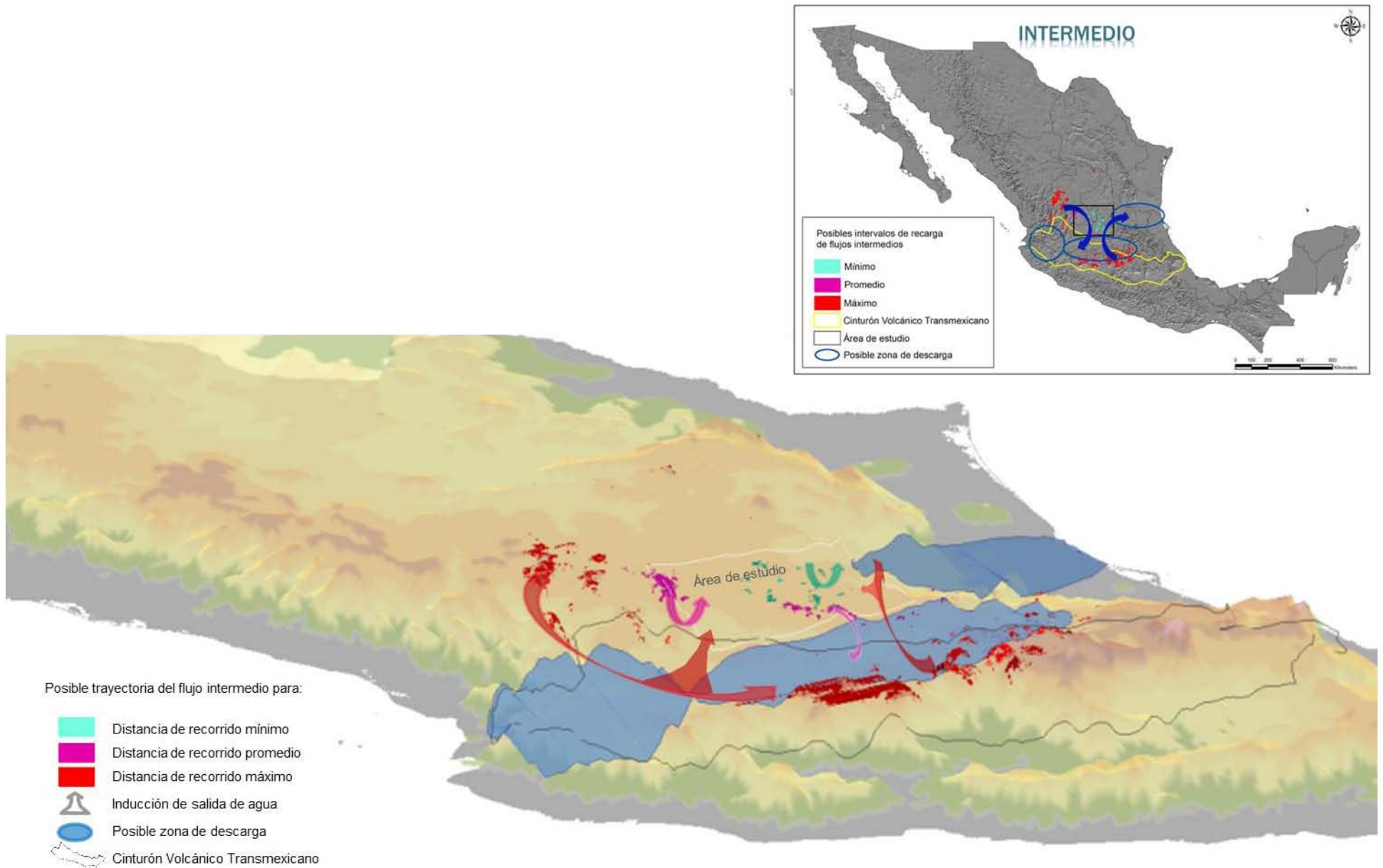


Figura 4.41. Ubicación de posibles zonas de recarga, descarga y trayectoria de flujo para flujos intermedios

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

La realización de la presente investigación permitió obtener una aproximación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea para la porción centro-sur de la Provincia Fisiográfica Mesa Central a través de la implementación de la teoría de los sistemas de flujo (TSF) y la aplicación de diversas técnicas, principalmente: análisis de indicadores superficiales, hidroquímica, isótopos ambientales y parámetros hidráulicos. Asimismo, se demostró que la TSF es una herramienta de suma utilidad por su visión sistémica del ambiente para definir zonas de recarga y descarga, esencialmente.

Los elementos naturales como suelo, vegetación, litología, presencia de cuerpos de agua y agua subterránea presentan características físicas, químicas y biológicas como resultado de diversos procesos en el subsuelo propios de la dinámica del ambiente, por lo que estas particularidades se catalogan como indicadores superficiales de recarga o descarga de agua subterránea. A pesar que el entorno natural se encuentra modificado por el cambio de uso de suelo que se ha dado por el crecimiento demográfico, junto con las diversas actividades humanas que esto conlleva (industria, agricultura, ganadería, etc.), se considera relevante y viable la reconstrucción del funcionamiento del flujo subterráneo previo a su transformación por la extracción de agua por medio de pozos principalmente. Este conocimiento permite un mayor entendimiento de los impactos ambientales que se presentan actualmente, a su vez proveerá información sumamente útil para realizar acciones acordes con el comportamiento natural del agua subterránea, minimizando así posibles impactos al agua y demás elementos ambientales, es decir, el conocimiento previo del funcionamiento del flujo subterráneo permitirá finalmente realizar una adecuada gestión de agua/ambiente.

En el caso particular del área de estudio, se apreció su alta perturbación en la vegetación y tipo de suelo principalmente. Como se señaló previamente, esto se debe al aumento en población y sus actividades económicas, entre las que destacan los sectores agrícola, pecuario y forestal, así como la intensiva extracción de agua subterránea por medio de pozos. Sin embargo, a través de la búsqueda e interpretación de información histórica fue posible realizar una reconstrucción conceptual del paisaje y así definir, en gran parte, zonas de recarga/descarga para el área, reflejando de esta manera la relevancia y utilidad de los relatos históricos consultados.

Entre las variables físicas y biológicas analizadas en el presente estudio se encuentra el tipo de suelo, vegetación, elevación topográfica, litología y presencia de cuerpos de agua. De las cuales, fueron analizados los indicadores superficiales a través de la manipulación y análisis espacial de la información cartográfica temática empleada en este estudio por medio del software ArcMap y la aplicación de la herramienta de *superposición de polígonos* que condujo a la determinación de zonas de recarga y descarga para el área de estudio. En la tabla 5.1 se señalan las principales características de variables físicas y de vegetación asociadas con zonas de recarga y descarga de agua subterránea para el área de estudio, no obstante, la ubicación de estas zonas a través del uso de indicadores superficiales no permite obtener la trayectoria de flujo asociada con cada una de las zonas establecidas, parte fundamental para establecer el funcionamiento del flujo subterráneo,

por lo que posteriormente se procede al análisis hidroquímico del agua subterránea y de las propiedades hidráulicas de la litología existente en el área.

Tabla 5.1. Indicadores superficiales de zonas de recarga/descarga para el área de estudio

	RECARGA	DESCARGA
SUELO	Leptosol, Regosol calcárico, Cambisol eútrico, húmico, Luvisol cromico, ortico, Feozem haplico(?)	Xerosol cálcico, gypsico, Planosol eútrico, Molico, Regosol eútrico, Fluvisol eútrico, Castañozem cálcico
VEGETACIÓN	Bosque de encino, pino, Bosque de coníferas (no pinus), Chaparral, Pastizal natural (altitudes ≥ 2300 m snm)	Mezquital-Huizachal, Vegetación halófila y gipsófila
ELEVACIÓN TOPOGRÁFICA	$\geq 2,300$ msnm	$\leq 2,000$ m snm
LITOLOGÍA	Aluvial, Arenisca-Conglomerado polimíctico; Conglomerado Polimíctico; Conglomerado Oligomíctico; Andesita; Andesita- Dacita; Dacita-Andesita; Basalto; Latita; Traquita; Riodacita; Traquiandesita; Riolita; Riolita- TobaRiolítica; TobaRiolítica; Ignimbrita; Ignimbrita- TobaRiolítica; Ignimbrita-Riolita	No Aplica
PRESENCIA DE CUERPOS DE AGUA	No Aplica	Manantiales Ojo Caliente, Labor del Río, Santa María del Río y las Rusias Manantiales de aguas termales (SRH, 1976; Prol, 1988) Ríos o corrientes perennes (INEGi, 2000b)

Así, con la metodología llevada a cabo en la presente investigación, se obtuvo como zonas de recarga para el área de estudio a las Sierras: Fría, El Cubo, San Miguelito, Santa Bárbara, Jacales; los Cerros: El Tecolote, La Giganta, Los Huacales, Colorado; y por último las Mesas: Chinampas, Los Hoyos, La Cieneguita, Carmona. Por su parte, las zonas de descarga originales corresponden principalmente con la planicie en la fosa tectónica de Aguascalientes y porciones hacia los Altos de Jalisco, Santa María del Río, Ojuelos.

RESULTADOS ANÁLISIS HIDROQUÍMICO

Un análisis hidroquímico se realizó para 145 muestras de agua colectadas en el área de estudio (CNA, 1999), así como para aquellas muestras (21) tomadas para la presente investigación en el 2010. La definición de grupos de agua se basó principalmente en el análisis de temperatura, litio, cloruro y sodio ya que por su parte las facies hidroquímicas no arrojaron información coherente y confiable debido posiblemente a la gran complejidad y diversidad geológica del área que le atribuye al agua elementos químicos en forma contrastante, haciendo difícil la homogenización de grupos de agua en el espacio

estudiado. De esta manera, se identificaron tres conjuntos de agua (agua fría -12° a 21°C; agua templada -22° a 34.3°C y agua termal – temperatura mayor de 34.3°C), los cuales se subdividieron en ocho grupos de agua, junto con la muestra salinas que representa agua muy evaporada, de estos grupos: dos corresponden con mezcla de agua (grupos 6, 7 y Salinas), dos pertenecientes a flujo local (grupos 1 y 5), dos a intermedio (grupo 2 y 8), y dos a regional (grupos 3 y 4). Las principales características fisicoquímicas por grupo de agua se aprecian en la tabla 4.8.

Las diferencias entre cada uno de los flujos definidos se cree está relacionado con el material geológico por donde circula y adicionalmente se encontraron tres tendencias posiblemente debido a la presencia de diferente tipo de litología y agua de saturación: 1) agua con alta CE y baja temperatura que correspondería con agua que se desplaza gran distancia sin alcanzar una profundidad importante, es decir, predomina un movimiento del agua en el plano horizontal; 2) agua con alta temperatura y CE, sugiriendo que alcanza profundidad y distancia de recorrido importantes, y 3) agua con temperatura alta y baja CE debido a que posiblemente alcanza una importante profundidad pero con relativa alta velocidad en el subsuelo que no le permite gran interacción con la roca.

Al realizar la comparación entre las muestras de agua de 1999 y 2010 se aprecian algunas variaciones en la concentración de diversos elementos químicos, ocasionando en ciertos casos un cambio en la facies hidroquímica (p. ej. la muestra 58, asociada con flujo regional del grupo 3, tipo $SO_4 > HCO_3 - Na$, pasa a ser mezcla entre flujos intermedio y regional, grupo 7 y tipo de agua $HCO_3 - Ca > Na$). Con base en este comportamiento se comprueba que la calidad química del agua subterránea es variable con el tiempo, en ocasiones con variaciones mínimas y por el contrario, otras veces se presentan cambios importantes, los cuales están asociados principalmente con la forma de extracción del agua debido a que, generalmente, se induce la salida de agua perteneciente a flujos profundos (intermedio o regional) o a una mezcla de ellos. Esta situación refleja la importancia de realizar el monitoreo continuo del agua para definir la calidad del agua que se extrae y así evitar problemas de salud pública o impactos negativos al ambiente. Asimismo, el análisis previo de este comportamiento en la calidad química del agua permitirá el buen funcionamiento de plantas de tratamiento o la búsqueda clara de otras alternativas para la obtención de agua con calidad óptima.

En cuanto a calidad química del agua en el área de estudio, se encontraron concentraciones mayores a las establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSAI-1994 de fluoruro, mercurio y arsénico principalmente. Por otra parte, tan sólo una muestra de agua (46-1999) supera el límite permisible de la norma con respecto al contenido de nitrato sugiriendo en general una baja contaminación por actividad antrópica.

Vulnerabilidad del agua subterránea a la precipitación

Con base en la definición de la jerarquía de los sistemas de flujo (local, intermedio y regional), se estableció el grado de vulnerabilidad a la precipitación para cada uno de ellos de acuerdo con la teoría de los sistemas de flujo, la cual señala al flujo local como estrechamente dependiente de la precipitación y en caso de presentarse una temporada de sequía estas manifestaciones serán las primeras en verse afectadas en su descarga debido a su corto recorrido desde su recarga hasta su descarga. Por el contrario, la manifestación de la variación en la precipitación en el flujo regional es menos perceptible

teniendo en cuenta su mayor distancia de recorrido, en la escala de tiempo humano, su edad es mayor de 5,000-6,000 años en el caso del agua que se extrae de San Luis Potosí y esto implica un volumen almacenado mayor a través de ese tiempo.

De esta manera se asignó una vulnerabilidad a la falta de precipitación muy alta a los flujos locales, media a los flujos intermedios y muy baja a regionales. Los flujos que corresponden con mezcla de aguas presentan una vulnerabilidad alta y baja de acuerdo con los flujos involucrados, es decir, la vulnerabilidad a la precipitación es alta para la mezcla de flujos locales e intermedios y, para la mezcla de intermedios y regionales la vulnerabilidad es baja. La asignación de un grado de vulnerabilidad a los sistemas de flujo permite resaltar aquellos prioritarios para su protección y adecuado manejo. Así, se obtiene que el agua asociada con flujo local es de suma importancia por ser la primera afectada en caso de variación en la precipitación, adicionalmente debe contemplarse que su calidad química es la más adecuada para consumo humano sin generar afectaciones en la salud de la población.

El estudio de los sistemas de flujo de agua subterránea, y en especial, la determinación de su jerarquía es una herramienta sumamente útil para definir los sitios más vulnerables a cualquier variación en la precipitación.

Temperatura mínima de equilibrio y profundidad alcanzada por el agua subterránea

La temperatura mínima de equilibrio a profundidad de circulación del agua subterránea se determinó a través del software AQUACHEM (1997), usando el geotermómetro de calcedonia principalmente, y en menor grado el geotermómetro de Na-K-Ca teniendo en cuenta que tan sólo trece muestras en total presentaron un índice de madurez mayor a dos, factor que permite determinar la confiabilidad en los resultados obtenidos por la aplicación de este último geotermómetro basándose en el grado de equilibrio agua-roca. Asimismo, fue posible determinar la profundidad mínima usando el gradiente geotérmico definido por Smith *et al.* (1979; tomado de Cardona, 1990; Carrillo-Rivera, 1992; Molina-Maldonado, 1996; Cardona, 2007) para rocas similares en Zacatecas y Chihuahua que varía de 31.4 a 39.3°C/km. En la tabla 5.2 se exhiben los resultados promedio obtenidos de temperatura y profundidad mínima alcanzada por el agua subterránea que se extrae en el área de estudio mediante la aplicación de geotermómetros.

Tabla 5.2. Valores promedio para temperatura y profundidad mínima alcanzada por el agua

	Temperaturas mínimas promedio	Profundidades mínimas promedio
Grupo 3	44 - 110	1,000 – 2,900 m
Grupo 4	42 - 103	950 – 2,700 m

Los resultados de la aplicación de geotermómetros se presentan sólo para las muestras de agua de flujo regional debido a que se obtuvieron valores incongruentes para flujos local e intermedio, que al igual que señala Cardona (2007), se cree es por su elevado contenido de SiO₂, obtenido por la interacción del agua con material arcilloso.

FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Definición de zonas de recarga del agua que se extrae en el área de estudio

Inicialmente se contemplaba la posibilidad de definir la altitud de recarga para cada muestra de agua subterránea a través del uso de los isótopos ambientales estables ($\delta^{18}\text{O}$)

y $\delta^2\text{H}$), sin embargo, teniendo en cuenta que la mayoría de muestras de agua corresponden con flujos intermedio, regional y mezcla entre éstos, no es posible realizar tal asociación. Esto se debe a que no se cuenta con un registro histórico de la concentración isotópica del agua de lluvia de más de 5,000 – 6,000 años que es la edad del agua de mezcla de flujo regional e intermedio, según lo determinado para la región de San Luis Potosí (ver tabla 4.15), es decir, no se conoce la influencia de la variabilidad climática en el contenido isotópico del agua lluvia, como tampoco su relación con la altitud de precipitación.

Por esta razón, se buscó una alternativa para la definición de las zonas de recarga, la cual consistió en el cálculo de la distancia de recorrido del agua subterránea para obtener una idea preliminar de la ubicación de posibles zonas de recarga. Este cálculo se realizó a partir de algunas propiedades hidráulicas (transmisividad, espesor saturado, porosidad, conductividad hidráulica) del medio por donde circula el agua, obtenidas a través de pruebas de bombeo realizadas por Carrillo-Rivera (1992). Así, se obtuvo una primera aproximación de la distancia de recorrido del agua subterránea bajo el escenario de un acuífero fracturado y de doble porosidad. La aplicación general de esta técnica para el cálculo de la distancia de recorrido se considera válida debido a que la química del agua, según los datos del estudio de Cardona *et al.* (2012), exhiben una relación lineal entre los principales parámetros indicadores usados en estudios hidrogeológicos (litio, sodio y temperatura; figura 4.34 a, b, c).

Los cálculos arrojaron distancias de recorrido del agua subterránea mínimas de 50-300 km para los flujos denominados en el presente estudio como regionales (los cuales corresponden realmente con mezcla de flujos regional e intermedio) y 15-100 km para flujos intermedios, validando así la posibilidad de una conexión hidráulica subterránea entre cuencas señalada en diversos estudios y con la posibilidad de distancias de recorrido mayores para flujos regionales. Una delimitación con mayor aproximación de aquellas zonas de recarga asociadas con el agua que se extrae en el área de estudio (flujos intermedio y regional) se realizó con un análisis de indicadores superficiales y superposición de polígonos, esta vez a escala nacional e incorporando los polígonos de distancia de recorrido; elevaciones topográficas mayores a 2,400 m snm; presencia de vegetación tipo bosques de pino, encino, coníferas, mesófilo de montaña, y pastizal natural presente a una altitud mayor a los 2,400 m; incluyendo finalmente la litología con alta a moderada conductividad hidráulica. Así, las figuras 4.36 y 4.37 exhiben las zonas de recarga para flujos regional e intermedio del agua que se extrae en el área de estudio a través de pozo.

Definición de zonas de descarga del agua que se extrae en el área de estudio

Teniendo en cuenta que los flujos intermedios y regionales determinados en la presente investigación corresponden con agua que se extrae de pozo en el área, es decir, no pertenece a alguna manifestación del agua en superficie, se buscó una metodología para la ubicación de las zonas de descarga natural de esta agua. Esta consistió en el análisis de la presencia de manantiales termales con base en el trabajo de Prol (1988), existencia de vegetación halófila y gipsófila, elevación topográfica igual o menor a los 2,000 m y dirección de movimiento del agua subterránea con base en la reconstrucción de la elevación de cargas piezométricas para las décadas de los setenta y ochenta; obteniéndose así la figura 4.38 que muestra posibles zonas de descarga natural del agua

de flujo regional e incluso flujo intermedio; agua que se extrae por pozo, y cuya recarga se localiza más allá de los límites del área de estudio, al sur, suroeste y este de la misma.

Trayectoria de flujo

A partir de la dirección del movimiento natural del agua subterránea (o menos perturbado), reconstruida en el presente estudio en el apartado 4.1.5 (hidrología histórica-movimiento del agua subterránea en el plano horizontal) para las décadas de los setenta y ochenta, se estableció la trayectoria de flujo del agua subterránea desde su recarga hasta su descarga. Los resultados sugieren que el agua que se extrae del oeste y noroeste del área de estudio proviene de la Sierra Madre Occidental (zona de recarga), continuando su recorrido por el subsuelo y descargando naturalmente fuera del límite del área, al sur, suroeste de la misma. Teniendo en cuenta que en esta porción del área de estudio, hace unos cientos de años se presentaba la descarga natural de manantiales (Aguascalientes) se contempla la posibilidad que parte de estos flujos intermedios y/o regionales descargaban en esta zona y el resto continuaba al sur.

Por su parte, hacia la zona de Villa de Reyes la dirección de flujo del agua subterránea es de suroeste a noreste, lo que indica que la recarga se origina en el Cinturón Volcánico Transmexicano continuando su rumbo hacia el noreste hasta descargar muy posiblemente fuera del límite del área de estudio, hacia el este-noreste.

Uno de los resultados más representativos de esta investigación es la sección hidrogeológica esquemática, en la que se incluye la litología, tipo de suelo y su uso, la vegetación, manantiales, así como las zonas de recarga y descarga en el área de estudio (ver figura 4.39). Por otro lado, las figuras 4.40 y 4.41 corresponden con una representación de la posible trayectoria del flujo subterráneo del agua que se extrae en el área de estudio, asociada con flujos intermedio y regional, mostrando a su vez un escenario inicial tridimensional del comportamiento del agua subterránea en el área.

CONSIDERACIONES GENERALES

Los objetivos general y específicos planteados en el presente estudio se desarrollaron satisfactoriamente, obteniéndose una aproximación del funcionamiento de los sistemas de flujo para el área de estudio y sus alrededores, teniendo en cuenta que su trayectoria incorpora una superficie de mayor extensión que aquella definida en esta investigación. Desafortunadamente, en este estudio no fue posible determinar la edad relativa del agua subterránea que se extrae en el área. Inicialmente se contemplaba la toma de muestras de agua para su posterior análisis isotópico (tritio y carbono 14) para determinar así su edad, no obstante, debido al alto costo que esto implica no se realizó tal actividad. Para continuar y hacer posible la presente investigación, se emplearon datos de edad existente en la literatura, específicamente para San Luis Potosí.

El desarrollo de metodologías como la propuesta en la presente investigación y realización de estudios de este tipo conduce a la obtención de resultados confiables debido a que corresponde con un análisis interdisciplinario, en el que resalta la utilidad e importancia de la teoría de los sistemas de flujo debido a su visualización del ambiente como sistema y a que se puede corroborar y correlacionar los resultados de unos elementos con otros (suelo, vegetación, historia, hidroquímica, hidráulica, etc.).

De acuerdo con la química del agua, a través del uso de geotermómetros y cálculo de la distancia de recorrido principalmente, se valida la suposición señalada en diversos estudios sobre una conexión hidráulica subterránea en las rocas volcánicas del Terciario que permite la circulación del agua subterránea por centenares de kilómetros (mínimos de 50-300 km para flujos regionales y de 15-100 km para flujos intermedios). Asimismo, el gran espesor de estas rocas (promedio de 1,700 m) permite la formación de los tres tipos de sistemas de flujo (regional, intermedio y local) en una superficie que va más allá de los límites del área del presente estudio. Este resultado recalca la importancia que tiene realizar estudios hidrogeológicos a escala regional con el fin de determinar el comportamiento del agua subterránea en el subsuelo, y su relación con los demás componentes del ambiente. Asimismo, un estudio regional, como el aquí realizado, permite obtener un panorama más cercano a la realidad del sistema natural, el cual a su vez permitirá determinar posibles efectos en superficie por acciones realizadas en el subsuelo, así como afectaciones en el subsuelo por acciones en superficie en una cuenca superficial y hacia otras cuencas superficiales vecinas.

La presencia y actividad humana ha ocasionado cambios en la dinámica del flujo subterráneo. Como se apreció con la reconstrucción histórica de cuerpos de agua y ríos para el área de estudio, la descarga natural de flujo regional se manifestaba en forma principal hacia Aguascalientes y Santa María del Río, SLP. Actualmente, la presencia de flujos intermedios y regionales en el área de estudio se debe principalmente a su inducción a través de la extracción intensiva de agua subterránea por medio de pozos, así como el inadecuado diseño u operación de los mismos, modificando la relación vertical de cargas hidráulicas alrededor del pozo y por ende, induciendo el movimiento vertical ascendente del agua subterránea. Por lo tanto, la alteración del funcionamiento del agua subterránea ocurre en tres dimensiones: en el sentido vertical (z) y horizontal (x, y). Lamentablemente, la mayoría de estudios de carácter hídrico se limitan al análisis del movimiento del agua en la parte superficial (x, y), sin considerar que el agua se mueve de manera tridimensional, por lo que es recomendable que el estudio del agua subterránea se realice igualmente en tres dimensiones. Una razón que enmarca la necesidad de los estudios en 3-D en el territorio nacional es el gran espesor de la columna estratigráfica ($>2,000$ m); sin embargo, se desconoce claramente el contenido de dicha columna. Asimismo, durante el desarrollo de la presente investigación se hizo evidente la necesidad de realizar análisis del complejo comportamiento del flujo de agua en medios fracturados y de doble porosidad para así obtener características hidrogeológicas más confiables de estos medios y, por ende, una mayor aproximación del funcionamiento del flujo subterráneo.

Debido a la relevancia del agua subterránea en el país debe realizarse un esfuerzo por tratar de entender su comportamiento para con base en esto tomar las medidas indicadas, ejecutar acciones óptimas y en sí, lograr finalmente la tan anhelada gestión (adecuada) del agua y el ambiente, con base en el funcionamiento sistémico de la naturaleza, enmarcado en el funcionamiento del agua subterránea.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AQUACHEM (1977) Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting version 3.7 y 4.0. Software by Waterloo Hydrologic Inc. Waterloo, Ontario, Canada.
- Aguilera-Barraza FA, 2008. Origen y naturaleza de los fluidos en los sistemas volcánicos, geotermales y termales de baja entalpía de la Zona Volcánica Central (ZVC) entre los 17°43'S y 25°10'S. Tesis de doctorado en Ciencias mención Geología. Universidad Católica del Norte. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas. Antofagasta, Chile.
- Alley WM, Reilly TE y Franke OL, 1999. Sustainability of ground-water resources. US Geological Survey Circular 1186. Del 21/10/2010 http://pubs.usgs.gov/circ/circ1186/html/gen_facts.html
- Anderson TW, Welder GE, Lesser G y Trujillo A, 1988. Region 7, Central Alluvial Basins. Chapter 10 in: Hydrogeology. Edited by W Back, JS Rosenshein y PR Seaber. The Geology of North America. Volumen O-2. Geological Society of America. USA.
- Arriaga L, Espinoza JM, Aguilar C, Martínez E, Gómez L y Loa E, 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.
- Auge M, 2004. Vulnerabilidad de acuíferos conceptos y métodos. Agosto del 2004. Del 19/08/2011. <http://www.gl.fcen.uba.ar/investigacion/grupos/hidrogeologia/auge/Vulnerabilidad-Conceptos.pdf>
- Barkin D, 1998. Riqueza, pobreza y desarrollo sustentable. México: Editorial Jus y Centro de Ecología y Desarrollo. ISBN: 9687671041; versión electrónica. Del 16/11/2011. URL: <http://anea.org.mx/publicaciones.htm>
- Basauri C, 1940. La población indígena en México. Etnografía. Oficina Editora Popular. Secretaría de Educación Pública. México.
- Bellido F, Díez-Montes A, Sánchez-García T, 2010. Caracterización geoquímica y estudio comparativo de plagiogranitos de las Zonas Surportuguesa y Ossa-Morena (SO del Macizo Ibérico, España). Estudios Geológicos, 66(1), enero-junio 2010, 13-23.
- Bradbury JP, 2000. Limnologic history of Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México for the past 48,000 years: impacts of climate and man. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 163. pp. 69–95.
- Cardona A, 1990. Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea del Valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo. Tesis de Maestría en Ciencias con especialidad en hidrología subterránea. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México.
- Cardona A, 2007. Hidrogeoquímica de sistemas de flujo, regional, intermedio y local. Resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra con especialidad en Aguas Subterráneas. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Cardona A, Carrillo-Rivera JJ, Martínez-Hernández JE y Castro J, 2012. How the application of a statistical approach in ¹⁴C dating may interfere computed groundwater age? An application in a volcanic environment. Sometido para su

- publicación a la Sección de Hidrología Isotópica, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena, Austria.
- Carrillo J, 1985. Aguas subterráneas para plantas termoeléctricas. Informe interno-Comisión Federal de Electricidad. México.
- Carrillo-Rivera JJ, 1992. The hydrogeology of San Luis Potosi Area, Mexico. Tesis de Doctorado en Filosofía con especialidad en Agua Subterránea. Departamento de Ciencias Geológicas. Universidad de Londres. Reino Unido.
- Carrillo-Rivera JJ, Cardona A y Moss D, 1996. Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrogeochemical approach in the Valley of San Luis Potosi, Mexico. *J Hydrol.* 185, pp. 23-44.
- Carrillo-Rivera JJ, 2000. Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico. *Hydrogeol. J* 8 (5), pp503-520
- Carrillo-Rivera JJ, Cardona A y Edmunds WM, 2002. Use of abstraction regime and Knowledge of hydrogeological conditions to control high fluoride concentration in abstracted groundwater: basin of San Luis Potosí, Mexico. *J Hydrol.* 261: 24-47.
- Carrillo-Rivera JJ, Perevochtchikova M, Táutiva M, Godoy A, Peñuela L, Hergt T, 2004. Definición de indicadores de impacto al recurso hídrico en zonas receptoras de pago por servicios ambientales hidrológicos 2003-2004. Convenio Instituto Nacional de Ecología-Instituto de Geografía UNAM. Informe final, 91 p
- Carrillo-Rivera JJ, Varsányi I, Kovács LÓ y Cardona A, 2007. Tracing groundwater flow systems with hydrogeochemistry in contrasting geological environments. *Water, Air and Soil Pollution*, 184:77-103.
- Carrillo-Rivera JJ, Cardona A, Huizar-Alvarez R y Graniel E, 2008. Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Environmental Geology* 55 (2): 303-319.
- Carrillo-Rivera JJ, Huizar R, Cardona A, Graniel E, Centeno G, 2007. Impactos ambientales relacionados al uso ineficiente del agua subterránea en México. Nuevo Atlas Nacional de México. Agua Subterránea, NA XI.1. Instituto de Geografía, UNAM.
- Carrillo-Rivera, JJ y Ouyse, S. 2011. Enhancement in Salinity of Extracted Groundwater due to Urban Growth. *Geoenvironmental Section of the upcoming 10-volume Springer International Encyclopedia of Sustainability Science and Technology.* Aceptado para publicación (noviembre, 2011)
- Cervantes-Zamora Y, Cornejo-Olgín SL, Lucero-Márquez R, Espinoza-Rodríguez JM, Miranda-Viquez E y Pineda-Velázquez A, 1990. "Provincias Fisiográficas de México". Extraído de Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV.10.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Clark I y Fritz P, 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis publishers. Boca Raton, Florida. 328 pp.
- Committee on techniques for Assessing Ground Water Vulnerability, Water Science and Technology Board, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council, 1993. Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Academy of Sciences. Washington, D.C.

- CNA, 1998a. "Cuencas Hidrológicas". Comisión Nacional del Agua. Escala 1:250000. México.
- _____, 1998b. "Regiones Hidrológicas Administrativas". Comisión Nacional del Agua. Escala 1:1000000. México.
- _____, 1998c. "Regiones Hidrológicas de México". Comisión Nacional del Agua. Escala 1:1000000. México.
- _____, 1999. Recopilación, integración y ordenamiento de información relativa a los sistemas de flujo de agua subterránea en la Cuenca de San Luis Potosí y su relación con la Sierra Madre Occidental. Elaborado por el Instituto de Geografía, UNAM a través del convenio SGT-GAS-001/PRO99.
- _____, 2000. Definición hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en la Cuenca de San Luis Potosí. Informe final. Convenio SGT-GAS-004/PRO2000-11-30. Comisión Nacional del Agua e Instituto de Geografía, UNAM.
- CONABIO, 1999. "Uso de suelo y vegetación modificado por CONABIO". Escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México.
- _____, 2009. Tipos de vegetación forestal y de suelos. Del 29/08/2011 http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=7#pastizales
- CONAGUA, 2002. Determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero Encarnación, Estado de Jalisco. Gerencia de Aguas Subterráneas. México, D.F.
- _____, 2007. Organismos de Cuenca. Cuencas Centrales del Norte. Del 12/09/2011 <http://www.conagua.gob.mx/OCccn/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=22adf4a9-faf5-450c-b982-89628f6127d3|Con%C3%B3cenos|1|0|0|0>
- _____, 2010. Estadísticas del Agua en México, edición 2010. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales. México.
- _____, 2011. Estadísticas del Agua en México, edición 2011. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales. México.
- Congreso del Estado de Jalisco, 1997. Acuerdo de coordinación para el aprovechamiento integral de aguas del Río Verde. Del 3/05/2011
- <http://www.google.com.mx/url?sa=t&source=web&cd=10&ved=0CFsQFjAJ&url=http%3A%2F%2Fcongreso.jalisco.gob.mx%2Fservicios%2FbibVirtual%2Fbusquedasleyes%2Farchivos%2FACuerdo%2520para%2520el%2520Aprovechamiento%2520Integral%2520Aguas%2520del%2520R%25C3%25ADo%2520Verde.doc&rct=j&q=rio%20verde%20jalisco&ei=IhzATeXsC8K2tgfvyojTBA&usg=AFQjCNHnwCLH4A8W5-1YiS0Z3tjSmOT6bQ>
- Consejo de Recursos Minerales-CRM, 1992. Monografía geológico-minera del Estado de Jalisco. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal. Subsecretaría de Minas e Industria Básica. México.
- _____, 1997. Informe final complementario a la cartografía geológico-minera y geoquímica, escala 1:250,000. Hoja Aguascalientes F13-9. Septiembre 1999.
- _____, 1997. Informe final complementario a la cartografía geológico-minera y geoquímica, escala 1:50,000. Hoja Dolores-Hidalgo F14-C44. Estado de Guanajuato. Abril 1997. Del 14/12/2010

http://portal.sgm.gob.mx/inf_tecnicos/T111995PEVA0001_1.PDF

- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2005. Interfase rural urbana en la Cuenca Alta del Lerma. Hacia una metodología unificada del análisis ambiental y ciencias sociales. Convocatoria 2002-01. Convenio Instituto de Geografía-UNAM, CONACYT, SEMARNAT, México.
- Contreras C y Galindo MG, 2008. Abasto futuro de agua potable, análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí, México. Cuadernos de Geografía. Revista Colombiana de Geografía No. 17. Bogotá, Colombia. pp. 127-137.
- Coram J, Dyson P, Houlder P y Evans R, 2000. Australian groundwater flow systems contributing to dryland salinity. Report by the Bureau of Rural Sciences for the National Land and Water Resources Audit, Canberra.
- Cortés A y Farvolden RN, 1989. Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de Las Cruces, Mexico. J Hydrol. 107, pp 147–153.
- COTAS, 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 aguas subterráneas Acuífero del Valle de SLP (COTAS), CONAGUA, SEMARNAT.
- Custodio E y Llamas M, 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.
- Davis SN y De Wiest R, 1971. Hidrogeología. Versión en español del libro: Hydrogeology. Traducido de la Edición del año 1966 por: Francisco Javier Martínez y José María Niñerola. Ediciones ARIEL, Barcelona.
- Desde la red, 2011. Aqs., con alta dependencia del agua subterránea... y en déficit. Publicación del periódico de Aguascalientes por internet “Desde la red”. 23 de marzo del 2011. Del 27/06/2011. <http://www.desdelared.com.mx/2011/raices/0323-agua.html>
- DETENAL, 1979. Carta de aguas subterráneas; escala 1:250,000, Hojas F13-6 (Zacatecas), F13-9 (Aguascalientes), F14-4 (San Luis Potosí) y F14-7 (Guanajuato). Secretaría de Programación y presupuesto. Coordinación General del Sistema Nacional de Información. Dirección General de Estudios del Territorio Nacional. México.
- Dosier-Arqueología Mexicana, 2008. Dossier: Guanajuato: Historia y arqueología. Revista Arqueología Mexicana Vol. XVI, núm. 92. Julio-agosto de 2008. México.
- Edmunds WM, Carrillo-Rivera JJ y Cardona A, 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. J Hydrol. 258, pp. 1-24
- ESRI, 2008. ArcGIS 9.3. Environmental Systems Research, Institute Inc. www.esri.com.
- Fagundo-Castillo JR, González P, Suárez Muñoz M, Fagundo-Sierra J, Melián C y Álvarez E, 2005. HIDROGEOQUIM (2005). En: Contribución a la Educación y Protección Ambiental. ISCTN. Vol 6, Q 58-67. ISBN 959-7136-35-X.
- Fagundo-Castillo JR, Carrillo-Rivera J, Antigüedad-Auzmendi I, González-Hernández P, Peláez-Díaz R, Hernández-Díaz R, Cáceres-Govea D, Hernández-Santana J, Suárez-Muñoz M, Melián-Rodríguez C, Rodríguez-Piña M, 2008. Chemical and geological control of spring water in eastern Guaniguanico mountain range, Pinar del Río, Cuba. Environmental Geology 55 (2): 247-267.

- Fagundo-Castillo JR, 2009. Curso teórico-práctico de Modelación hidrogeoquímica. Instituto de Geofísica, Ciencias de la Tierra, UNAM. 12-16 octubre.
- Fagundo-Sierra J, Fagundo JR, González P, Suárez Muñoz M, 2001. Modelación de las aguas naturales. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. Vol. VII. ISCTN, La Habana.
- FAO/UNESCO, 1998. 4. Base de referencia para los suelos del mundo. Lección 1 clasificación de suelos. Del 15/07/2011.
<http://edafologia.ugr.es/cartotema01/faowrbhd.htm>
- Ferrari L, Valencia-Moreno M y Bryan Scott, 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas selectos de la geología Mexicana. Tomo LVII, No. 3, pp. 343-378.
- Flores Aguillón G, Martínez Rodríguez L, Moreira-Rivera F, Palacios-García R, Chapa-García R, 1997. Carta geológico minera San Luis Potosí F14-4. Informe final Carta San Luis Potosí. México.
- Freeze RA y Cherry JA, 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- García E, 1998. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). "Climas" (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- García y Cubas A, 1858. Atlas geográfico, estadístico e histórico de la República Mexicana.
- García Leyton LA, 2004. Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- Gómez J, 2000. Haciendas y ranchos de Aguascalientes. Estudio regional sobre la tenencia de la tierra y el desarrollo agrícola en el siglo XIX. Universidad Autónoma de Aguascalientes. México.
- González-Abraham A, 2011. Determinación de los sistemas de flujo del agua subterránea y caracterización de sus componentes en regiones desérticas: El caso de Loreto, Baja California Sur. Tesis de Doctorado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México.
- González-Medrano F, 2003. Las comunidades vegetales de México. Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Gupta SK, 2011. Modern Hydrology and sustainable water development. Chichester, West Sussex, UK; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2011.
- Heine K, 1973. Variaciones más importantes del clima durante los últimos 40,000 años. Comunicaciones del Proyecto Puebla Tlaxcala 7: 51-58.
- Hergt T, Carrillo-Rivera JJ, Morales-Manilla LM, Angeles-Serrano G, González-Abraham A y Rosales-Lagarde L, 2002. Asesoría sobre consideraciones geohidrológicas de la relación bosques-agua en la región Sierra Gorda. Informe final para el INE, SEMARNAT. IG, UNAM, México.
- Hergt T, Castro-Larragoitia J, Cardona A y Carrillo-Rivera JJ, 2009. Análisis multivariado en la definición de sistemas de flujo de agua subterránea en San Luis Potosí. Tecnología y Ciencias del Agua ART-2009-04-03. 2009 Octubre-Diciembre.

- Huizar R, 1998. Definición del control de la calidad del agua subterránea extraída en la subcuenca de México (Delegación Ixtapalapa). Aire Agua, CONSERVA, Consejo de Estudios para la Restauración y Valoración Ambiental. Secretaría del Medio Ambiente. D.F. pp. 409-550.
- Huizar-Álvarez R, Carrillo-Rivera JJ, Angeles-Serrano G, Hergt T y Cardona A, 2004. Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City, Hydrogeology Journal 12, pp. 436-450
- INAFED, 2005a. Enciclopedia de los municipios de México. Jalisco. Medio Físico. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. Gobierno del Estado de Jalisco. Del 2/05/2011, <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/jalisco/medi.htm>
- _____, 2005b. Enciclopedia de los municipios de México. Estado de Jalisco. Encarnación de Díaz. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. Gobierno del Estado de Jalisco. Del 2/05/2011
<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/jalisco/mpios/14035a.htm>
- _____, 2009. Enciclopedia de los municipios de México. Estado de Zacatecas. Medio Físico. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. Gobierno del Estado de Zacatecas. Del 2/05/2011
<http://www.inafed.gob.mx/work/templates/enciclo/zacatecas/medi.htm>
- INEGI, 1997. Estadísticas del Medio ambiente. México
- _____, 2000a. Hidrología superficial, escala 1:250,000.
- _____, 2000b. Curvas de nivel. Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales. Escala 1:1 000 000. Del 23/11/2011.
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/InfoEscala.aspx>
- _____, 2000c. Rocas. Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales. Escala 1:1 000 000. Del 23/11/2011.
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/InfoEscala.aspx>
- _____, 2004. Guía para la interpretación de cartografía edafología. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INIFAP y CONABIO, 2005. "Edafología". Escalas 1:250 000 y 1:1 000 000. México.
- Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Del 12/12/2011.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch19s19-1-2.html#ar4top
- Kehew A, 2001. Applied chemical hydrogeology. Prentice Hall. 368 p.
- Kohn I, 2009. Modelo de flujo del acuífero de San Luis Potosí, SLP. Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. México.
- Lemieux JM, Sudicky EA, Peltier WR y Tarasov L, 2008. Dynamics of groundwater recharge and seepage over the Canadian landscape during the Wisconsinian glaciation. Journal of Geophysical Research, Vol. 113, F01011, 18 pp.
- Lugo-Hubp J, 1990. El relieve de la República Mexicana. Revista del instituto de Geología, UNAM, vol.9, núm. 1, p. 82-111.

- Lugo-Hubp J y Córdova-Fernández de Arteaga C, 2007. "Geomorfología" en Instituto de Geografía; el Nuevo Atlas Nacional de México, sección naturaleza, NA III 2., UNAM. México. 430 p.
- Maderey-R L y Torres-Ruata C, 1990. "Cuencas hidrológicas" en Hidrogeografía e hidrometría. IV.6.1. Atlas Nacional de México. Vol II. Escala 1: 4 000 000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Mádl-Szőnyi J y Tóth J, 2009. A hydrogeological type section for the Duna-Tisza interfluve, Hungary. *Hidrogeol J.* 17 (4): 961-980.
- Mark DM, Chrisman N, Frank AU, McHaffie PH y Pickles J, 1997. The GIS History Project. *Information Systems Journal* 1-21. Del 20/04/2012.
http://www.ncgia.buffalo.edu/gishist/bar_harbor.html
- Maass J. M. (1995). Conversion of tropical dry forest to pasture and agriculture. In Bullock S. T., Mooney H. A. & Medina E. (eds). *Seasonally tropical dry forests*. Cambridge University Press. Cambridge. 399-422 p.
- Metcalfe SE, 1997. Palaeolimnological records of climate change in México – frustrating past, promising future? *Quaternary International* 43/44, pp. 111-116.
- Molina-Maldonado A, 1996. Diferenciación hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en la zona sur-centro del estado de Aguascalientes, México. Tesis de licenciatura (Ingeniera Geóloga). Facultad de Ingeniería. UNAM. México.
- Nieto-Samaniego AF, Alaniz-Álvarez SA y Camprubí í Cano A, 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas selectos de la geología Mexicana. Tomo LVII, No. 3, pp. 285-318.
- Olmos S, 2001. Vulnerability and adaptation to climate change: concepts, issues, assessment methods. *Climate Change Knowledge Network*. Del 22/08/2011.
http://www.iisd.org/cckn/pdf/va_foundation_final.pdf
- Padilla M, 2010. En peligro de desaparecer lagunas en Zacatecas. Publicado el 15/04/2010. Del 3/05/2011
<http://www.direccioneszac.com/noticias.php?idnoticias=689>
- Peñuela-Arévalo LA y Miranda J, 2001. Contribución al estudio geomorfológico e hidrológico del área inundable entre Regidor y El Banco-Río Magdalena. Tesis de Licenciatura. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Peñuela-Arévalo LA, 2007. Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pago por servicio ambiental hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México. Tesis de maestría. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. México, DF.
- Price M, 2003. Agua subterránea. Versión en español del libro: *Introducing groundwater*. Traductores: JJoel Carrillo-Rivera y Antonio Cardona. Editorial Limusa, SA de CV. Grupo Noriega Editores. México. 330 p.
- Prol RM, 1988. *El calor de la Tierra*. Fondo de Cultura Económica, S.A. de C.V. Primera edición. México.
- Protección civil de Guanajuato, fecha de publicación desconocida. *Atlas de riesgos. Fenómeno hidrometeorológico*. Del 3/05/2011.

http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx/atlas/hidrometeorologico/hidro_cuenca_laja.php

- Respirazac, fecha de publicación desconocida. Introducción Bienvenidos. Respira Zacatecas, Organización Civil. Del 27/06/2011. <http://www.respirazac.org/>
- Robles V, 1939. Nicolas de Lafora. Relación del viaje que hizo a los presidios internos situados en la frontera de la América Septentrional. Perteneciente al Rey de España. Con un liminar bibliográfico y acotaciones por Vito Alessio Robles. Editorial Pedro Robredo. México, D.F.
- Rodríguez-Ríos R, Aguillón-Robles A y Leroy J, 2007. Evolución petrológica y geoquímica de un complejo de domos topacíferos en el Campo Volcánico de San Luis Potosí (México). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 24, núm. 3, 2007, p. 328-343
- Rodríguez MJ, 2001. Los sistemas de información geográfica: una herramienta de análisis en los estudios de impacto ambiental (EIA). Capítulo 10 del libro: *Arqueología de la sociología ambiental*. Editores: Aledo A y Domínguez JA. Grupo Editorial Universitario, Granada. España. Del 15/05/2012.
<http://www.ua.es/personal/antonio.aledo/docs/libro/libro.pdf>
- Rojas Rabiela T, 2004. Las cuencas lacustres del altiplano central. *Arqueología Mexicana* Vol. XII Num. 68. Lagos del Valle de México, 20-27. Julio-Agosto 2004. México.
- Rzedowski J, 2006. *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 1ra. Edición digital. Del 13/09/2011.
http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos SARH, 1978. Atlas geohidrológico. Banco Nacional de Información geohidrológica. Volumen 1.
-
- _____, 1987. Sinopsis geohidrológica del Estado de Aguascalientes. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos.
-
- _____, 1988. Estudio geofísico-geohidrológico del Valle de San Luis Potosí. Contrato SARH CC-86-314D. Informe realizado por Instituto de Geofísica-IGF. Enero, 1988. México, 138 p.
- Secretaría de Desarrollo Social SEDESOL, 2005. Integración del Sistema Nacional de Información para el desarrollo territorial en la fase correspondiente a la Caracterización del Territorio: Diagnóstico funcional del territorio nacional. Convenio SEDESOL – Instituto de Geografía UNAM. Febrero – Abril 2005.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, 2009. Los ecosistemas de México. Del 30/08/2011.
<http://www.ine.gob.mx/con-eco-ch/382-hc-ecosistemas-mexico>
- Secretaría de Recursos Hidráulicos SRH, 1976. Atlas del agua de la República Mexicana. Cincuentenario de la creación de la Comisión Nacional de Irrigación Precursora de la Secretaría de Recursos Hidráulicos. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-SEMARNAT, 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. Conservación del Recurso Agua. Que Establece las Especificaciones y el Método para Determinar la Disponibilidad Media anual de las Aguas Nacionales. Diario Oficial, México
- Servicio Geológico Mexicano, 1997a. Carta geológico-minera Zacatecas F13-6. Escala 1:250,000. México.

- _____, 1997b. Carta geológico-minera Guanajuato F14-7. Escala 1:250,000. México.
- _____, 1998a. Carta geológico-minera Aguascalientes F13-9. Escala 1:250,000. México.
- _____, 1998b. Carta geológico-minera San Luis Potosí F14-4. Escala 1:250,000. México.
- Simon S, Mádl-Szőnyi J y Müller I, 2011. Conceptual model for surface salinization in an overpressured and a superimposed gravity-flow field, Lake Kelemenszék area, Hungary. *Hydrogeol. J* 19 (3): 701-717.
- Sunsite, 2004. Historia de México. Del 12/05/2011. http://sunsite.unam.mx/historia_mexico.html
- Torreblanca C, 2008. El Cópore, Guanajuato. *Revista Arqueología Mexicana*. Vol. XVI, Núm. 92. Julio- agosto de 2008, pp. 60-63.
- Tóth J, 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 67(11):4375-4387.
- Tóth J, 1995. Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology Journal*, V3-N4, pp4-16
- _____, 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 111 (4), pp. 9-26.
- _____, 2009. *Gravitational systems of groundwater flow: Theory, Evaluation, Utilization*. Cambridge University Press. United Kingdom.
- Velázquez M, Pimentel JL y Ortega M, 2011. Estudio de la distribución de Boro en fuentes de agua de la Cuenca del Río Duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27 (1) pp. 19-30.
- Verdaguer C, 2002. *Proyectar con la naturaleza*, de Ian L. McHarg: La fundación del urbanismo ecológico. *Boletín CF+S* 20. Madrid, España. Del 14/05/2012. <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n20/nlib.html#UNO>
- Walker G, Gilfedder M, Evans R, Dyson Ph y Stauffacher M, 2003. *Groundwater Flow System Framework: Essential tools for planning salinity management*. Murray-Darling Basin Commission, MDBC Publication 15/03. Canberra, Australia.
- Weigand P, 2002. Observaciones preliminares sobre la ecología histórica de la región de Los Altos de Jalisco. En: *Estudio histórico y cultural sobre los huicholes*. Compilador: Weigand P. Universidad de Guadalajara. México.
- Winograd IJ, 1962. Interbasin movement of ground water at the Nevada Test Site, Nevada. In: *Short Papers in Geology and Hydrology: U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 450-C, C108-C111.
- Winter TC, 1999. Relation of streams, lakes and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal* (7): 28-45.
- Yarza de De la Torre E, 1992. *Volcanes de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Ciudad Universitaria. México D.F.
- Zuidam R, 1985. *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping; with contributions from F.I. van Zuidam-Cancelado and other members of the staff of the International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC)*. The Hague.

Páginas de Internet

Biblioteca Digital ILCE. Del 12/05/2011.

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/estados/libros/sanluis/html/sec_13.html

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Del 10/10/2011

<http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx>

<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/slp/fisio.cfm?c=444&e=24>

<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/definiciones/provincia.cfm?c=444&e=20>

Kalipedia. Del 12/05/2011

http://mx.kalipedia.com/historia-mexico/tema/tiempos-prehispanicos/mesoamerica-aridoamerica.html?x=20080507klphishmx_4.Kes

LongRangeWeather. Harris-Mann Climatology. Del 19/01/2012

http://www.longrangeweather.com/global_temperatures.htm

ANEXO 1.

**EJEMPLO DE FORMATO
PARA EL ESTUDIO DE
ISÓTOPOS**

Facultad de Agronomía de la UASLP

Clave 7653902

Ubicación

En el área de la estación climatológica

Inicio	Término	Mes muestra	Clave muestra	Periodo en días	volumen total captado (ml)	precipitación durante el periodo (mm)	Temperatura media (oC)	Muestra estables (60 ml)	Muestra Tritio (500 ml)	Muestra fisico-químico	Volumen fisico-químicos (ml)
03/06/2008	01/07/2008	Junio 2008	7653902-08/06	28	1200	7	20.4	sí	sí	sí	
01/07/2008	06/08/2008	Julio 2008	7653902-08/07	36	3708	34.5	20.4	sí	sí	sí	2000
06/08/2008	20/08/2008	Agosto 2008	7653902-08/08	14	3880	48.5	21.1	sí	sí	sí	2000
20/08/2008	01/10/2008	Septiembre 2008	7653902/08/09	43	4030	341.2	17.9	sí	sí	sí	2000
01/10/2008	03/04/2009	Marzo 2009	7653902/09/03	184	620			sí	sí	No	No
03/04/2009	29/05/2009	Mayo 2009	7653902/09/05	56	4130			sí	sí	sí	2000
29/05/2009	02/07/2009	Junio 2009	7653902/09/06	34	1500			sí	sí	940 ml	
02/07/2009	31/07/2009	Julio 2009	7653902/09/07	29	315			sí	250	No	No
31/07/2009	14/09/2009	Septiembre 2009	7653902/09/09	43	3710			sí	sí	sí	2000
14/09/2009	04/11/2009	Octubre 2009	7653902/09/10	51	4020			sí	sí	sí	2000

ANEXO 2.

HOJAS DE CAMPO

1 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 13 de mayo 2010	LOCALIDAD: San Juan de los Lagos
TEMPERATURA AMBIENTE: 32°C	HORA DE INICIO: 13:45
DURACIÓN DEL MUESTREO: 60 min	No. DE MUESTRA: 1
CLAVES DEL APROV.: 56. Pozo 4.	TIPO DE APROV.: Pozo
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: 12 l/s	COORDENADAS: X 102.3235, Y 21.2583; 1795 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	13:56	13:59	14:03	14:06				
Eh (mV)								
PH	8.10	8.13	8.15	8.14				
CE (µ-S)	62	63	63	62				
T °C	46.3	46.4	46.3	46.3				

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 56-2010
56-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a	12 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	6	9	21	29	44	52	54	55	56	58	62
pH	8.18	6.91	6.78	6.04	5.76	5.27	4.76	4.45	4.31	4.30	4.15	3.45

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

2 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 13 de mayo 2010	LOCALIDAD: San Juan de los Lagos
TEMPERATURA AMBIENTE: 32°C	HORA DE INICIO: 15:25
DURACIÓN DEL MUESTREO: 80 min	No. DE MUESTRA: 2
CLAVES DEL APROV.: 58. Pozo 9.	TIPO DE APROV.: Pozo
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 102.3569, Y 21.2219; 1792 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	15:40	15:42	15:45	16:30	16:37	16:40			
Eh (mV)									
PH	6.88	7.03	7.05	7.19	7.21	7.23			
CE (μ-S)	404	412	409	408	408	407			
T °C	24.8	24.9	24.9	24.8	24.8	24.8			

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 58-2010
58-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	16	40	75	100	102	103	104	106
pH	7.54	7.00	6.57	5.97	4.57	4.37	4.22	4.09	3.90

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

3 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 14 de mayo 2010	LOCALIDAD: Encarnación de Díaz
TEMPERATURA AMBIENTE: 30°C	HORA DE INICIO: 11:20
DURACIÓN DEL MUESTREO: 55 min	No. DE MUESTRA: 3
CLAVES DEL APROV.: 76, Pozo Acosta	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 120 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 102.3163, Y 21.4658; 1822 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	11:37	11:40	11:47	11:50	11:54				
Eh (mV)									
PH	7.85	7.88	7.89	7.91	7.92				
CE (μ-S)	527	526	529	527	530				
T °C	35.3	35.2	35.4	35.3	35.5				

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 76-2010
76-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	12	55	79	82	83	84	87	89
pH	7.83	6.78	5.91	5.02	4.76	4.50	4.10	3.83	3.58

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

4 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 14 de mayo 2010	LOCALIDAD: Corral Blanco
TEMPERATURA AMBIENTE: 30°C	HORA DE INICIO: 17:20
DURACIÓN DEL MUESTREO: 60 min	No. DE MUESTRA: 4
CLAVES DEL APROV.: 64, Corral Blanco	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 120 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 102.37312, Y 21.56541; 1837 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	17:45	17:47	17:49						
Eh (mV)									
PH	7.53	7.55	7.54						
CE (µ-S)	371	370	371						
T °C	24.4	24.4	24.4						

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 64-2010
64-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	22	54	80	83	84	85	86	87	88
pH	7.25	6.30	5.70	4.86	4.58	4.43	4.31	4.07	3.91	3.77

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N. Las muestras, al igual que las coordenadas, se tomaron del aljibe por no contar el pozo con llave.

5 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 15 de mayo 2010	LOCALIDAD: Belén del Refugio
TEMPERATURA AMBIENTE: 23°C	HORA DE INICIO: 8:15
DURACIÓN DEL MUESTREO: 65 min	No. DE MUESTRA: 5
CLAVES DEL APROV.: 68	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 200 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 102.43161, Y 21.53445; 1720 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	8:30	8:32	8:35	8:40	9:02				
Eh (mV)									
PH	7.49	7.59	7.71	7.81	7.83				
CE (µ-S)	389	390	390	391	392				
T °C	22.8	22.8	22.8	22.9	23.0				

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 68-2010
68-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	42	80	88	89	90	91	92	93	94	95
pH	7.92	6.46	5.53	4.78	4.67	4.56	4.40	4.29	4.15	4.10	3.02

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

6 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 15 de mayo 2010	LOCALIDAD: Villa de Ornelas
TEMPERATURA AMBIENTE: 30°C	HORA DE INICIO: 12:10
DURACIÓN DEL MUESTREO: 70 min	No. DE MUESTRA: 6
CLAVES DEL APROV.: 69 Ornelas	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 300 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 102.46988, Y 21.42305; 1695 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	12:38	12:44	12:48	12:52	12:54				
Eh (mV)									
PH	8.52	8.48	8.48	8.49	8.48				
CE (µ-S)	1365	1319	1300	1287	1261				
T °C	29.4	29.4	29.5	29.6	29.6				

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 69-2010
69-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	25	35	50	65	77	78	80	81	82	84
pH	8.44	6.76	6.44	5.95	5.47	4.66	4.45	4.20	4.10	4.02	3.93

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

7 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 15 de mayo 2010	LOCALIDAD: Los Yañez
TEMPERATURA AMBIENTE: 32°C	HORA DE INICIO: 14:20
DURACIÓN DEL MUESTREO: 55 min	No. DE MUESTRA: 7
CLAVES DEL APROV.: 63	TIPO DE APROV.: Pozo
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 102.37312, Y 21.56541; 1837 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	14:39	14:42	14:48	14:57	14:59				
Eh (mV)									
PH	6.13	6.24	6.50	6.58	6.58				
CE (µ-S)	105	105	104	105	105				
T °C	32.0	32.1	32.1	32.1	32.0				

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 63-2010
63-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	10	18	20	21	22	23
pH	6.70	5.96	4.99	4.51	4.23	3.95	3.74

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

8 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 17 de mayo 2010	LOCALIDAD: Luis Moya
TEMPERATURA AMBIENTE: 20°C	HORA DE INICIO: 9:40
DURACIÓN DEL MUESTREO: 50 min	No. DE MUESTRA: 8
CLAVES DEL APROV.: 80-Pozo 1 Luis Moya	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 210 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: 20 l/s	COORDENADAS: X 102.24637, Y 22.42813; 1991 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	9:46	9:51	9:57	10:01					
Eh (mV)									
PH	7.11	7.17	7.19	7.21					
CE (µ-S)	522	524	523	523					
T °C	26.8	26.8	26.7	26.7					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 80-2010
80-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	20	55	85	88	90	91	92	93	94	95
pH	7.29	6.60	5.98	5.04	4.76	4.52	4.35	4.18	4.06	3.93	3.84

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

9 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 17 de mayo 2010	LOCALIDAD: Ojo Caliente
TEMPERATURA AMBIENTE: 23°C	HORA DE INICIO: 11:20
DURACIÓN DEL MUESTREO: 57 min	No. DE MUESTRA: 9
CLAVES DEL APROV.: 99	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 100 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: 36l/s	COORDENADAS: X 102.25303, Y 22.57168; 2051 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	11:34	11:37	11:40	11:44	11:47	11:51			
Eh (mV)									
PH	7.18	7.21	7.29	7.36	7.38	7.42			
CE (µ-S)	487	487	488	487	487	487			
T °C	27.6	27.6	27.8	27.6	27.6	27.6			

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 99-2010
99-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	50	80	104	106	107	108	109	110
pH	7.50	6.45	5.95	4.79	4.46	4.27	4.09	3.99	3.96

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

10 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 17 de mayo 2010	LOCALIDAD: El Tule
TEMPERATURA AMBIENTE: 32°C	HORA DE INICIO: 15:55
DURACIÓN DEL MUESTREO: 50 min	No. DE MUESTRA: 10
CLAVES DEL APROV.: 102	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 95 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 102.02648, Y 22.62814; 2065 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	16:10	16:13	16:20	16:24	16:31				
Eh (mV)									
PH	7.50	7.53	7.56	7.58	7.58				
CE (µ-S)	869	878	878	878	880				
T °C	24.8	25.2	25.0	25.0	25.2				

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 102-2010
102-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	45	97	111	113	114	115	116	117	118	120
pH	7.65	6.38	5.45	4.67	4.47	4.37	4.25	4.13	4.00	3.92	3.73

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

11 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 17 de mayo 2010	LOCALIDAD: El Tule
TEMPERATURA AMBIENTE: 24°C	HORA DE INICIO: 17:25
DURACIÓN DEL MUESTREO: 55 min	No. DE MUESTRA: 11
CLAVES DEL APROV.: 101-Salinas	TIPO DE APROV.: Noria
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Industrial, producción de sal
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 102.04059, Y 22.65376; 2027 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	17:45	17:50	17:58					
Eh (mV)								
PH	9.72	9.66	9.65					
CE (µ-S)								
T °C	18.2	18.2	18.1					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 101-2010
101-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	4001	8200	11201
pH	9.73	8.45	6.19	6.10

COMENTARIOS: El valor de la conductividad supera el límite de detección del equipo (>2,000 µS). Igualmente la prueba de alcalinidad no se realizó debido a la gran cantidad de ácido que se requería para la misma. Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

12 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 18 de mayo 2010	LOCALIDAD: Nigromante
TEMPERATURA AMBIENTE: 27°C	HORA DE INICIO: 12:45
DURACIÓN DEL MUESTREO: min	No. DE MUESTRA: 12
CLAVES DEL APROV.: 44,P-NIG-22-X	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: ~200 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 101.69838, Y 22.20645; 2198 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	13:05	13:08	13:18	13:23					
Eh (mV)									
PH	7.39	7.40	7.40	7.39					
CE (μ -S)	590	595	583	584					
T °C	27.3	27.3	27.4	27.4					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 44-2010
44-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
$\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	20	37	60	63	64	65	66	67
pH	7.47	6.35	5.93	4.86	4.39	4.12	4.00	3.90	3.77

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

13 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 18 de mayo 2010	LOCALIDAD: Obraje
TEMPERATURA AMBIENTE: 30°C	HORA DE INICIO: 15:50
DURACIÓN DEL MUESTREO: 50 min	No. DE MUESTRA: 13
CLAVES DEL APROV.: 36, NZAC-20X	TIPO DE APROV.: Pozo
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Riego
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 101.58101, Y 22.18734; 2216 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	16:11	16:14	16:18	16:20					
Eh (mV)									
PH	7.74	7.78	7.82	7.82					
CE (μ-S)	468	467	468	468					
T °C	20.3	20.2	20.4	20.5					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 36-2010
36-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	20	32	48	49	50	51	52	53
pH	7.86	6.30	5.88	4.52	4.29	4.18	4.07	3.94	3.87

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

14 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 18 de mayo 2010	LOCALIDAD: Ojuelos
TEMPERATURA AMBIENTE: 29°C	HORA DE INICIO: 17:35
DURACIÓN DEL MUESTREO: 45 min	No. DE MUESTRA: 14
CLAVES DEL APROV.: 88-Pozo Guadalupe	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 400 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: 22 l/s	COORDENADAS: X 101.57206, Y 21.87206; 2209 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	17:50	17:54	17:57	18:00					
Eh (mV)									
PH	7.13	7.15	7.15	7.14					
CE (µ-S)	586	588	587	587					
T °C	38.3	38.5	38.3	38.3					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 88-2010
88-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	20	42	70	71	72	73	74	75
pH	7.24	6.46	5.98	4.58	4.42	4.19	4.02	3.86	3.73

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

15 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 19 de mayo 2010	LOCALIDAD: San Juanico
TEMPERATURA AMBIENTE: 31°C	HORA DE INICIO: 12:10
DURACIÓN DEL MUESTREO: 50 min	No. DE MUESTRA: 15
CLAVES DEL APROV.: 132	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 240 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 100.98785, Y 22.22317; 1870 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	12:30	12:33	12:36	12:39	12:42				
Eh (mV)									
PH	7.30	7.31	7.32	7.31	7.33				
CE (µ-S)	405	405	405	400	407				
T °C	33.5	33.4	33.5	33.5	33.5				

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 132-2010
132-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	20	48	64	67	68	69	70
pH	7.43	6.70	5.94	4.89	4.30	4.09	3.85	3.77

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

16 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 19 de mayo 2010	LOCALIDAD: Ejido Palma de la Cruz
TEMPERATURA AMBIENTE: 29°C	HORA DE INICIO: 14:45
DURACIÓN DEL MUESTREO: 55 min	No. DE MUESTRA: 16
CLAVES DEL APROV.: 123, ZA-1171	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 400 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Riego
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: 28 l/s	COORDENADAS: X 100.87242, Y 22.25703; 1834 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	15:15	15:18	15:21	15:24	15:28	15:30			
Eh (mV)									
PH	7.19	7.26	7.25	7.32	7.34	7.36			
CE (µ-S)	257	259	261	264	262	261			
T °C	24.0	24.2	24.3	24.4	24.1	24.0			

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 123-2010
123-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	20	47	49	50	51	52	53
pH	7.41	6.49	5.10	4.69	4.22	4.06	3.91	3.80

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

17 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 19 de mayo 2010	LOCALIDAD: Candido Navarro
TEMPERATURA AMBIENTE: 31°C	HORA DE INICIO: 15:47
DURACIÓN DEL MUESTREO: 62 min	No. DE MUESTRA: 17
CLAVES DEL APROV.: 137	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: ~360 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 100.86343, Y 22.26996; 1833 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	16:03	16:04	16:09	16:11					
Eh (mV)									
PH	7.50	7.52	7.72	7.67					
CE (µ-S)	262	260	266	268					
T °C	26.1	26.3	27.1	27.3					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 137-2010
137-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	25	35	48	49	50	51	52	53
pH	7.80	6.24	5.87	4.61	4.36	4.11	3.95	3.83	3.73

COMENTARIOS: Las mediciones no se realizaron en las condiciones óptimas debido a que el agua se regaba de los tanques y el encargado de pozo no nos permitió continuar, a partir de la 3^a lectura son mediciones de agua extraída a un recipiente. Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

18 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 19 de mayo 2010	LOCALIDAD: San Nicolás de Jasos
TEMPERATURA AMBIENTE: 32°C	HORA DE INICIO: 17:45
DURACIÓN DEL MUESTREO: 48 min	No. DE MUESTRA: 18
CLAVES DEL APROV.: 144	TIPO DE APROV.: Pozo
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 100.83565, Y 22.13031; 1845 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	18:08	18:12	18:15	18:18					
Eh (mV)									
PH	7.43	7.46	7.45	7.46					
CE (µ-S)	597	593	600	596					
T °C	28.5	28.5	28.6	28.6					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 144-2010
144-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	16	33	55	56	57	58	59	60
pH	7.45	6.46	5.91	4.58	4.37	4.15	4.00	3.83	3.72

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

19 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 20 de mayo 2010	LOCALIDAD: San Felipe
TEMPERATURA AMBIENTE: 24°C	HORA DE INICIO: 10:22
DURACIÓN DEL MUESTREO: 45 min	No. DE MUESTRA: 19
CLAVES DEL APROV.: 34, pSMI2-19-X	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: ~700 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento público
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 101.22167, Y 21.48788; 2101 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	10:40	10:43	10:46	10:50					
Eh (mV)									
PH	7.92	8.02	8.03	8.03					
CE (µ-S)	333	333	335	335					
T °C	37.2	37.2	37.4	37.3					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 34-2010
34-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	25	32	51	53	54	55	56	57	58
pH	8.08	6.16	5.95	4.88	4.62	4.32	4.03	3.88	3.74	3.62

COMENTARIOS:

Sitio conocido como "Pozo 2 San Miguel". Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

20 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 20 de mayo 2010	LOCALIDAD: Ex Hacienda de Jesús
TEMPERATURA AMBIENTE: 35°C	HORA DE INICIO: 14:10
DURACIÓN DEL MUESTREO: 47 min	No. DE MUESTRA: 20
CLAVES DEL APROV.: 31	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: ~270 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Abastecimiento pero no de consumo
CAUDAL DE EXTRACCIÓN:	COORDENADAS: X 100.86343, Y 22.26996; 1833 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	14:30	14:33	14:38	14:42					
Eh (mV)									
PH	8.03	8.05	8.05	8.05					
CE (µ-S)	639	758	757	761					
T °C	48.9	49.1	49.1	49.1					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 31-2010
31-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
δ ¹⁸ O y δ ² H	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	30	46	78	79	80	81	82	83	84
pH	8.11	6.39	5.97	4.66	4.42	4.29	4.16	3.92	3.66	3.59

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

21 ESTUDIO: Funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, Mesa Central.

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 20 de mayo 2010	LOCALIDAD: Nacimiento
TEMPERATURA AMBIENTE: 33°C	HORA DE INICIO: 17:30
DURACIÓN DEL MUESTREO: min	No. DE MUESTRA: 21
CLAVES DEL APROV.: 29	TIPO DE APROV.: Pozo PROF: 250 m
TIEMPO DE BOMBEO:	USO DEL AGUA: Riego
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: 30 l/s	COORDENADAS: X 100.46191, Y 21.09307; 2033 m snm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo	17:47	18:00	18:03	18:06					
Eh (mV)									
PH	7.72	7.80	7.83	7.83					
CE (μ -S)	451	449	452	450					
T °C	48.4	48.4	48.3	48.3					

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 29-2010
29-2010 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Cationes	Polietileno	60 ml	HNO ₃	✓ SI
$\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Tritio	Polietileno	500 ml	NO	✓ NO
Extra	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a
SOLUCIÓN (ml)	0	25	40	62	63	64	65	66	67
pH	7.88	6.41	5.88	4.67	4.35	4.03	3.79	3.70	3.61

COMENTARIOS:

Se usaron 50 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

ANEXO 3.

**CÁLCULO DE LA
ALCALINIDAD**

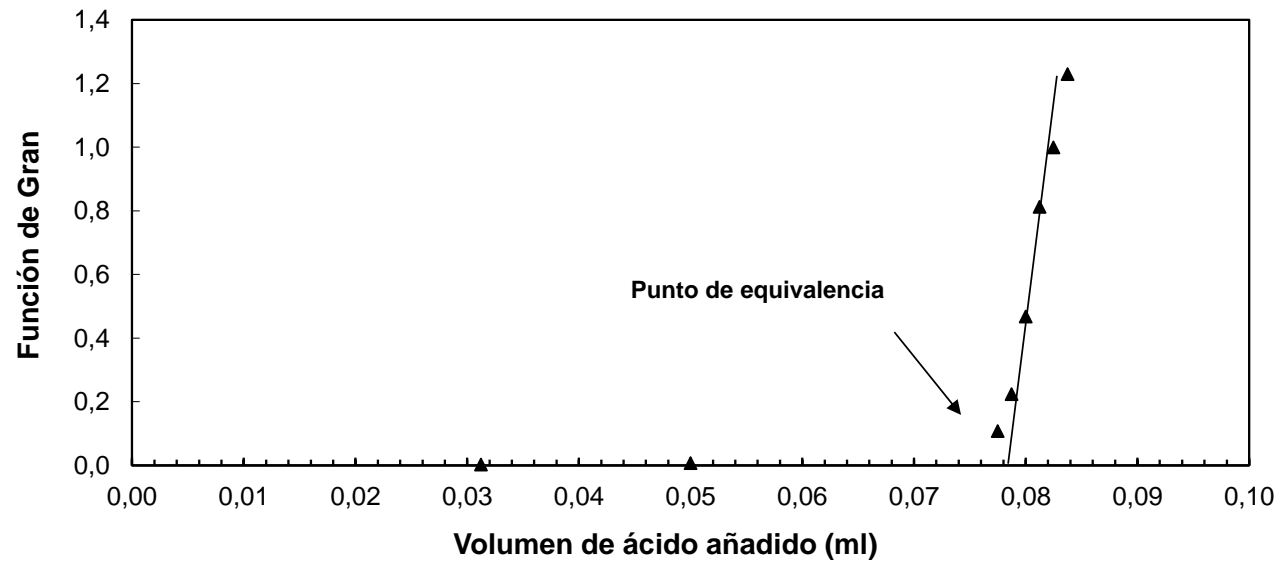
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,41	0,03125	0,00195
5,88	0,05000	0,00660
4,67	0,07750	0,10706
4,35	0,07875	0,22369
4,03	0,08000	0,46737
3,79	0,08125	0,81222
3,70	0,08250	0,99928
3,61	0,08375	1,22 941

MUESTRA 29-2010 NACIMIENTO

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,0785 ml
Alcalinidad Tot.=	125,60 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	153,23 mg/l

Titulación de Gran



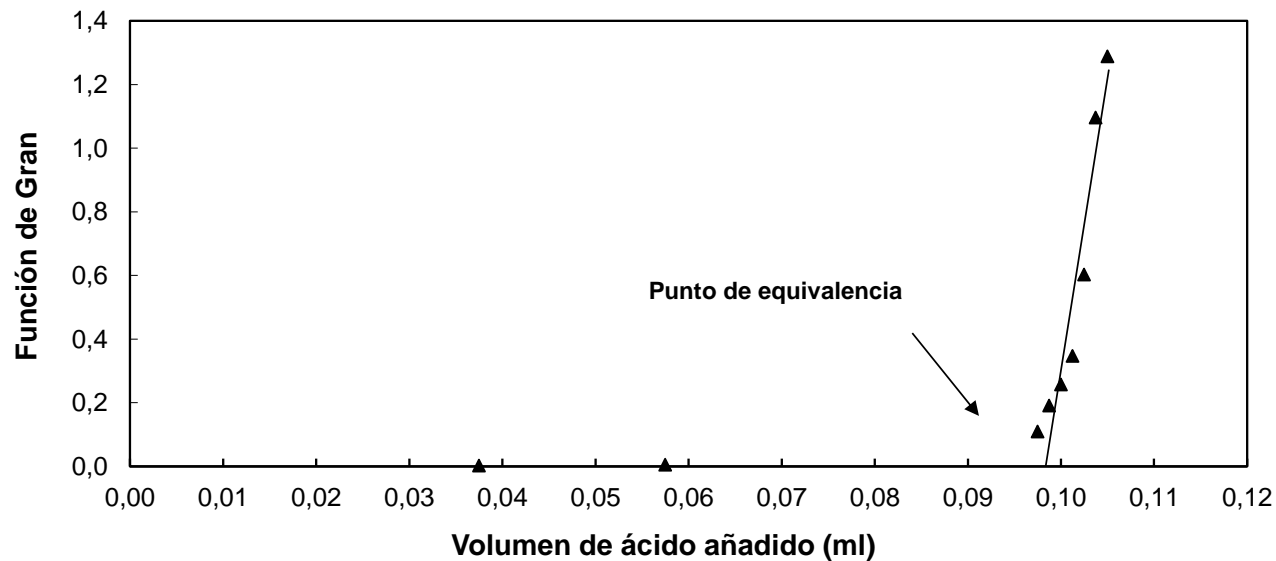
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,39	0,03750	0,00204
5,97	0,05750	0,00536
4,66	0,09750	0,10960
4,42	0,09875	0,19047
4,29	0,10000	0,25694
4,16	0,10125	0,34662
3,92	0,10250	0,60236
3,66	0,10375	1,09615
3,59	0,10500	1,28790

MUESTRA 31-2010 EX-HACIENDA DE JESÚS

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,098 ml
Alcalinidad Tot.=	156,80 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	191,30 mg/l

Titulación de Gran



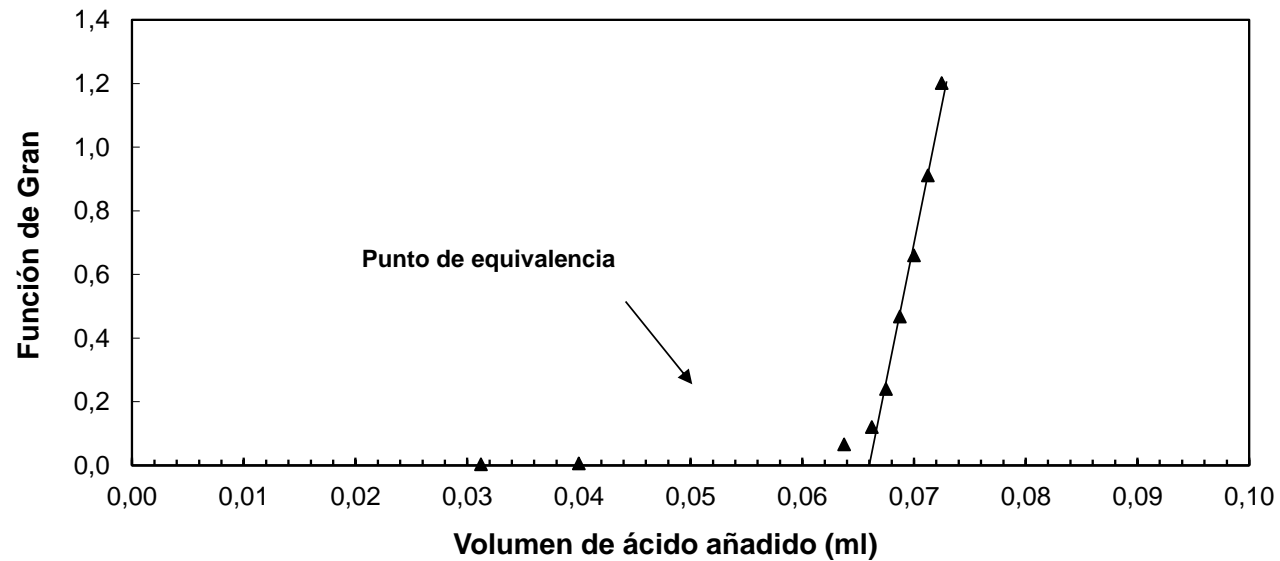
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,16	0,03125	0,00346
5,95	0,04000	0,00561
4,88	0,06375	0,06600
4,62	0,06625	0,12010
4,32	0,06750	0,23964
4,03	0,06875	0,46727
3,88	0,07000	0,66005
3,74	0,07125	0,91115
3,62	0,07250	1,20116

MUESTRA 34-2010 POZO 2 SAN MIGUEL (pSMI2)

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,066 ml
Alcalinidad Tot.=	105,60 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	128,83 mg/l

Titulación de Gran



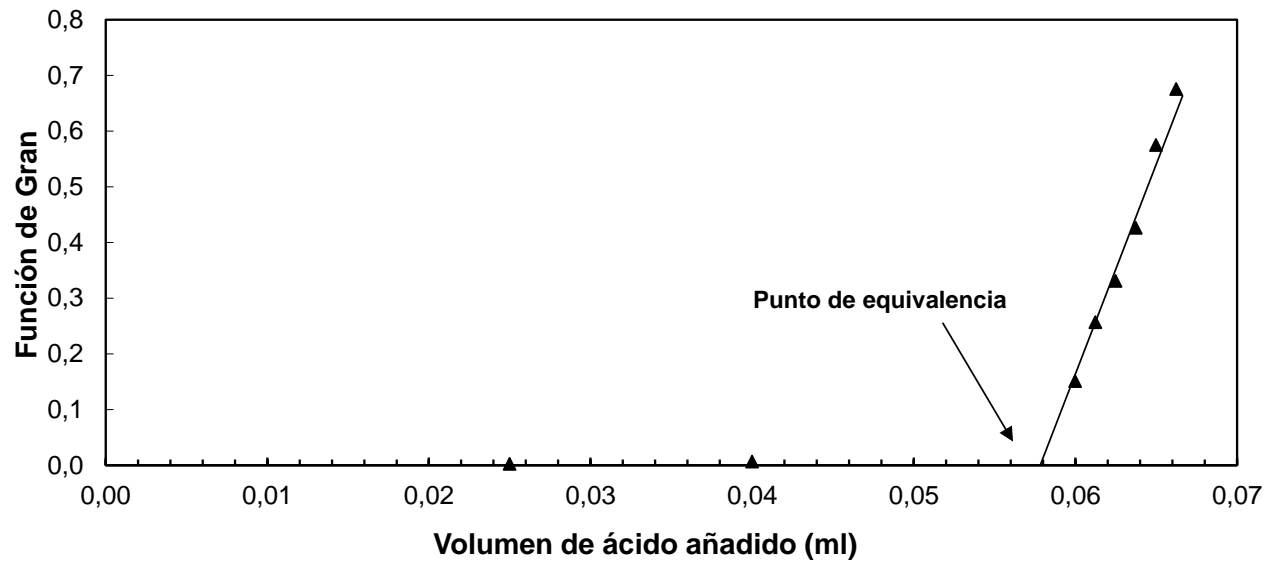
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,30	0,02500	0,00251
5,88	0,04000	0,00660
4,52	0,06000	0,15118
4,29	0,06125	0,25674
4,18	0,06250	0,33076
4,07	0,06375	0,42611
3,94	0,06500	0,57482
3,87	0,06625	0,67538

MUESTRA 36-2010 OBRAJE

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,058 ml
Alcalinidad Tot.=	92,80 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	113,22 mg/l

Titulación de Gran



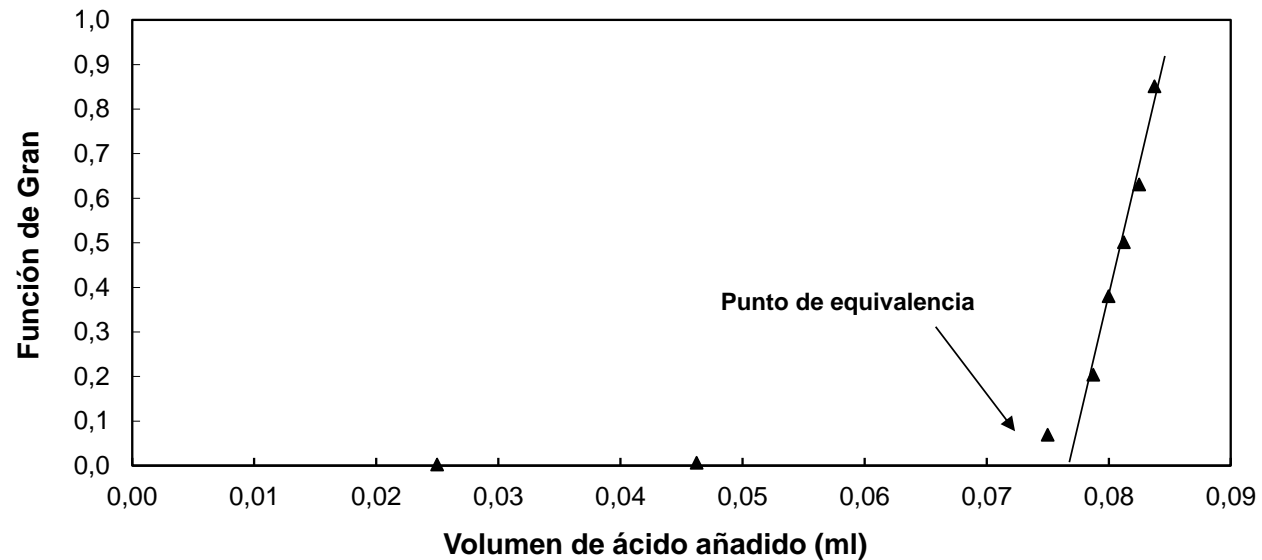
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,35	0,02500	0,00223
5,93	0,04625	0,00588
4,86	0,07500	0,06912
4,39	0,07875	0,20401
4,12	0,08000	0,37990
4,00	0,08125	0,50081
3,90	0,08250	0,63050
3,77	0,08375	0,85054

MUESTRA 44-2010 NIGROMANTE

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,0766 ml
Alcalinidad Tot.=	122,56 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	149,52 mg/l

Titulación de Gran



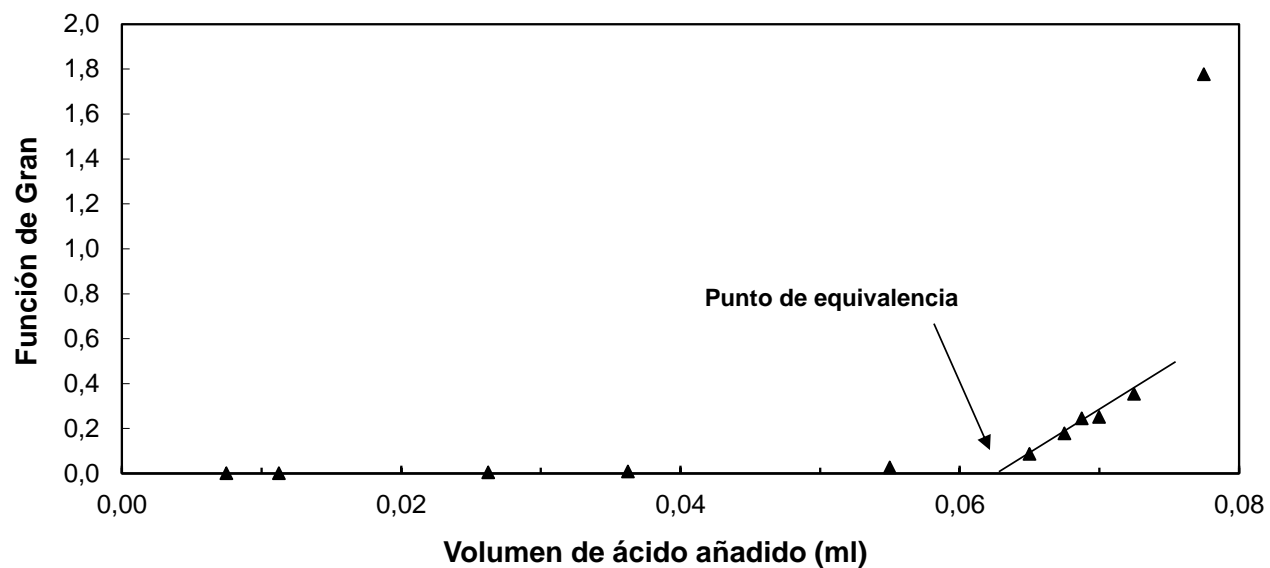
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,91	0,00750	0,00062
6,78	0,01125	0,00083
6,04	0,02625	0,00456
5,76	0,03625	0,00870
5,27	0,05500	0,02688
4,76	0,06500	0,08700
4,45	0,06750	0,17765
4,31	0,06875	0,24523
4,30	0,07000	0,25094
4,15	0,07250	0,35449
3,45	0,07750	1,77682

MUESTRA 56-2010 POZO 4

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,067 ml
Alcalinidad Tot.=	107,20 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	130,78 mg/l

Titulación de Gran



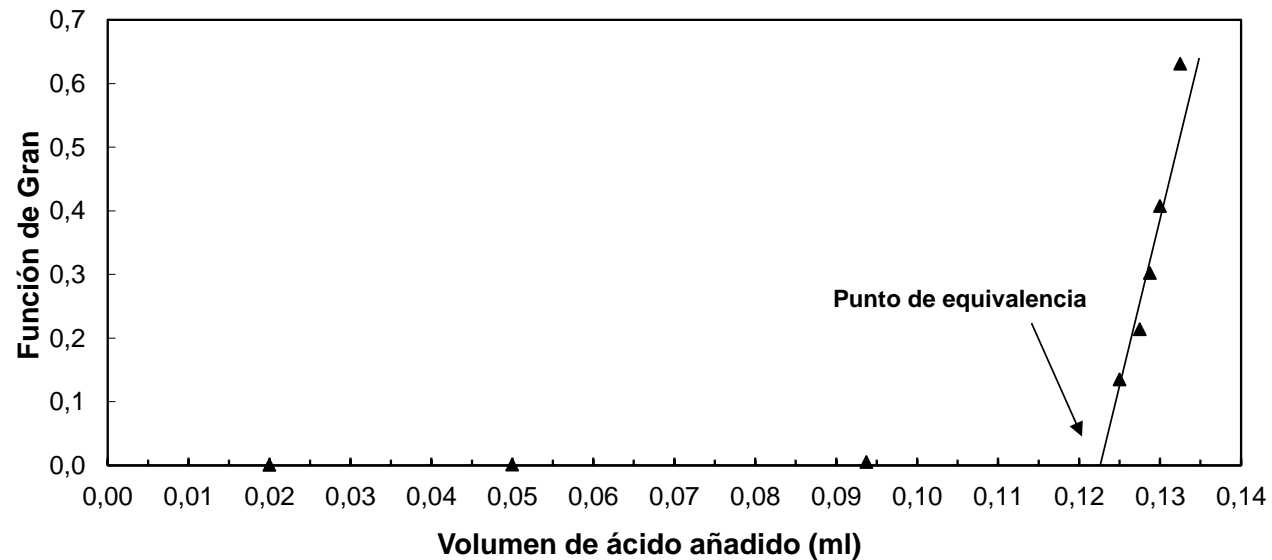
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
7,00	0,02000	0,00050
6,57	0,05000	0,00135
5,97	0,09375	0,00537
4,57	0,12500	0,13491
4,37	0,12750	0,21383
4,22	0,12875	0,30206
4,09	0,13000	0,40747
3,90	0,13250	0,63113

MUESTRA 58-2010 POZO 9

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,1225 ml
Alcalinidad Tot.=	196,00 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	239,12 mg/l

Titulación de Gran



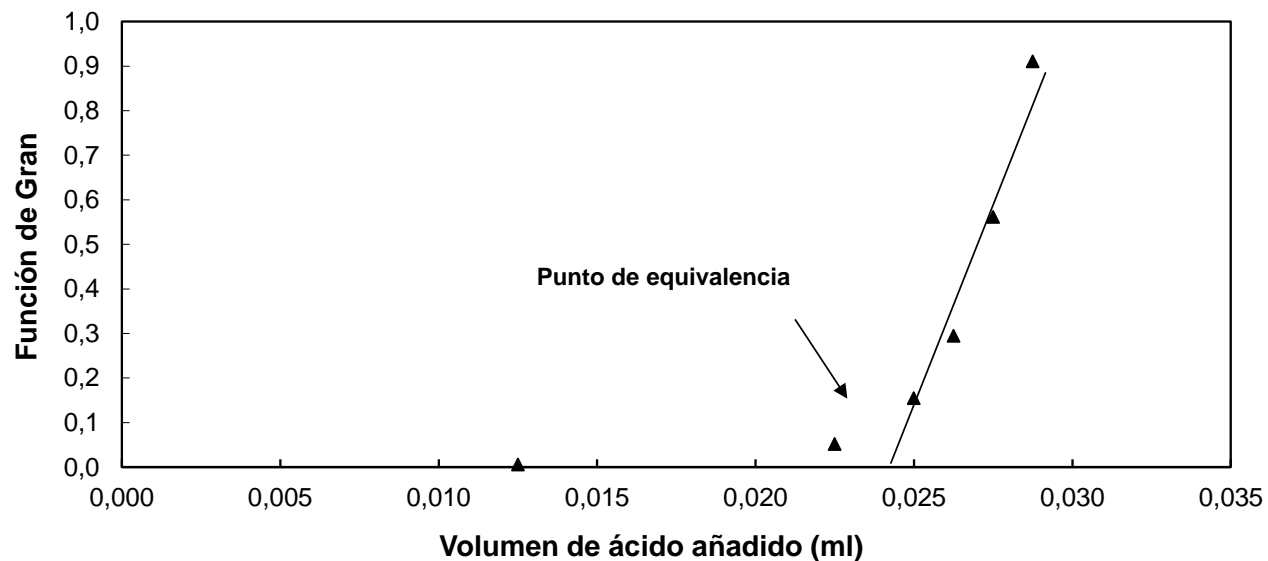
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

MUESTRA 63-2010 LOS YAÑEZ

pH	V H₂SO₄ añadido	Función de Gran
5,96	0,01250	0,00548
4,99	0,02250	0,05119
4,51	0,02500	0,15459
4,23	0,02625	0,29458
3,95	0,02750	0,56132
3,74	0,02875	0,91037

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO₄=	1,6
P. Equivalencia=	0,0242 ml
Alcalinidad Tot.=	38,72 mg/l CaCO₃
HCO₃=	47,24 mg/l

Titulación de Gran



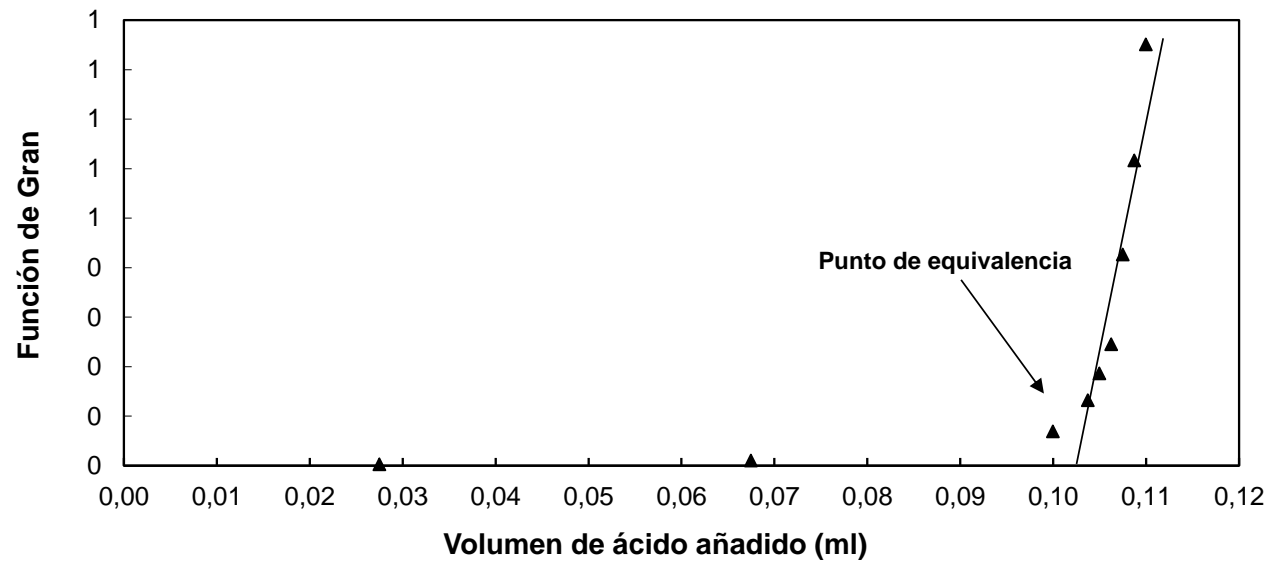
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,30	0,02750	0,00251
5,70	0,06750	0,00999
4,86	0,10000	0,06916
4,58	0,10375	0,13179
4,43	0,10500	0,18616
4,31	0,10625	0,24541
4,07	0,10750	0,42648
3,91	0,10875	0,61647
3,77	0,11000	0,85099

MUESTRA 64-2010 CORRAL BLANCO

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,102 ml
Alcalinidad Tot.=	163,20 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	199,10 mg/l

Titulación de Gran



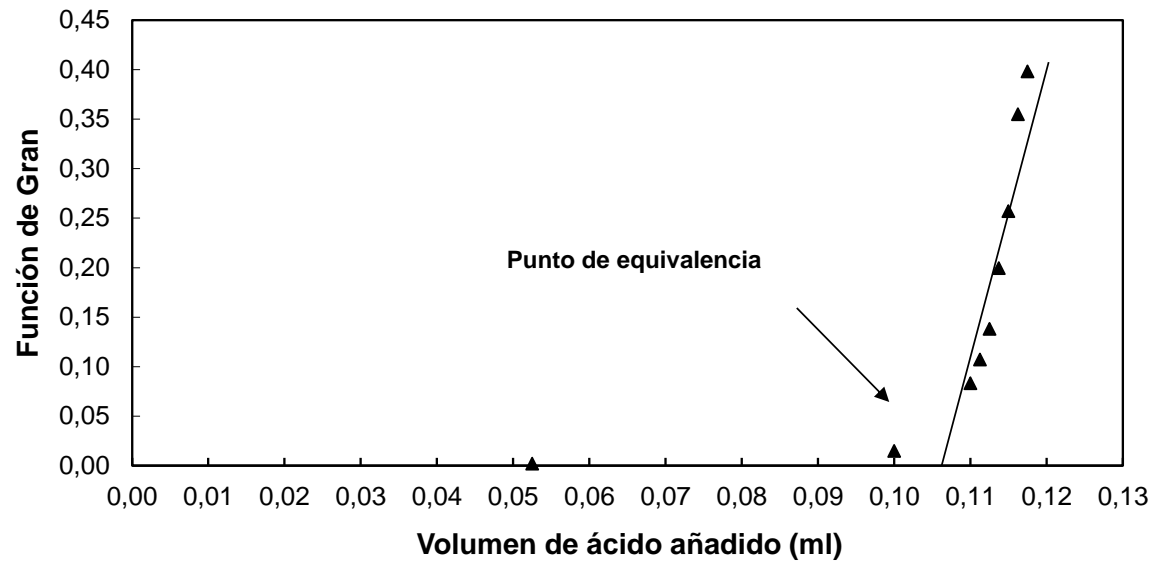
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,46	0,05250	0,00174
5,53	0,10000	0,01479
4,78	0,11000	0,08316
4,67	0,11125	0,10714
4,56	0,11250	0,13802
4,40	0,11375	0,19951
4,29	0,11500	0,25702
4,15	0,11625	0,35480
4,10	0,11750	0,39810

MUESTRA 68-2010 BELÉN DEL REFUGIO

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,107 ml
Alcalinidad Tot.=	171,20 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	208,86 mg/l

Titulación de Gran



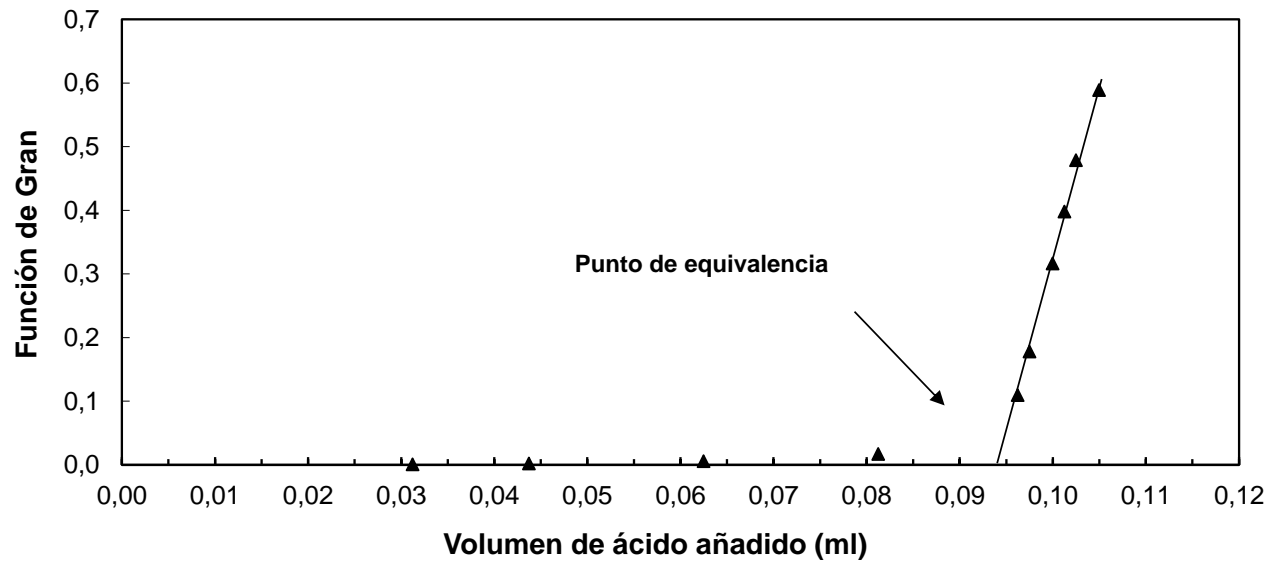
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,76	0,03125	0,00087
6,44	0,04375	0,00182
5,95	0,06250	0,00562
5,47	0,08125	0,01697
4,66	0,09625	0,10960
4,45	0,09750	0,17775
4,20	0,10000	0,31611
4,10	0,10125	0,39797
4,02	0,10250	0,47848
3,93	0,10500	0,58868

MUESTRA 69-2010 ORNELAS

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,094 ml
Alcalinidad Tot.=	150,40 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	183,49 mg/l

Titulación de Gran



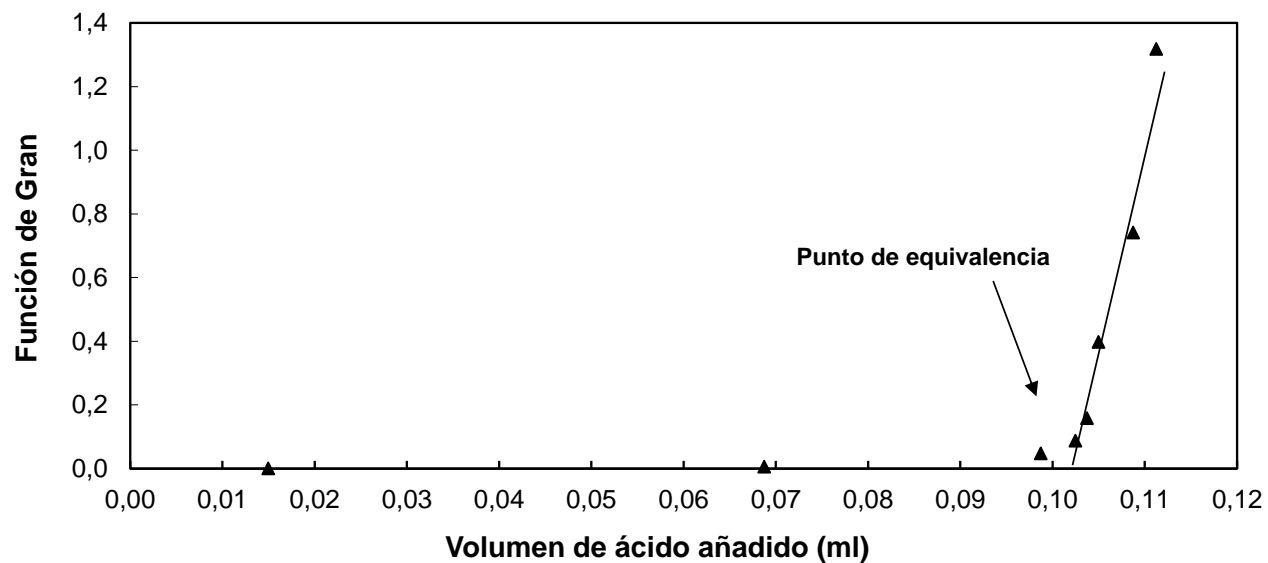
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,78	0,01500	0,00083
5,91	0,06875	0,00616
5,02	0,09875	0,04784
4,76	0,10250	0,08707
4,50	0,10375	0,15844
4,10	0,10500	0,39800
3,83	0,10875	0,74116
3,58	0,11125	1,31806

MUESTRA 76-2010 ACOSTA

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,102 ml
Alcalinidad Tot.=	163,20 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	199,10 mg/l

Titulación de Gran



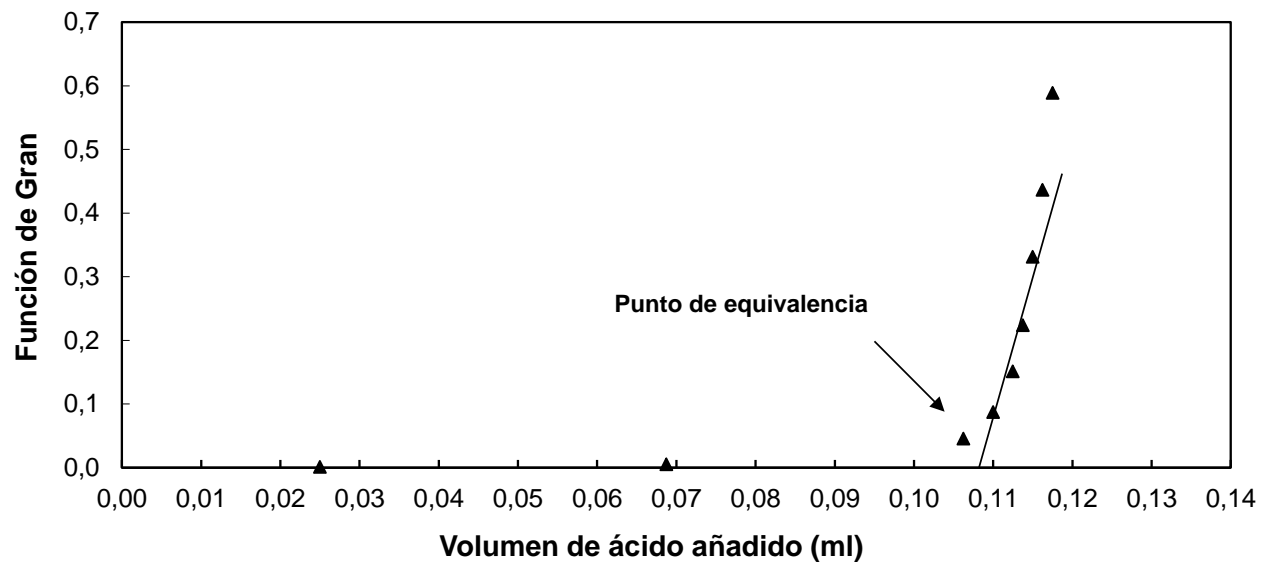
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,60	0,02500	0,00126
5,98	0,06875	0,00524
5,04	0,10625	0,04570
4,76	0,11000	0,08708
4,52	0,11250	0,15134
4,35	0,11375	0,22385
4,18	0,11500	0,33111
4,06	0,11625	0,43649
3,93	0,11750	0,58883

MUESTRA 80-2010 LUIS MOYA

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,104 ml
Alcalinidad Tot.=	166,40 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	203,01 mg/l

Titulación de Gran



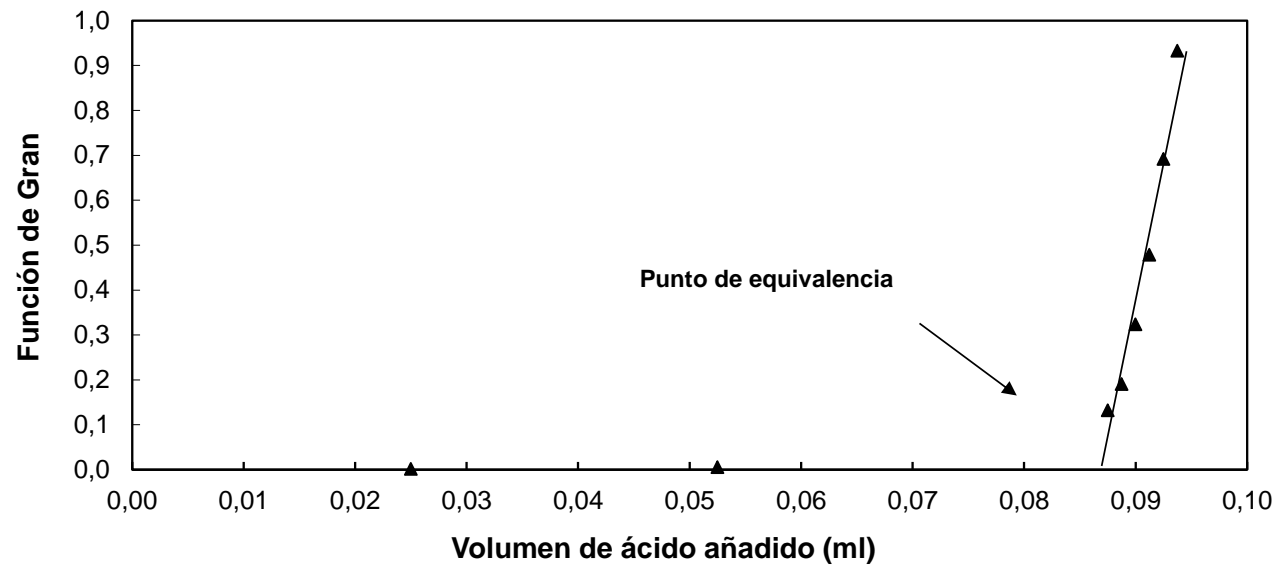
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,46	0,02500	0,00173
5,98	0,05250	0,00524
4,58	0,08750	0,13174
4,42	0,08875	0,19043
4,19	0,09000	0,32341
4,02	0,09125	0,47837
3,86	0,09250	0,69147
3,73	0,09375	0,93279

MUESTRA 88-2010 OJUELOS

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,087 ml
Alcalinidad Tot.=	139,20 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	169,82 mg/l

Titulación de Gran



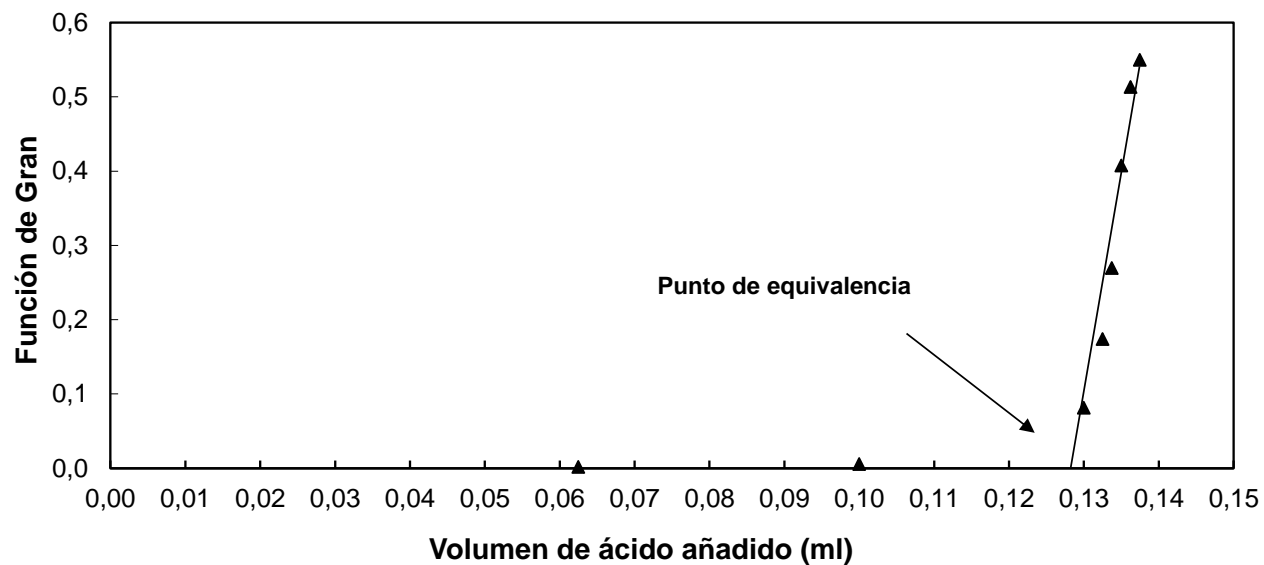
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,45	0,06250	0,00178
5,95	0,10000	0,00562
4,79	0,13000	0,08130
4,46	0,13250	0,17383
4,27	0,13375	0,26923
4,09	0,13500	0,40751
3,99	0,13625	0,51304
3,96	0,13750	0,54975

MUESTRA 99-2010 OJO CALIENTE

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,128 ml
Alcalinidad Tot.=	204,80 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	249,86 mg/l

Titulación de Gran



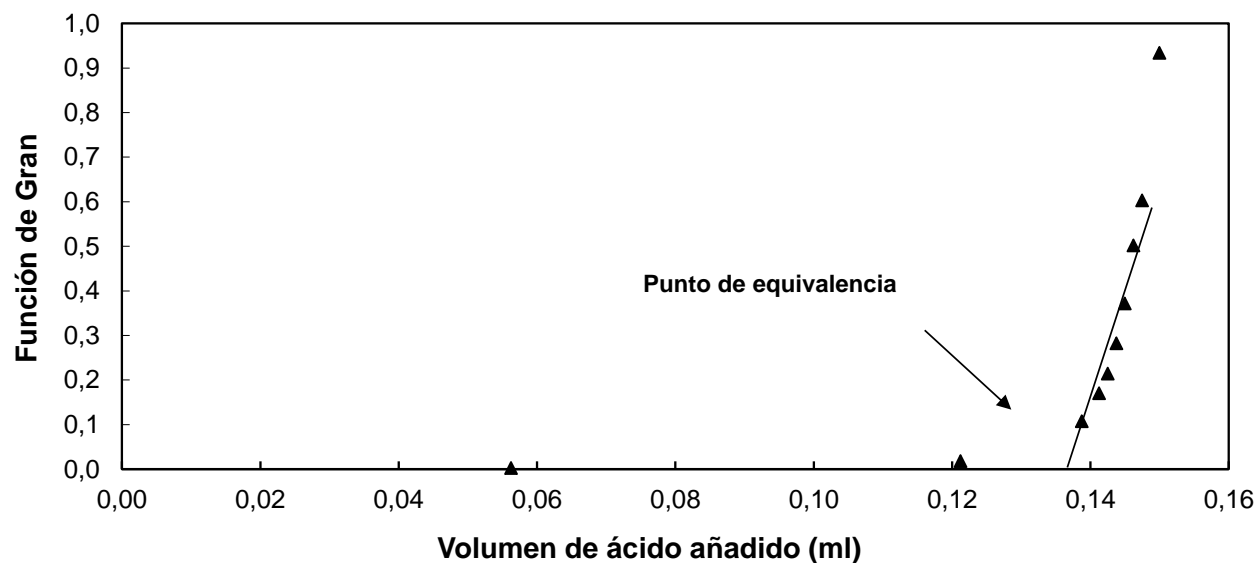
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,38	0,05625	0,00209
5,45	0,12125	0,01778
4,67	0,13875	0,10719
4,47	0,14125	0,16990
4,37	0,14250	0,21390
4,25	0,14375	0,28198
4,13	0,14500	0,37173
4,00	0,14625	0,50146
3,92	0,14750	0,60291
3,73	0,15000	0,93384

MUESTRA 102-2010 EL TULE

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,136 ml
Alcalinidad Tot.=	217,60 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	265,47 mg/l

Titulación de Gran



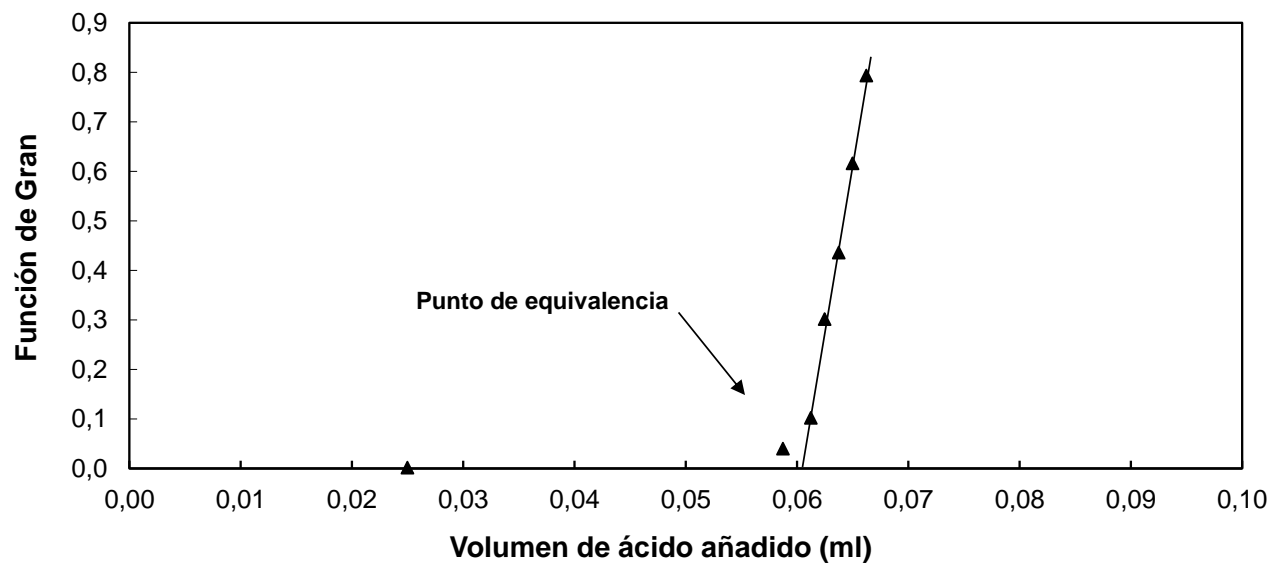
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

MUESTRA 123-2010 (ZA-1171)

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,49	0,02500	0,00162
5,10	0,05875	0,03976
4,69	0,06125	0,10221
4,22	0,06250	0,30166
4,06	0,06375	0,43604
3,91	0,06500	0,61593
3,80	0,06625	0,79350

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,061 ml
Alcalinidad Tot.=	97,60 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	119,07 mg/l

Titulación de Gran



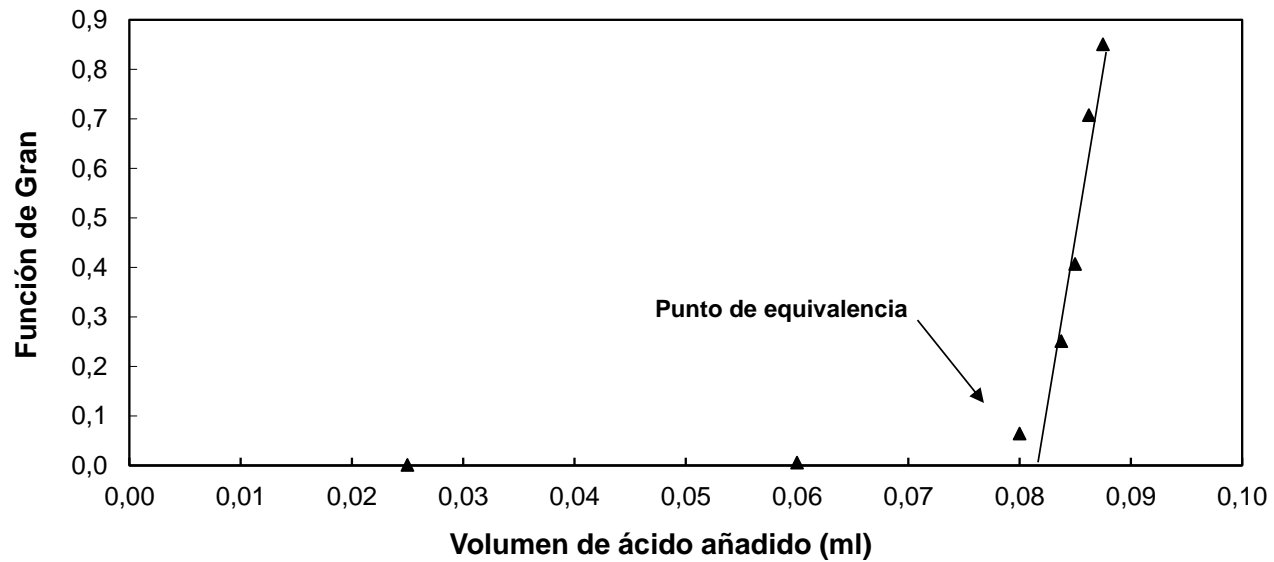
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

MUESTRA 132-2010 SAN JUANICO

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,70	0,02500	0,00100
5,94	0,06000	0,00575
4,89	0,08000	0,06452
4,30	0,08375	0,25101
4,09	0,08500	0,40711
3,85	0,08625	0,70749
3,77	0,08750	0,85061

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,082 ml
Alcalinidad Tot.=	131,20 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	160,06 mg/l

Titulación de Gran



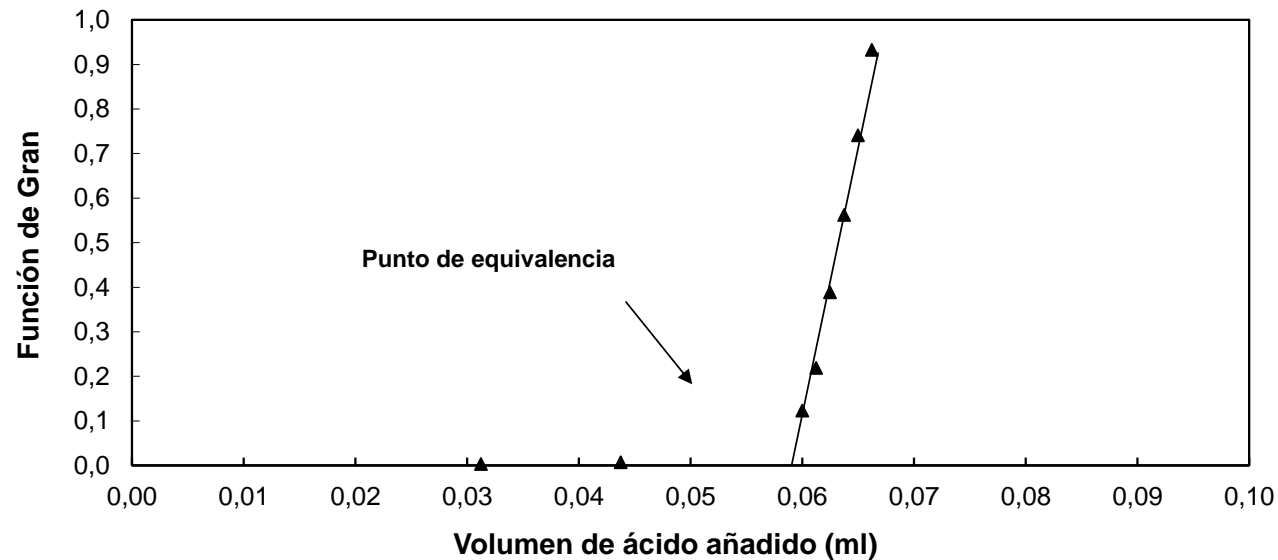
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,24	0,03125	0,00288
5,87	0,04375	0,00675
4,61	0,06000	0,12288
4,36	0,06125	0,21853
4,11	0,06250	0,38861
3,95	0,06375	0,56172
3,83	0,06500	0,74052
3,73	0,06625	0,93228

MUESTRA 137-2010 CANDIDO NAVARRO

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,059 ml
Alcalinidad Tot.=	94,40 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	115,17 mg/l

Titulación de Gran



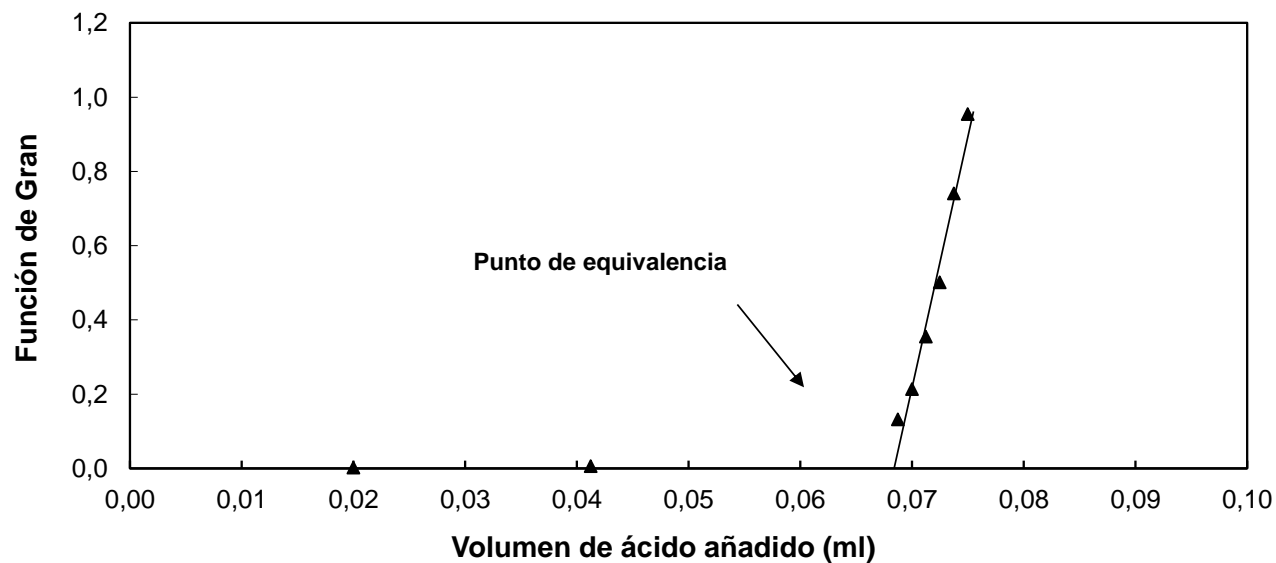
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6,46	0,02000	0,00173
5,91	0,04125	0,00616
4,58	0,06875	0,13169
4,37	0,07000	0,21359
4,15	0,07125	0,35448
4,00	0,07250	0,50073
3,83	0,07375	0,74065
3,72	0,07500	0,95416

MUESTRA 144-2010 LOS JASOS

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	1,6
P. Equivalencia=	0,0685 ml
Alcalinidad Tot.=	109,60 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	133,71 mg/l

Titulación de Gran



ANEXO 4.

DATOS

FISICOQUÍMICOS DE

LAS MUESTRAS DE

AGUA SUBTERRÁNEA

DATOS 1999

Símbolo Unidad	Temp °C	pH	Cond μS/cm	STD mg/l	Na mg/l	Li mg/l	Mg mg/l	Al mg/l	Si mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l	As mg/l	Sr mg/l	Hg mg/l	F mg/l	Cl mg/l	HCO ₃ mg/l	NO ₃ (as N) mg/l	NO ₃ mg/l	PO ₄ (as P) mg/l	SO ₄ mg/l	Error %
125 Presa San José	18,7	9,01	183	86	7,5	0,01	4,890	0,016	8,5	10,20	16,8	0,0589	0,0153	0,0134	0,1297		0,68	12,33	20,39	0,70	3,10	0,03	69	-7,4
126 Milpillas (ZA-393)	25,2	7,59	426	200	42,4	0,03	1,830	0,005	29,8	17,90	45,0	0,0004	0,0187	0,0049	0,2874		0,63	33,91	211,32	5,60	24,81	0,08	50	-7,5
127 Granja PILGRIM	23,4	7,05	212	100	16,6	0,01	2,600	0,007	39,1	13,40	29,6	0,0017	0,0179	0,0064	0,1452		0,44	16,95	108,38	3,00	13,29	0,13	22	0,8
128 Colonia El Paseo	28,8	7,57	264	122	26,1	0,04	1,900	0,006	37,2	14,50	27,0	0,0004	0,0077	0,0085	0,1095		0,62	16,95	128,77	2,30	10,19	0,06	24	-1,3
129 Col. Del Llano	29,3	7,73	289	135	32,4	0,03	1,670	0,009	36,1	14,50	31,1	0,0006	0,0059	0,0119	0,1859		0,73	18,49	164,44	2,00	8,86	0,05	23	-3,1
130 Mercado Rep.	26,5	6,84	177	83	20,9	0,02	2,940	0,008	37,1	14,00	15,6	0,0013	0,0149	0,0065	0,1210		0,52	18,49	100,62	2,70	11,96	0,17	18	-5,3
131 Polvillo-Morales	28,0	7,09	207	97	31,5	0,08	1,100	0,007	38,1	8,79	13,6	0,0004	0,0115	0,0094	0,0503		1,38	15,41	91,74	1,70	7,53	0,21	33	-5,2
132 San Juanico G y C	32,1	7,46	303	142	48,5	0,11	0,588	0,027	29,2	9,07	28,0	0,0038	0,0067	0,0136	0,1359		1,38	16,95	176,68	2,40	10,63	0,06	36	-4,2
133 Salazar	32,0	7,40	291	136	59,1	0,20	0,267	0,009	24,2	4,54	22,0	0,0017	0,0101	0,0138	0,0620		2,41	16,95	164,79	2,10	9,30	0,03	31	-0,2
134 Nicolás Zapata	34,1	7,39	304	142	62,7	0,21	0,492	0,010	25,6	5,84	22,1	0,0005	0,0033	0,0143	0,0748		2,58	16,95	169,89	2,50	11,08	0,03	35	0,4
135 Simón Díaz	35,1	7,55	307	144	52,0	0,15	0,476	0,007	21,1	6,19	18,9	0,0004	0,0024	0,0142	0,0564		2,60	20,03	161,00	2,10	9,30	0,11	33	-6,7
136 Ciudad 2000	33,5	7,60	275	129	35,5	0,11	0,179	0,007	18,5	3,26	12,8	0,0004	0,0238	0,0090	0,0281		2,05	12,33	149,50	2,20	9,75	0,05	21	-17,3
137 Candido Navarro	26,5	8,01	209	99	12,9	0,02	1,120	0,004	34,5	9,71	26,7	0,0003	0,0015	0,0138	0,0974		0,57	9,24	110,69	1,60	7,09	0,06	4	1,8
138 La Pila	34,7	7,02	252	118	32,0	0,10	0,656	0,004	31,9	8,23	16,1	0,0003	0,0010	0,0060	0,0776		1,04	15,41	120,75	1,50	6,65	0,12	24	-8,4
139 Villa de Zaragoza	34,9	7,94	389	179	57,1	0,15	0,199	0,007	22,7	4,54	29,0	0,0005		0,0120	0,0589		1,45	49,32	143,05	2,80	12,40	0,06	55	-9,1
140 Villa de Zaragoza	35,2	7,93	289	135	41,4	0,12	0,108	0,012	20,0	2,97	18,8	0,0003	0,0043	0,0131	0,0271		1,53	23,12	152,90	1,80	7,97	0,08	32	-15,0
141 Villa de Pozos	33,7	7,52	226	107	41,2	0,10	0,494	0,010	36,9	5,61	16,7	0,0007	0,0033	0,0145	0,0269		1,31	16,95	120,75	1,90	8,42	0,15	19	-0,8
142 Granja Florida	30,2	7,84	356	166	47,6	0,13	0,298	0,005	27,8	6,82	46,4	0,0005	0,0055	0,0094	0,0999		0,73	38,53	146,11	2,60	11,52	0,07	62	-2,0
143 Santa Rita	32,6	7,77	312	147	53,5	0,11	1,310	0,008	34,1	12,20	29,7	0,0005	0,0032	0,0252	0,1005		1,39	13,87	173,29	2,20	9,75	0,07	34	3,6
144 Los Jasos	28,0	7,69	428	200	59,6	0,15	0,360	0,004	29,2	7,91	72,2	0,0002	0,0007	0,0127	0,1088		0,77	33,91	161,00	2,40	10,63	0,04	175	-5,9
145 P. de la Hacienda	26,1	7,61	195	90	21,1	0,02	1,880	0,008	44,4	13,90	24,7	0,0044	0,0075	0,0046	0,0824		0,45	15,41	121,98	1,40	6,20	0,07	14	-1,2

DATOS 2010

Símbolo Unidad	Temp °C	pH	Cond µS/cm	STD mg/l	Na mg/l	Li mg/l	Mg mg/l	Al mg/l	Si mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l	As mg/l	Sr mg/l	Hg mg/l	F mg/l	Cl mg/l	HCO ₃ mg/l	NO ₃ (as N) mg/l	NO ₃ mg/l	PO ₄ (as P) mg/l	SO ₄ mg/l	Error %
Límite de detección					0,1	0,05	0,001	0,002	0,2	0,1	0,1	0,0001	0,0005	0,03	0,01	0,0002	0,01	0,03		0,01		0,02	0,03	
29 Nacimiento	48,3	7,83	450	324,3	72,1	0,11	0,025	0,013	29,7	1,30	10,3	0,0005	0,0159	0,0117	0,0313	0,0123	2,59	4,82	153,23	1,06	4,70	< 0,02	15,5	9,5
31 Ex-Hacienda	49,1	8,05	761	509,7	152,0	0,37	0,066	0,020	35,5	1,93	5,4	0,0008	0,0076	0,0685	0,0517	0,0109	14,90	24,60	191,30	0,84	3,72	< 0,04	43,9	18,1
34 pSMI2-19-X	37,3	8,03	335	287,7	65,5	0,15	0,027	0,022	29,4	1,11	6,3	0,0004	0,0032	0,0130	0,0041	0,0122	1,88	7,07	128,83	0,51	2,26	0,26	15,3	9,0
36 NZAC-20X	20,5	7,82	468	401,0	31,1	0,01	5,320	0,011	40,0	21,40	44,3	0,0006	0,0151	0,0087	0,3100	0,0152	0,99	5,35	113,22	9,32	41,29	0,03	57,2	8,2
44 P-NIG-22-X	27,4	7,39	584	438,6	59,1	0,03	5,190	0,008	35,9	21,60	37,6	0,0006	0,0072	0,0111	0,2700	0,0134	1,64	38,20	149,52	2,46	10,90	< 0,04	42,1	8,5
56 Pozo 4	46,3	8,14	62	545,7	154,0	0,23	0,188	0,017	20,7	1,91	6,2	0,0009	0,0272	0,0355	0,0672	0,0096	4,74	25,20	130,78	0,84	3,72	< 0,04	177	3,4
58 Pozo 9	24,8	7,23	407	435,6	30,4	0,09	4,090	0,007	50,8	1,64	50,4	0,0005	0,0425	0,0040	0,1780	0,0195	1,75	1,42	239,12	0,87	3,85	< 0,02	0,94	2,2
63 Los Yañez	32,0	6,58	105	143,3	14,0	0,03	0,125	0,016	35,2	2,63	3,2	0,0005	0,0115	0,0035	0,0153	0,0116	0,96	1,05	47,24	0,43	1,90	< 0,02	1,71	-1,4
64 Corral Blanco	24,4	7,54	371	401,6	21,1	0,11	4,360	0,019	53,3	12,80	41,8	0,0004	0,0254	0,0079	0,3300	0,0132	3,90	2,61	199,10	0,93	4,12	< 0,02	4,6	2,7
68 Belén del Refugio	23,0	7,83	392	439,6	51,4	0,37	5,570	0,009	53,0	11,00	23,7	0,0004	0,0142	0,0166	1,0600	0,0121	5,97	5,26	208,86	1,27	5,63	< 0,02	14,6	2,4
69 Ornelas	29,6	8,48	1261	1103,0	247,0	0,60	0,403	0,027	47,2	5,18	35,6	0,0010	0,0044	0,3600	0,4300	0,0076	20,20	13,00	183,49	<0,04	<0,1772	< 0,08	502	-4,3
76 Acosta	35,5	7,92	530	428,7	96,5	0,27	1,180	<0,002	29,0	2,76	12,4	<0,0001	0,0036	0,0162	0,1590	0,0009	4,09	9,04	199,10	1,10	4,87	< 0,04	40,2	5,8
80 Luis Moya	26,7	7,21	523	446,5	72,0	0,28	2,580	0,023	27,6	13,20	32,9	0,0006	0,0115	0,1150	0,1740	0,0127	2,99	12,50	203,01	2,01	8,90	< 0,04	42,3	6,2
88 Ojuelos	38,3	7,14	587	412,2	59,3	0,11	2,000	0,024	30,6	17,10	36,1	0,0003	0,0069	0,0150	0,2200	0,0127	3,29	16,50	169,82	1,61	7,13	< 0,04	39,1	8,8
99 P-OCA	27,6	7,42	487	443,6	50,2	0,13	5,320	0,009	13,1	7,95	40,4	0,0003	0,0078	0,1130	0,3800	0,0117	3,71	12,40	249,86	2,77	12,27	< 0,04	34,4	-5,1
101 Salinas	18,1	9,65			47300	<0,1	0,333	<0,2	<20	3950	<70	<0,01	0,0759	15,1000	0,1730	<0,02	<5	48100		<5	<22,1	12,3	19500	
102 Tule	25,2	7,58	880	676,8	152,0	0,09	8,720	0,004	12,3	4,11	19,8	0,0003	0,0058	0,0195	0,8000	0,0119	1,15	45,70	265,47	2,73	12,09	< 0,06	141	-2,0
123 ZA-1171	24,0	7,36	261	282,4	14,0	0,01	1,180	0,004	42,9	8,81	25,9	0,0004	0,0055	0,0121	0,0958	0,0140	0,52	11,10	119,07	1,40	6,20	< 0,02	9,2	-6,9
132 San Juanico G y C	33,5	7,33	407	350,4	54,7	0,10	0,216	0,012	31,1	4,63	23,9	0,0007	0,0832	0,0132	0,0843	0,0160	2,31	10,10	160,06	1,44	6,38	< 0,02	25,3	2,4
137 Candido Navarro	27,3	7,67	268	265,9	11,0	0,02	0,919	0,004	41,6	8,47	27,8	0,0003	0,0028	0,0142	0,0947	0,0152	0,54	6,21	115,17	1,29	5,71	< 0,02	6,46	-2,9
144 Los Jasos	28,6	7,46	596	455,2	52,7	0,11	0,207	0,019	29,0	5,82	61,2	0,0003	0,0069	0,0111	0,0892	0,0118	1,05	28,60	133,71	2,08	9,21	< 0,04	104	1,9

ANEXO 5.

CALIDAD DEL AGUA

Parámetro	Límite permisible	Muestra no potable	Valor obtenido
pH	6.5 - 8.5	101-2010 Salinas	9.65
		1 Villa de Reyes	6.26
		28 Caja de Agua Nuevo	6.48
		41 MPIN21X99	5.94
		87 Ciénega de Mata	5.81
		35 pR-Pin-20-X	9.12
		57 Peña del Halcón	8.70
		59 Labor de Montoya	8.63
		62 Pozo 4	8.70
		69 Ornelas	8.61
		101 Salinas	9.80
		125 Presa San José	9.01
		STD	1,000 mg/l
101-2010 Salinas	>110,000		
58 Pozo 9	1190		
90 Villa González	1135		
101 Salinas	236499		
Al	0.2 mg/l	35 pR-Pin-20-X	3.37
		43 L-NIG-22-X	1.68
As	0.05 mg/l	31-2010 Exhacienda	0.07
		69-2010 Ornelas	0.36
		80-2010 Luis Moya	0.12
		99-2010 P-OCA	0.11
		101-2010 Salinas	15.10
		29 Nacimiento	0.09
		30 Agua Clara	0.08
		57 Peña del Halcón	0.09
		58 Pozo 9	0.10
		59 Labor de Montoya	0.06
		61 Pozo 2	0.05
		62 Pozo 4	0.12
		69 Ornelas	0.31
		80 Luis Moya	0.10
		82 Tierra Blanca	0.07
		99 P-OCA	0.11
		100 P-PRIM I-II	0.06
		101 Salinas	22.50
102 Tule	0.07		
106 P-GUA4	0.05		
107 Lag. Guadalupe	0.05		
108 Lag. Guadalupe	0.05		
Cd	0.005 mg/l	101-2010 Salinas	0.032
		101 Salinas	0.013
Cl-	250 mg/l	101-2010 Salinas	48100
		101 Salinas	72692

Parámetro	Límite permisible	Muestra no potable	Valor obtenido
Fe	0.3 mg/l	35 pR-Pin-20-X	7.55
		43 L-NIG-22-X	0.90
		97 Noria de Ángeles	0.57
F-	1.5 mg/l	29-2010 Nacimiento	2.59
		31-2010 Exhacienda	14.90
		34-2010 pSMI2-19-X	1.88
		44-2010 P-NIG-22-X	1.64
		56-2010 Pozo 4	4.74
		58-2010 Pozo 9	1.75
		64-2010 Corral Blanco	3.90
		68-2010 Belén del Refugio	5.97
		69-2010 Ornelas	20.20
		76-2010 Acosta	4.09
		80-2010 Luis Moya	2.99
		88-2010 Ojuelos	3.29
		99-2010 P-OCA	3.71
		101-2010 Salinas	4.99
		132-2010 San Juanico G y C	2.31
		2 FOVISSTE	2.67
		3 San Angel	3.91
		4 Mezquital	3.94
		5 Las Dalias	3.56
		10 Zona Industrial	3.65
		11 P-30 Zona Termal	3.95
		12 P-28 Zona Termal	2.90
		13 P-24 Juan Sarabia	1.98
		14 San Vicente II	1.78
		17 P-8 CFE 8	1.83
		18 P-7 CFE-7	1.82
		20 P-2 CFE-2	1.85
		21 Prad. Del Maurel	1.78
		22 PSG-24 Rivera	3.62
		24 PSG-14 UPA	2.06
		28 Caja de Agua Nuevo	2.03
		30 Agua Clara	10.80
		31 Ex-Hacienda	1.80
34 pSMI2-19-X	1.64		
39 pPOL21-X-99	1.63		
47 P-PACH-23-X	1.78		
48 P-pACH-2B-23-X	1.77		
49 M-NDRAN23X99	1.54		
50 Cañada de Ricos	2.26		
51 La Higuera 3	2.85		
52 La Higuera 4	2.87		
53 La Higuera 7	2.92		

Parámetro	Límite permisible	Muestra no potable	Valor obtenido
		54 La Ladera	2.53
		55 Pozo 7	2.67
		56 Pozo 4	2.94
		57 Peña del Halcón	2.75
		58 Pozo 9	2.56
		59 Labor de Montoya	3.06
		60 Teocaltiche 3	2.54
		61 Pozo 2	3.71
		62 Pozo 4	15.70
		68 Belen del Refugio	5.47
		69 Ornelas	20.00
		70 San Sebastián	5.83
		71 La Cuadra	5.28
		72 Bajío	3.35
		73 Guerrero	4.03
		74 Jaralillo	3.42
		75 Sta. María de En M.	1.83
		76 Acosta	3.09
		77 Lagunita	2.30
		78 San Pedro	2.02
		79 Griegos	1.58
		80 Luis Moya	2.51
		81 Noria de Molinos	2.73
		86 Azulitos	1.81
		89 Paso El 40	1.83
		90 Villa González	2.29
		91 P-PRIM1-3	2.27
		92 Pozo Saladillo	2.07
		93 P-PRIMAI-II	2.13
		94 P-PRIM I-II	2.02
		95 P-CBTA	1.79
		96 Villa Hidalgo (Noria)	1.85
		97 Noria de Ángeles	1.53
		98 P-PRIMAI-II	2.15
		99 P-OCA	2.78
		100 P-PRIM I-II	1.94
		103 La Tinaja	1.76
		105 Pozo Gachupines	1.58
		106 P-GUA4	2.36
		107 Lag. Guadalupe	2.36
		108 Lag. Guadalupe	2.40
		110 Lag. Guadalupe	1.69
		117 Villas Morro	1.85
		124 Lomas III	3.32
		133 Salazar	2.41

Parámetro	Límite permisible	Muestra no potable	Valor obtenido
		134 Nicolás Zapata	2.58
		135 Simón Díaz	2.60
		136 Ciudad 2000	2.05
		140 Villa de Zaragoza	1.53
Mn	0.15 mg/l	35 pR-Pin-20-X	1.21
		43 L-NIG-22-X	0.19
Hg	0.001 mg/l	29-2010 Nacimiento	0.012
		31-2010 Exhacienda	0.011
		34-2010 pSMI2-19-X	0.012
		36-2010 NZAC-20X	0.015
		44-2010 P-NIG-22-X	0.013
		56-2010 Pozo 4	0.010
		58-2010 Pozo 9	0.020
		63-2010 Los Yañez	0.012
		64-2010 Corral Blanco	0.013
		68-2010 Belén del Refugio	0.012
		80-2010 Luis Moya	0.013
		88-2010 Ojuelos	0.013
		99-2010 P-OCA	0.012
		101-2010 Salinas	0.020
		102-2010 Tule	0.012
		123-2010 ZA-1171	0.014
		132-2010 San Juanico G y C	0.016
		137-2010 Candido Navarro	0.015
		144-2010 Los Jasos	0.012
		53 La Higuera 7	0.001
		55 Pozo 7	0.001
		56 Pozo 4	0.006
		57 Peña del Halcón	0.003
		58 Pozo 9	0.006
		59 Labor de Montoya	0.004
		60 Teocaltiche 3	0.002
		61 Pozo 2	0.002
		62 Pozo 4	0.002
		63 Los Yañez	0.003
		64 Corral Blanco	0.002
		66 San Elías	0.003
		67 Villa Hidalgo	0.002
		68 Belen del Refugio	0.002
		69 Ornelas	0.003
		70 San Sebastián	0.002
		72 Bajío	0.030
		73 Guerrero	0.002
		75 Sta. María de En M.	0.001
		77 Lagunita	0.001

Parámetro	Límite permisible	Muestra no potable	Valor obtenido
		78 San Pedro	0.001
		80 Luis Moya	0.008
		81 Noria de Molinos	0.003
		82 Tierra Blanca	0.002
		83 Loreto	0.001
		84 Loreto Zac.	0.001
		85 Villa García	0.002
		86 Azulitos	0.001
		87 Ciénega de Mata	0.003
		88 Ojuelos	0.002
		104 Gachupines (Noria)	0.001
		112 Pozo La Venta-2	0.003
		113 Agua Superficial	0.001
		114 Sn. Felipe	0.001
		115 Los Fresnos	0.001
		116 San Juanita	0.002
		117 Villas Morro	0.002
		118 Pedroza II	0.002
		119 La Constancia	0.002
		120 Hacienda Jaralito	0.002
		121 ZA-1183	0.003
		122 El Mezquite	0.002
Pb	0.025 mg/l	34 pSMI2-19-X	0.033
Na	200 mg/l	69-2010 Ornelas	247
		101-2010 Salinas	47300
		58 Pozo 9	275
		69 Ornelas	216
		90 Villa González	265
		101 Salinas	69200
SO4	400 mg/l	69-2010 Ornelas	502
		101-2010 Salinas	19500
		58 Pozo 9	500
		101 Salinas	28750
NO3 (como N)	10 mg/l	44 N-NIG2-22-X	14.6
		101 Salinas	10.3

ANEXO 6.

FACIES

HIDROQUÍMICAS

ID	Muestra	Facies hidroquímica	
		Manual	AQUACHEM
1	P17 CFE Villa de Reyes	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
2	P-100 FOVISSTE	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
3	P-74 San Angel	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
4	P-73 Mezquital	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
5	P-70 Las Dalías	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
6	P-69 Info Morales	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
7	P-67 Col. Jacarandas	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
8	P-64 Los Reyes	HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl
9	P-63 Col. Ind. Aviación	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
10	P-35 Zona Industrial	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
11	P-30 Zona Termal	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
12	P-28 Zona Termal	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
13	P-24 Juan Sarabia	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
14	P-18 P. San Vicente II	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
15	P-13 Abastos II	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
16	P-9 Prados Glorieta	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
17	P-8 CFE-8	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
18	P-7 CFE-7	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
19	P-5 Av. México	HCO3>Cl-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
20	P-2 CFE-2	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
21	Prad. Del Maurel (SG25)	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
22	PSG-24 Rivera	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
23	PSG-16 21 de Marzo	HCO3>Cl-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-Cl
24	PSG-14 UPA	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
25	Tlaxcala Paisanos	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
26	San Xavier	HCO3>SO4-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-SO4
27	P-83 Los Vargas	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HO3
28	P-42 Caja de Agua Nuevo	HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl
29	Nacimiento	HCO3-Na	Na-HCO3
30	Agua Clara	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4
31	Ex-Hacienda	HCO3-Na	Na-HCO3
32	p-sant-19-X	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
33	p-RDEL-19-X	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
34	pSMI2-19-X	HCO3-Na	Na-HCO3
35	pR-Pin-20-X	HCO3>SO4>Cl-Na>Ca	Ca-Na-K-HCO3-SO4
36	NZAC-20X	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
37	pPIN1-20-X	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
38	pCHIQ-20-X	HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl
39	pPOL21-X-99	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
40	p-ARR-21-X	HCO3>Cl>SO4-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-Cl-SO4
41	MPIN21X99	SO4>HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-SO4-HCO3-Cl
42	MPIN1,21-X-99	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4

ID	Muestra	Facies hidroquímica	
		Manual	AQUACHEM
43	L-NIG-22-X	HCO3-Ca>Na	Ca-HCO3
44	P-NIG-22-X	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
45	N-NIG1-22-X	HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl
46	N-NIG2-22-X	SO4>Cl>HCO3-Na>Ca	Na-Ca-SO4-Cl
47	P-PACH-23-X	HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl
48	P-pACH-2B-23-X	HCO3>SO4>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
49	M-NDRAN23X99	HCO3>SO4>Cl-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-SO4-Cl
50	Cañada de Ricos	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
51	La Higuera 3	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
52	La Higuera 4	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
53	La Higuera 7	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
54	La Ladera	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
55	Pozo 7	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
56	Pozo 4	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4
57	Peña del Halcón	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3
58	Pozo 9	SO4>HCO3-Na	Na-SO4-HCO3
59	Labor de Montoya	HCO3-Na	Na-HCO3
60	Teocaltiche 3	HCO3>SO4-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-SO4
61	Pozo 2	SO4>HCO3-Na>Ca	Na-Ca-SO4-HCO3
62	Pozo 4	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4
63	Los Yañez	HCO3-Na	Na-HCO3
64	Corral Blanco	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
65	El Alto	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
66	San Elías	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
67	Villa Hidalgo	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
68	Belem de Refugio	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
69	Ornelas	SO4>HCO3-Na	Na-SO4
70	San Sebastián	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4
71	La Cuadra	HCO3-Na	Na-HCO3
72	Bajío	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
73	Guerrera	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
74	Jaralillo	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
75	Sta. María de En M.	HCO3-Na	Ca-Na-HCO3
76	Acosta	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4
77	Lagunita	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
78	San Pedro	HCO3>SO4-Na>Ca>Mg	Na-Ca-Mg-HCO3-SO4
79	Griegos	HCO3>SO4-Na>Ca	Ca-Na-HCO3-SO4
80	Luis Moya	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
81	Noria de Molinos	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
82	Tierra Blanca	HCO3>SO4-Na>Ca	Ca-Na-HCO3-SO4
83	Loreto	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
84	Loreto Zac.	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4

ID	Muestra	Facies hidroquímica	
		Manual	AQUACHEM
85	Villa García	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
86	Azulitos	HCO3-Na	Na-HCO3
87	Ciénega de Mata	SO4>HCO3-Na>Ca	Na-Ca-SO4-HCO3
88	Ojuelos	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
89	Paso El 40	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
90	Villa González (P-GLEZ2)	SO4>HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-SO4-HCO3
91	P-PRIM1-3	SO4>HCO3-Na>Ca	Na-Ca-SO4-HCO3
92	Pozo Saladillo	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
93	P-PRIMAI-II	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
94	P-PRIM I-II	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
95	P-CBTA	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
96	Villa Hidalgo (Noria)	HCO3>Cl-Na>Ca	Ca-Na-HCO3-Cl
97	Noria de Ángeles	HCO3-Na>Mg>Ca	Na-Mg-Ca-HCO3
98	P-PRIMAI-II	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
99	P-OCA (Ojo Caliente)	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
100	P-PRIM I-II	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
101	Salinas	Cl>HCO3-Na	Na-Cl-HCO3
102	Tule	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4
103	La Tinaja	HCO3-Na	Na-HCO3
104	Gachupines (Noria)	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-K-HCO3-SO4
105	Pozo Gachupines	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
106	P-GUA4	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
107	Lag. Guadalupe	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-HCO3-SO4
108	Lag. Guadalupe	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
109	Lag. Guadalupe	HCO3-Na	Na-HCO3
110	Lag. Guadalupe	HCO3-Na	Na-HCO3
111	Pozo La Venta-1	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
112	Pozo La Venta-2	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
113	Agua superficial	HCO3>SO4-Na>Ca	Ca-Na-HCO3-SO4
114	Sn. Felipe (SG-02)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
115	Los Fresnos (SG-04)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
116	San Juanita (SG-22)	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl
117	Villas Morro (SG-27)	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
118	Pedroza II (P-66)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
119	La Constancia (SG-20)	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
120	Hacienda Jaralito	HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl
121	ZA-1183 (CNA-171)	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
122	El Mezquite (381A-ZA)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
123	Pozo (ZA-1171)	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
124	Lomas III (P-57)	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
125	Presa San José	SO4-Ca>Na>Mg	Ca-SO4
126	Milpillas (ZA-393)	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3

ID	Muestra	Facies hidroquímica	
		Manual	AQUACHEM
127	Granja PILGRIM	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
128	Colonia El Paseo	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
129	Col. Del Llano	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
130	Mercado Rep.	HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl
131	Polvillo-Morales	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-SO4
132	San Juanico G y C	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
133	Salazar	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
134	Nicolás Zapata	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
135	Simón Díaz	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
136	Ciudad 2000	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
137	Candido Navarro	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
138	La Pila	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
139	Villa de Zaragoza	HCO3>Cl>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl-SO4
140	Villa de Zaragoza	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
141	Villa de Pozos	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
142	Granja Florida	HCO3>SO4>Cl-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-SO4-Cl
143	Santa Rita	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
144	Los Jasos	SO4>HCO3-Ca>Na	Ca-Na-SO4-HCO3
145	P. de la Hacienda	HCO3-Na>Ca	Ca-Na-HCO3
29-2010	Nacimiento	HCO3-Na	Na-HCO3
31-2010	Ex-Hacienda	HCO3-Na	Na-HCO3
34-2010	pSMI2-19-X	HCO3-Na	Na-HCO3
36-2010	NZAC-20X	HCO3>SO4-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-SO4
44-2010	P-NIG-22-X	HCO3>Cl-Na>Ca	Na-Ca-HCO3-Cl
56-2010	Pozo 4	SO4>HCO3-Na	Na-SO4-HCO3
58-2010	Pozo 9	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
63-2010	Los Yañez	HCO3-Na	Na-HCO3
64-2010	Corral Blanco	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
68-2010	Belén del Refugio	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
69-2010	Ornelas	SO4>HCO3-Na	Na-SO4-HCO3
76-2010	Acosta	HCO3-Na	Na-HCO3
80-2010	Luis Moya	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
88-2010	Ojuelos	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
99-2010	P-OCA	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
102-2010	Tule	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4
123-2010	ZA-1171	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
132-2010	San Juanico G y C	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3
137-2010	Candido Navarro	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3
144-2010	Los Jasos	HCO3>SO4-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-SO4

ANEXO 7.

**DIAGRAMAS STIFF POR
GRUPO DE AGUA**

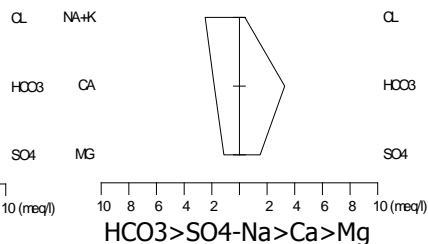
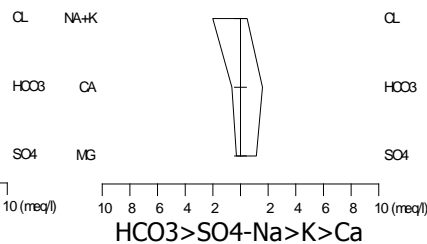
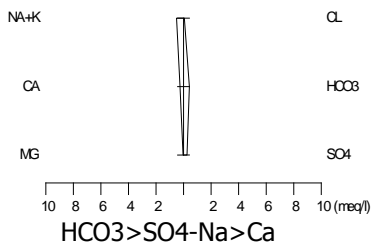
DATOS 1999

GRUPO 1- Flujo local.

42. MPIN1,21-X-99

104. Gachupines (N)

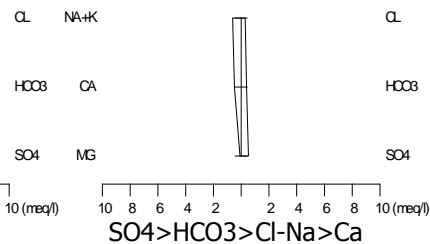
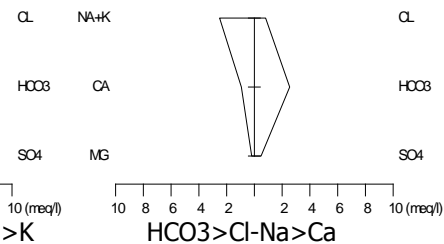
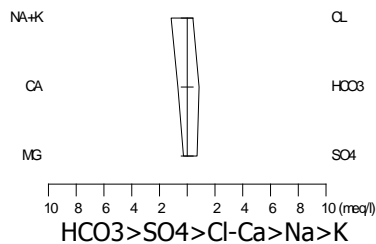
78. San Pedro



35.PR-PIN-20-X

45.N-NIG1-22-X

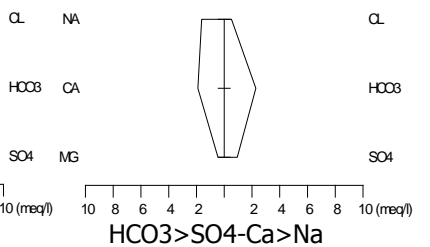
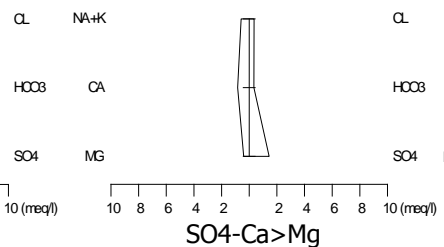
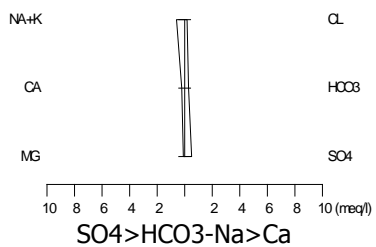
41.MPIN21X99



87. Ciénega Mata

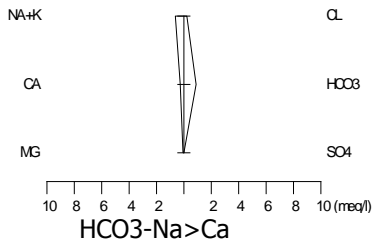
125. Presa San José

79. Griegos

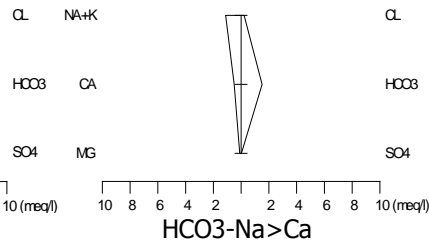


GRUPO 2- Flujo intermedio

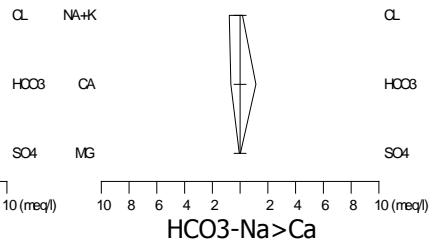
116. San Juanita



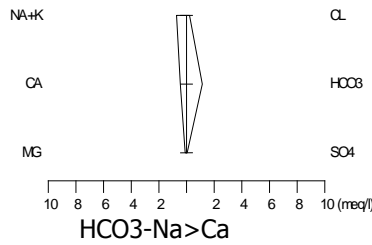
66. San Elías



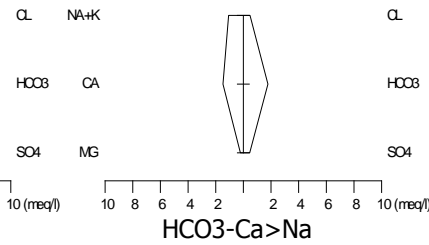
67. Villa Hidalgo



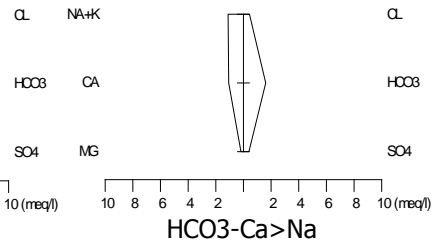
121. ZA-1183



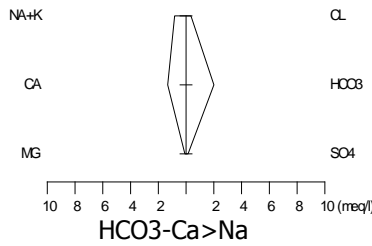
127. Granja Pilgrim



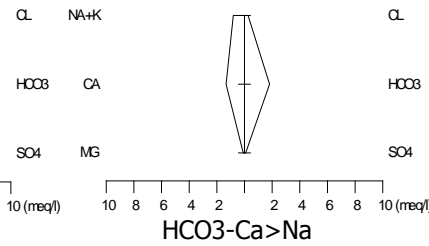
122. El Mezquite



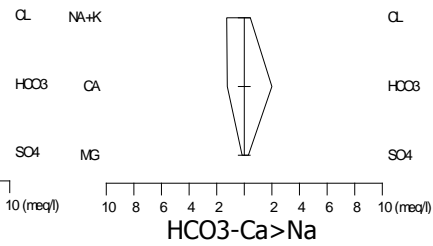
123. P ZA-1171



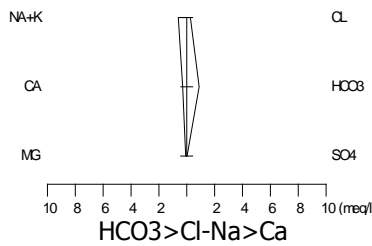
137. Candido Navarro



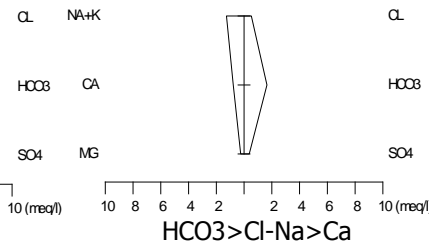
145. P de la Hacienda



120. Hda Jaralito

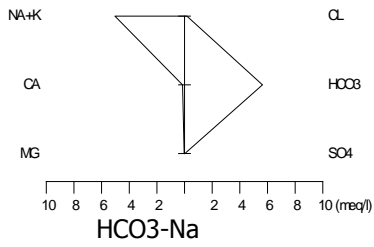


130. Mercado rep.

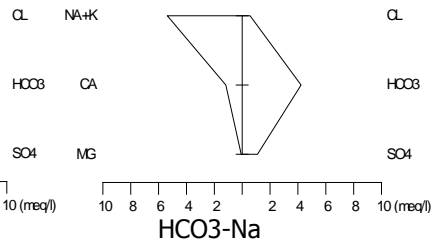


GRUPO 3- Flujo regional 1

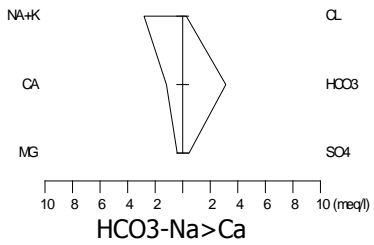
59. Labor de Montoya



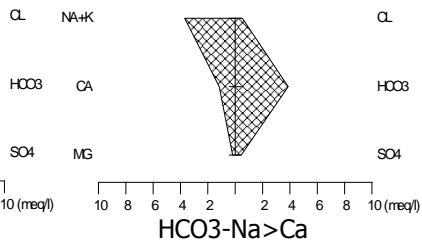
86. Azulitos



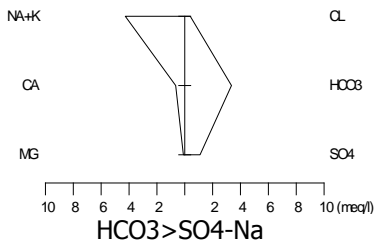
68. Belen Refugio



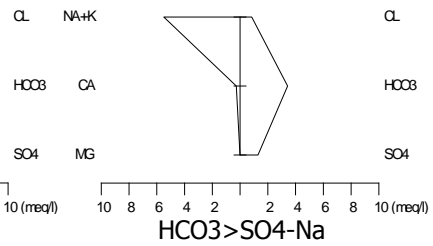
1. Villa Reyes



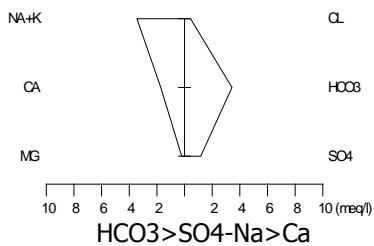
76. Acosta



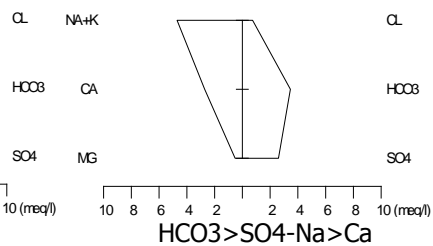
30. Agua clara



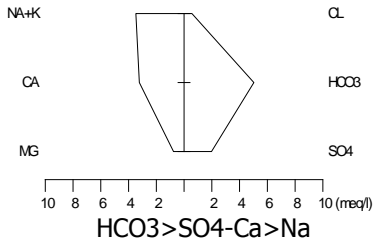
80. Luis Moya



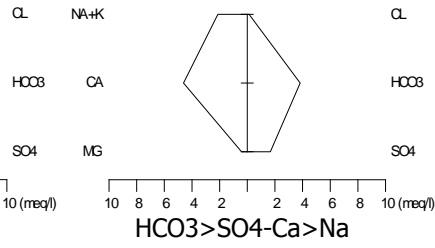
81. Noria Molinos



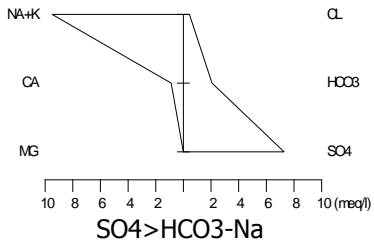
82. Tierra Blanca



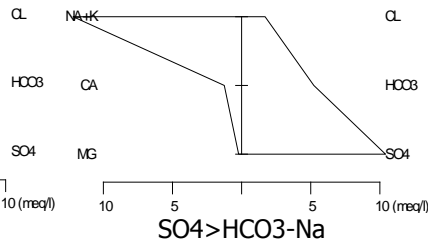
60. Teocaltiche



69. Ornelas

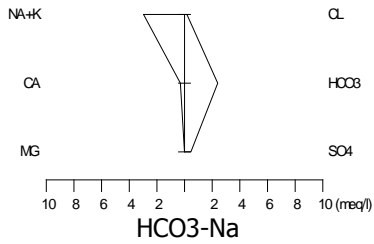


58. POZO 9-JAL

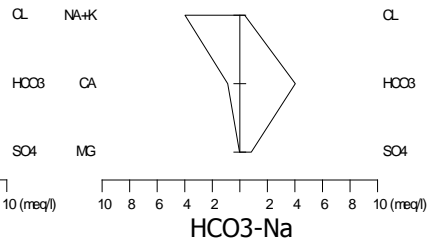


GRUPO 4-Flujo regional 2

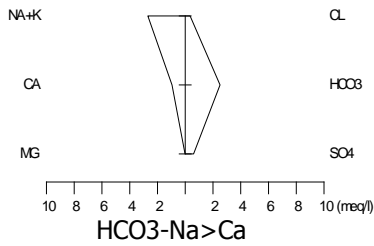
34. PSMI2-19-X



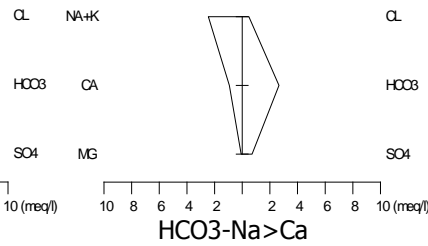
71. La Cuadra



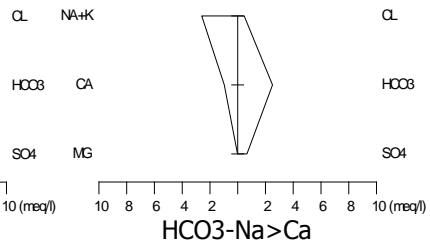
13. Juan Sarabia



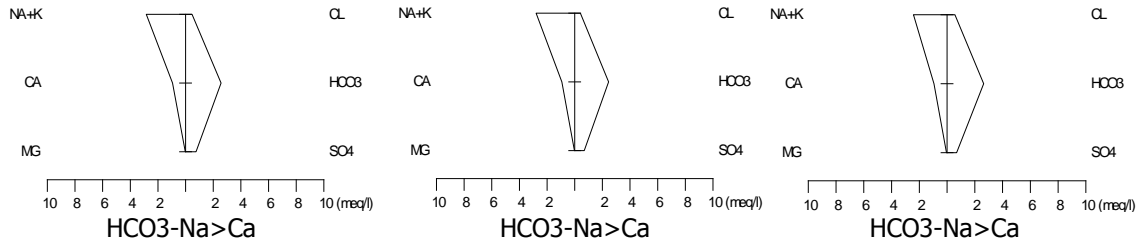
124. LOMAS III (P-57)



10. Zona industrial

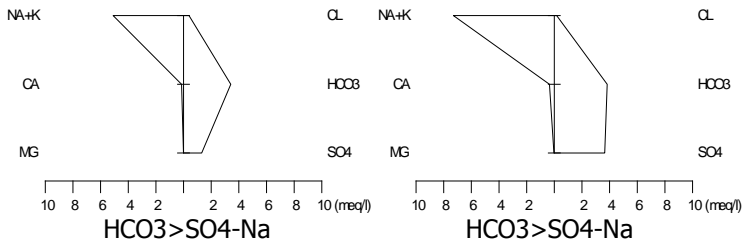


11. Zona termal 1 (P-30) 12. Zona termal 2 (P-28) 135. Simón Díaz



70. San Sebastián

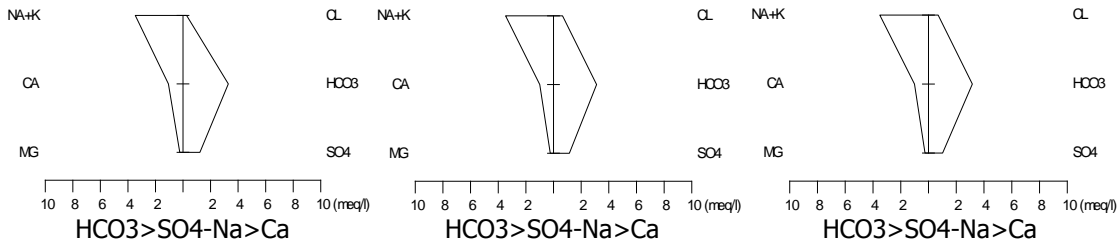
56. Pozo 4-Jal



106. P-GUA4

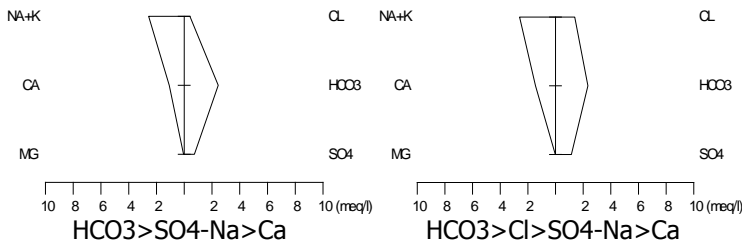
107. Lag Guadalupe

108. Lag Guada 1



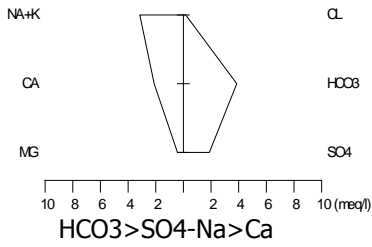
5. Las Dalias

139. V Zaragoza 1

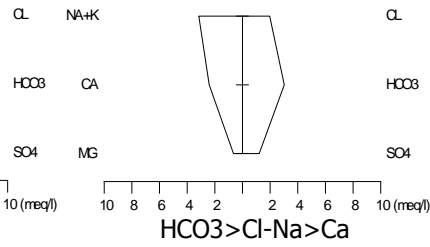


GRUPO 5- local

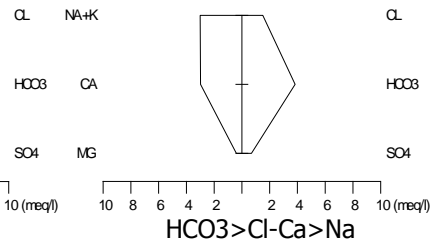
36. NZAC-20X



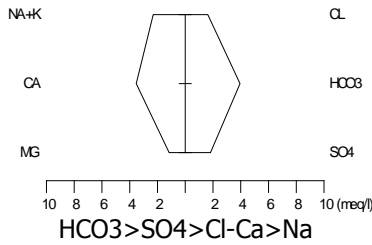
38. PCHIQ-20-X



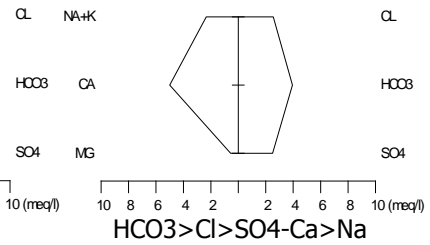
96. Villa Hidalgo (N)



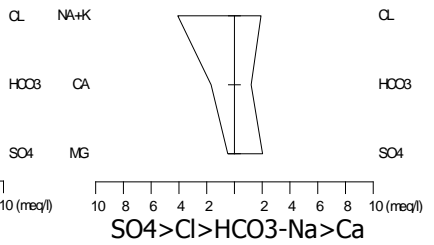
49. M-NDRAN23X



40. P-ARR-21-X

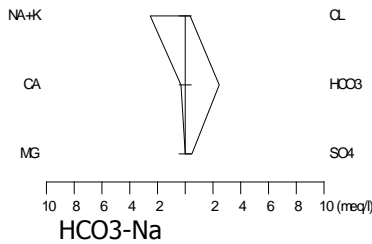


46. N-NIG2-22-X

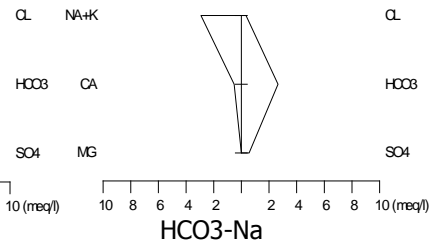


GRUPO 6- Mezcla intermedio y regional

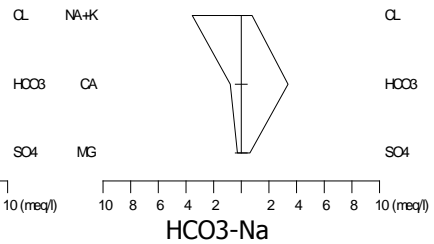
103. La Tinaja



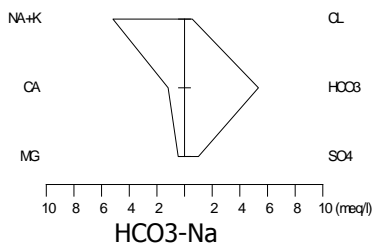
31. Ex-Hacienda



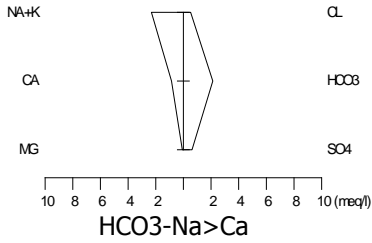
109. Lag Guada 2



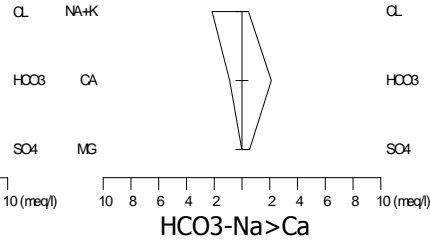
29. Nacimiento



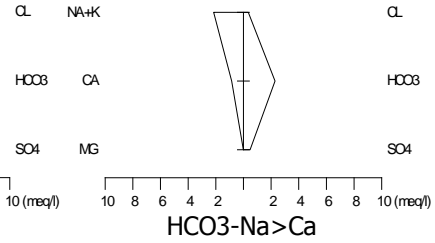
2. FOVISSTE



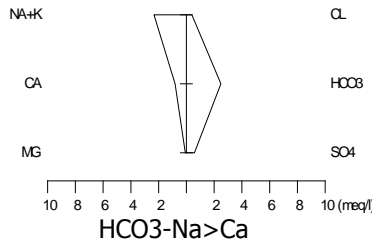
14. San Vicente II



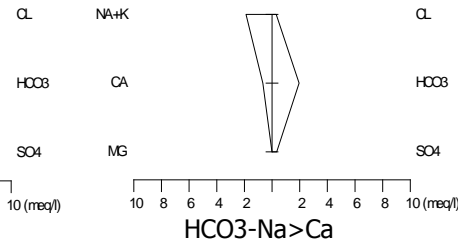
21. Prad. del Maurel



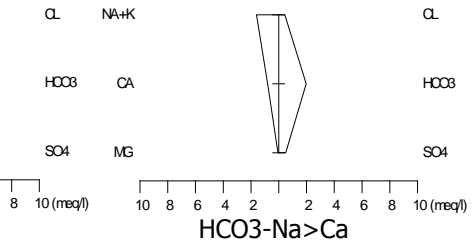
112. Pozo La Venta-2



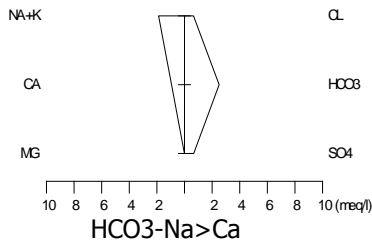
117. Villas Morro (SG-27)



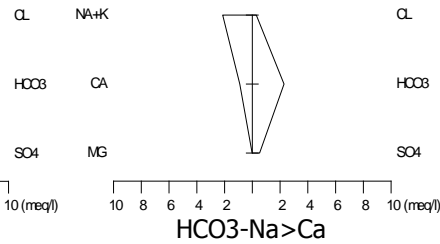
138. La Pila



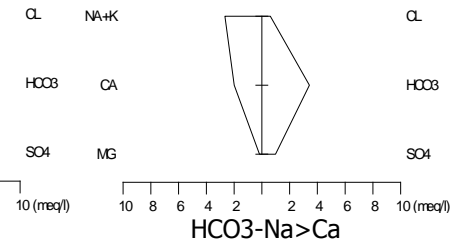
140. Villa Zaragoza 2



24. PSG-14 UPA

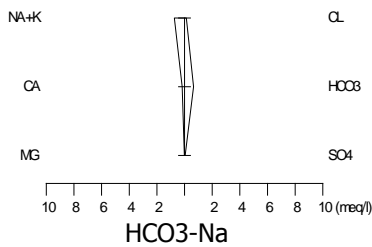


88. Ojuelos

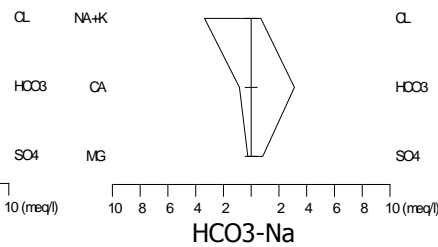


GRUPO 7- Mezcla intermedio y regional

63. Los Yañez



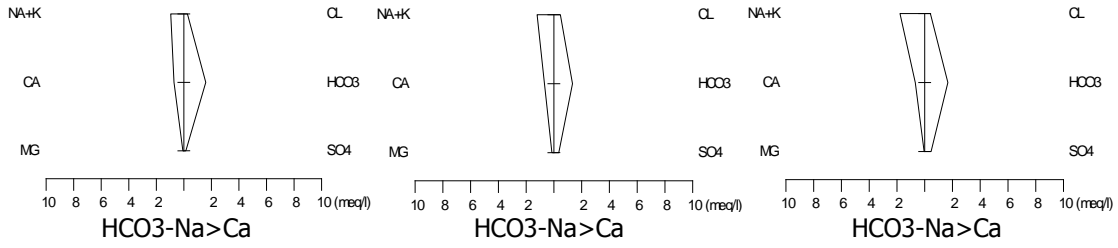
110. Lag Guada 3



119. La Constancia

8. Los Reyes (P-64)

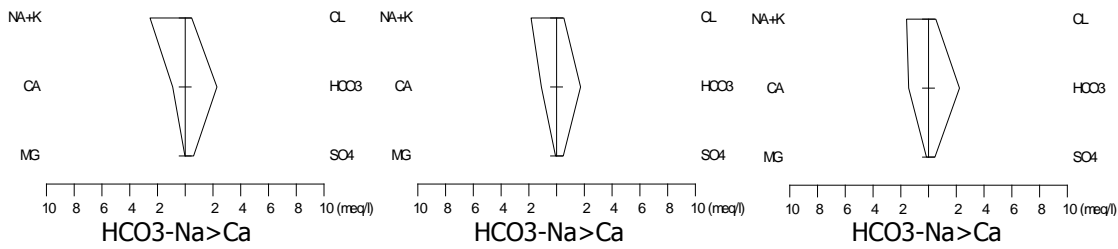
7. Col. Jacarandas



4. Mezquital (P-73)

16. Prados Glorieta

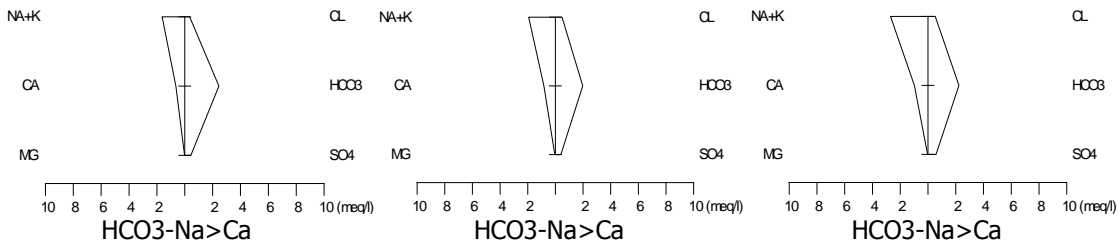
15. Abastos II (P-13)



136. Ciudad 2000

141. Villa de Pozos

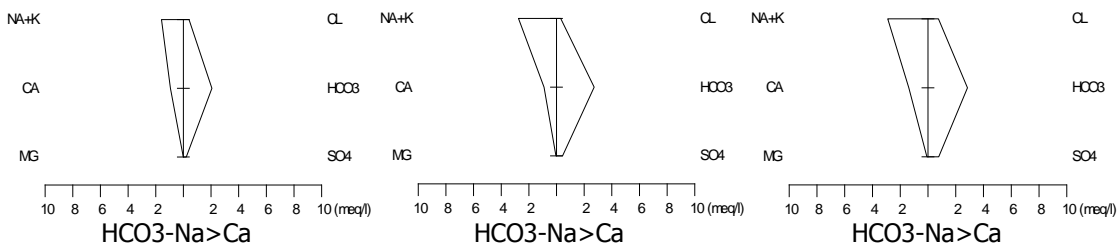
3. San Angel (P-74)



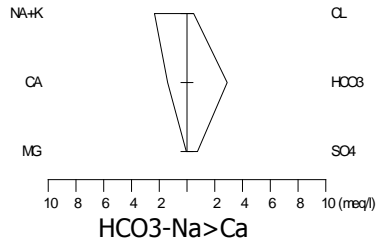
22. Rivera (PSG-24)

89. Paso El 40

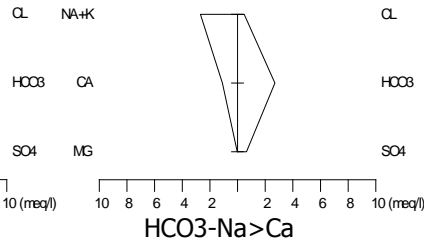
27. Los Vargas (P-83)



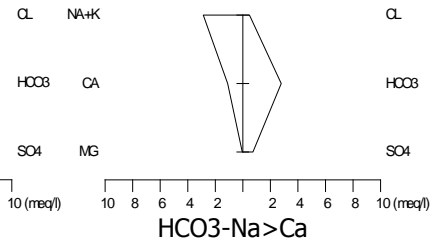
132. San Juanico G y C



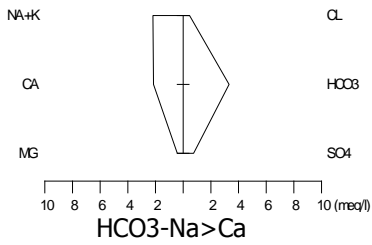
133. Salazar



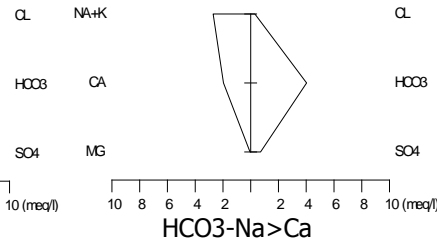
134. Nicolás Zapata



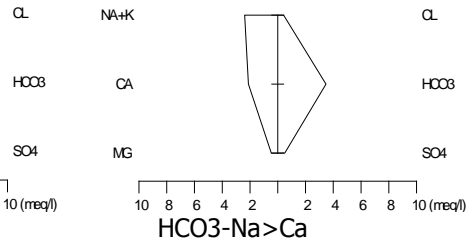
37. PPIN1-20-X



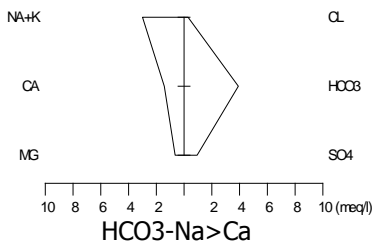
74. Jaralillo



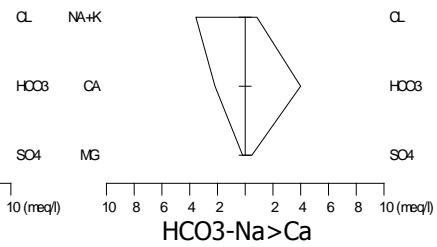
99. P-OCA (Ojo Caliente)



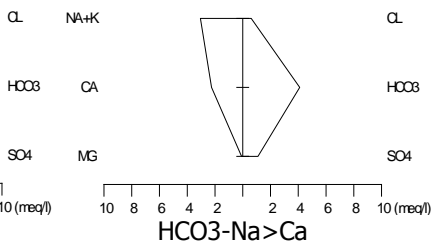
32. P-SANT-19-X



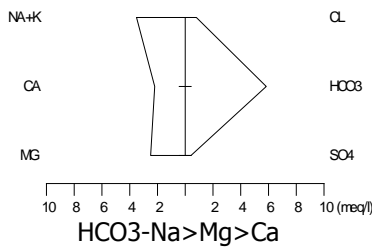
95. P-CBTA



105. Pozo Gachupines



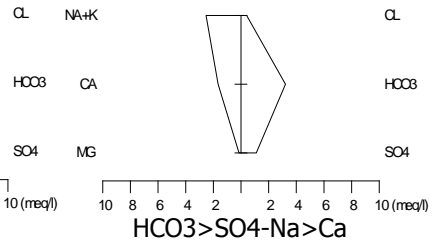
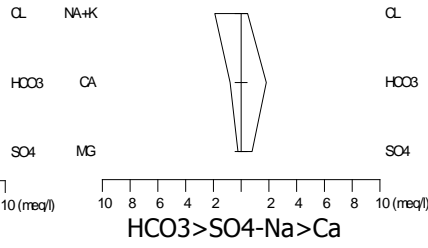
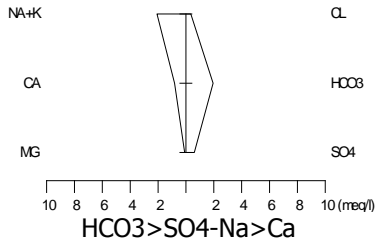
97. Noria de Angeles



85. Villa García

6. Info Morales (P-69)

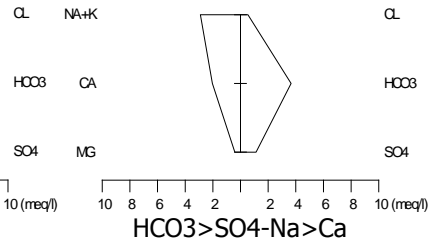
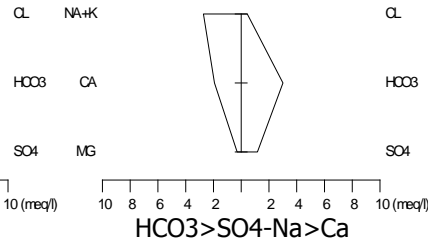
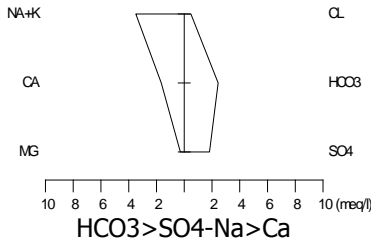
39. PPOL21-X-99



83. Loreto

84. Loreto Zac.

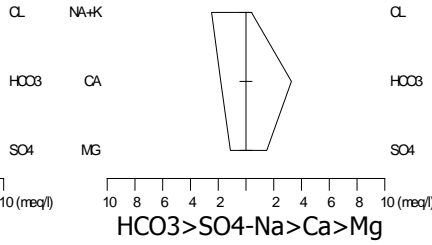
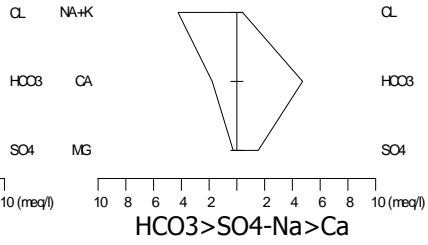
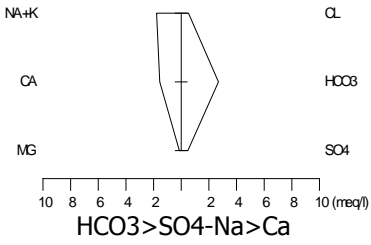
44. P-NIG-22-X



129. Col. del Llano

33. P-RDEL-19-X

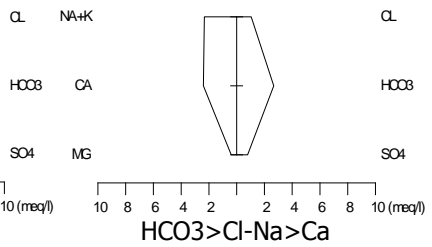
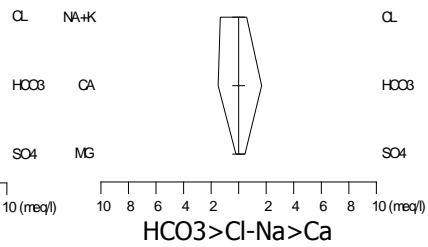
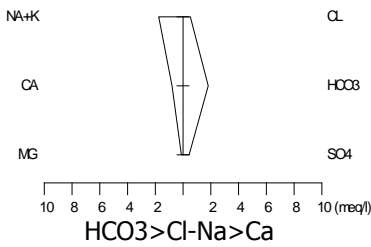
78. San Pedro



9. Col. Ind. Aviación

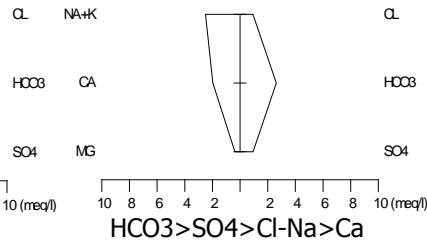
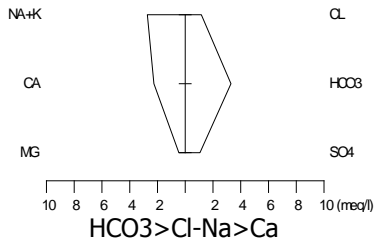
19. Av. México (P-5)

23. 21 de marzo



47. P-PACH-23-X

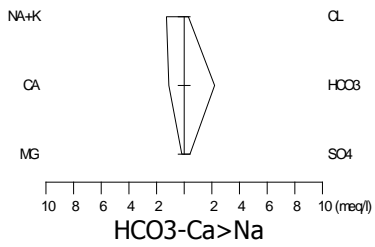
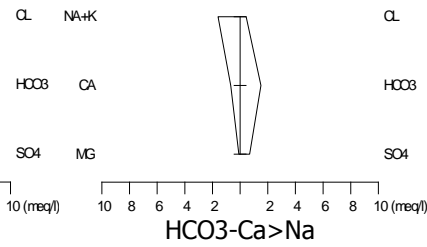
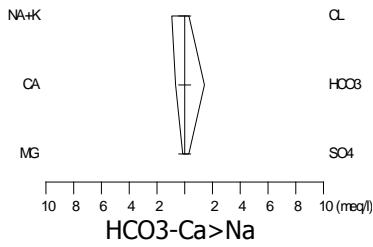
48. P-PACH-2B-23X



114. Sn Felipe (SG-02)

131. Polvillo-Morales

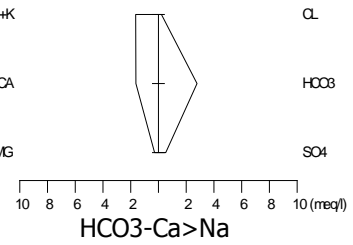
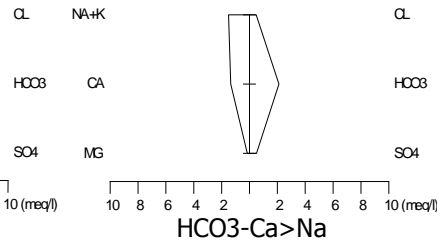
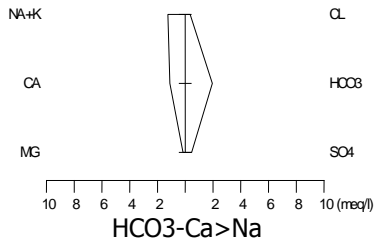
118. Pedroza II (P-66)



115. Los Fresnos (SG-04)

128. Col. El Paseo

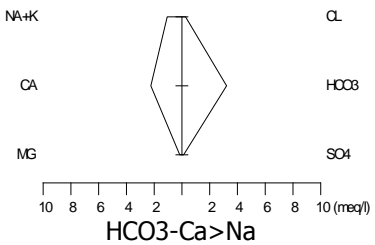
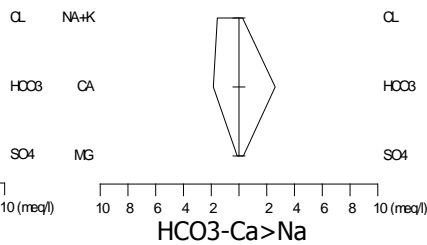
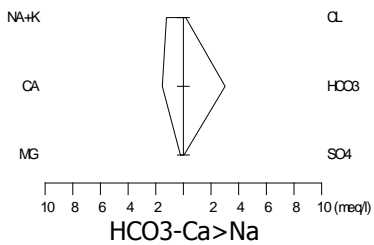
75. Sta María de En M.



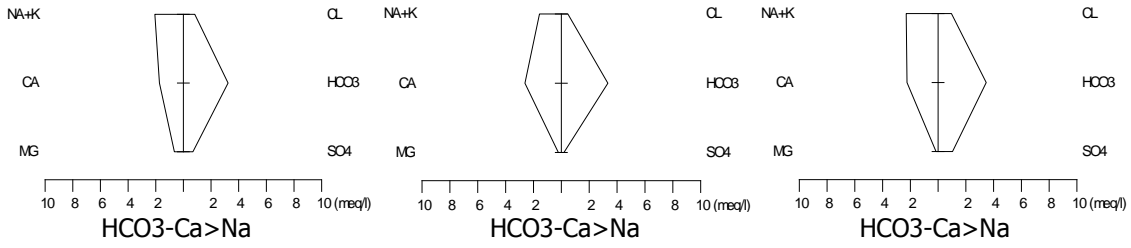
64. Corral Blanco

73. Guerrero

72. Bajío

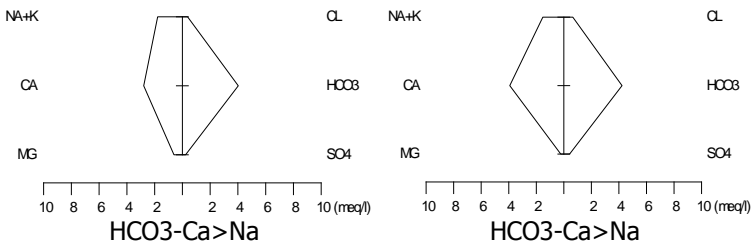


111. Pozo La Venta-1 25. Tlaxcala Paisanos 126. Milpillas (ZA-393)



92. Pozo Saladillo

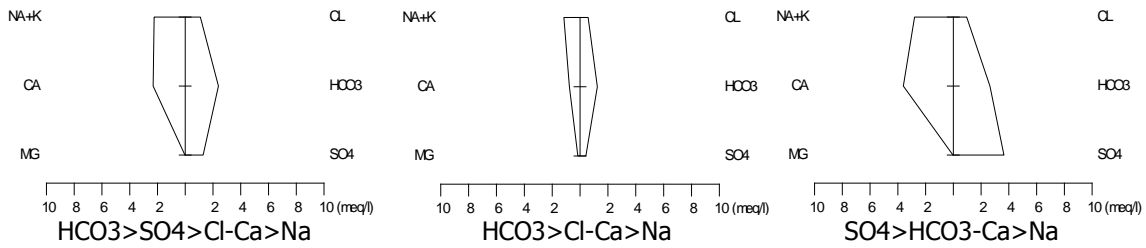
77. Lagunita



142. Granja Florida

28. Caja de Agua Nuevo

144. Los Jasos

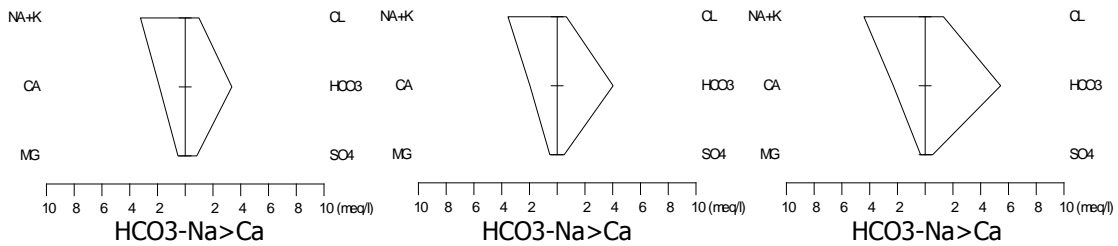


GRUPO 8

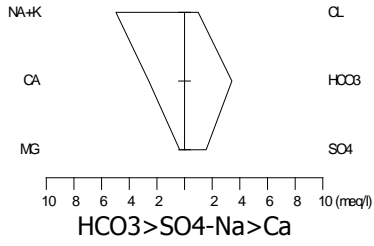
93. P-PRIMA I-II

100. P-PRIM I-II

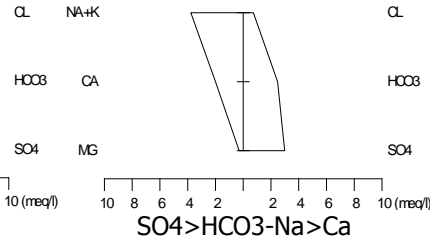
94. P-PRIM I-II



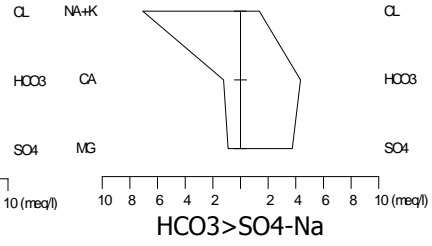
98. P-PRIMAII-II



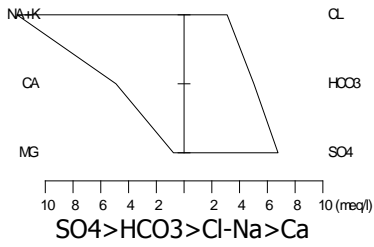
91. P-PRIM1-3



102. El Tule

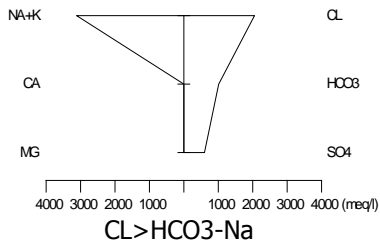


90. Villa González



SALINAS

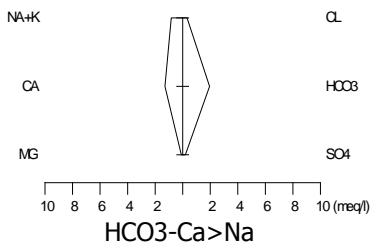
101. Salinas



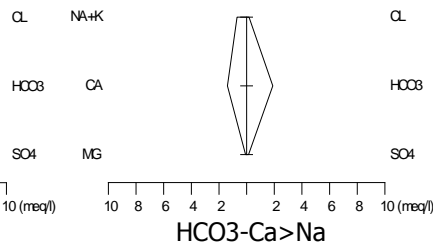
DATOS 2010

GRUPO 2

123. ZA-1171-2010



137. C Navarro-2010

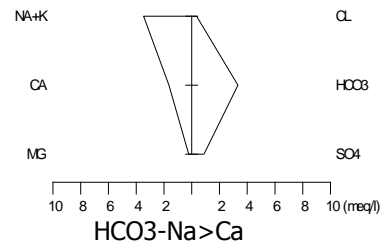
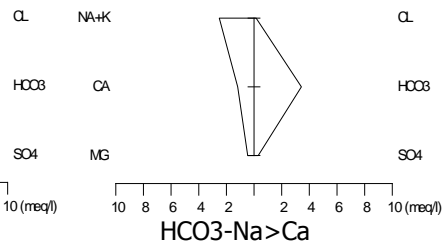
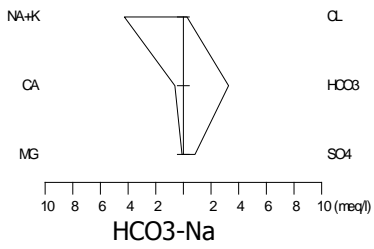


GRUPO 3

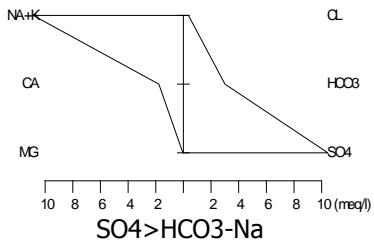
76. Acosta-2010

68. B del Refugio-2010

80. Luis Moya-2010



69. Ornelas-2010

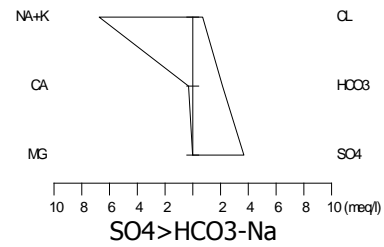
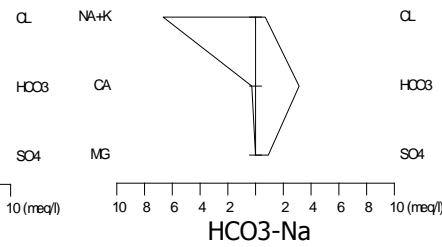
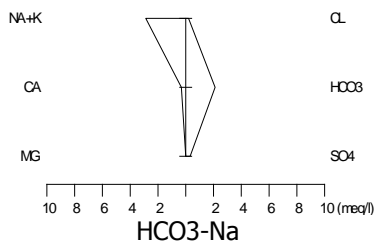


GRUPO 4

34. pSMI2-19-X-2010

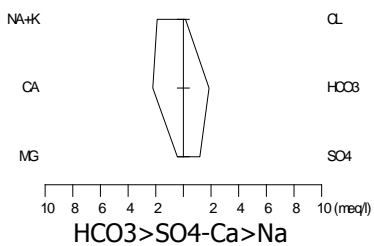
31. Ex-Hacienda-2010

56. Pozo 4



GRUPO 5

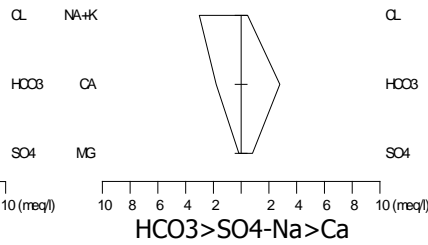
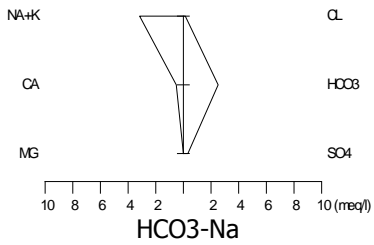
36. NZAC-20X-2010



GRUPO 6

29. Nacimiento-2010

88. Ojuelos-2010

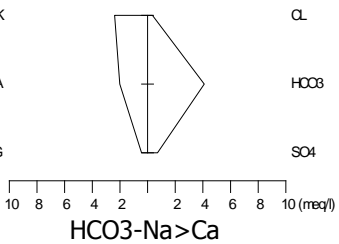
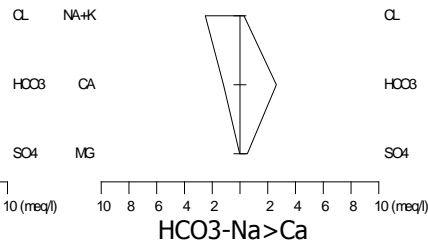
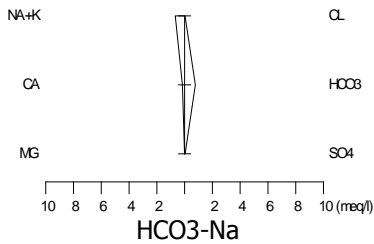


GRUPO 7

63. Los Yañez-2010

132. S Juanico-2010

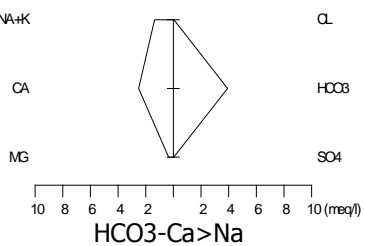
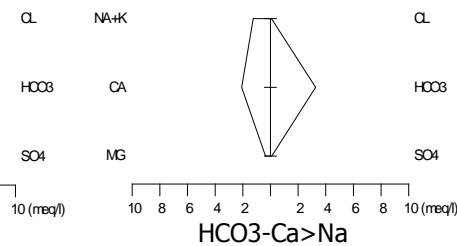
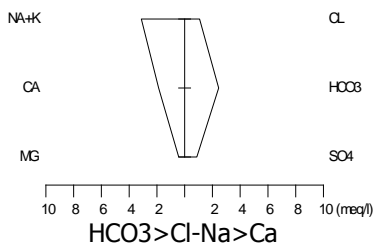
99. P-OCA-2010



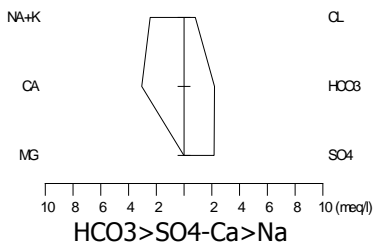
44. P-NIG-22-X-2010

64. Corral Blanco-2010

58. Pozo 9-2010

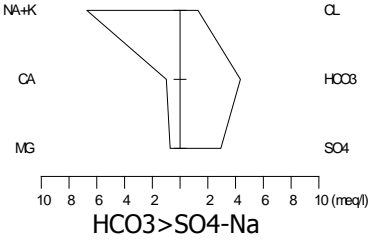


144. Los Jasos-2010



GRUPO 8

102. El Tule-2010



ANEXO 8.

ÍNDICE DE MADUREZ

DATOS DE 1999	
Muestra	IM
1 V Reyes	0.93
2 FOVISSTE	1.12
3 San Angel	1.47
4 Mezquital	1.49
5 Las Dalias	1.30
6 I Morales	0.59
7 Jacarandas	1.02
8 Los Reyes	0.43
9 I Aviación	0.73
10 Z Industrial	1.53
11 Z Termal1	1.51
12 Z Termal2	1.51
13 J Sarabia	1.51
14 S Vicente II	1.45
15 Abastos II	0.53
16 P Glorieta	0.90
17 CFE-8	1.06
18 CFE-7	1.08
19 Av México	0.49
20 CFE-2	1.02
21 Prad Maurel	1.57
22 Rivera	1.49
23 21 de Marzo	0.48
24 UPA	1.49
25 Tlaxcala	0.52
26 San Xavier	1.08
27 Los Vargas	1.01
28 Caja Agua N	0.54
29 Nacimiento	0.80
30 Agua Clara	2.17
31 Ex-Hacienda	2.31
32 p-sant-19-X	0.58
33 p-RDEL-19-X	0.83
34 pSMI2-19-X	2.18
35 pR-Pin-20-X	0.07
36 NZAC-20X	0.40
37 pPIN1-20-X	0.49
38 pCHIQ-20-X	0.51
39 pPOL21-X-99	0.83
40 p-ARR-21-X	0.79
41 MPIN21X99	0.77
42 MPIN1,21-X-99	1.20
43 L-NIG-22-X	0.06
44 P-NIG-22-X	0.63
45 N-NIG1-22-X	0.61

DATOS DE 1999	
Muestra	IM
46 N-NIG2-22-X	0.60
47 P-PACH-23-X	0.62
48 P-pACH-2B-23X	0.60
49 M-NDRAN23X	0.38
50 Cda Ricos	0.67
51 Higuera3	1.41
52 Higuera4	1.49
53 Higuera7	1.63
54 La Ladera	1.21
55 Pozo 7	0.91
56 Pozo 4	2.13
57 Peña Halcón	1.67
58 Pozo 9	1.67
59 L Montoya	1.79
60 Teocaltiche	0.54
61 Pozo 2	1.10
62 Pozo 4	1.60
63 Los Yañez	1.13
64 Crr Blanco	0.59
65 El Alto	0.65
66 San Elías	0.98
67 V Hidalgo	0.83
68 Belem Ref	0.85
69 Ornelas	2.21
70 S Sebastián	2.13
71 La Cuadra	1.84
72 Bajío	0.76
73 Guerrera	0.77
74 Jaralillo	1.25
75 S María En	0.85
76 Costa	1.71
77 Lagunita	0.66
78 San Pedro	0.78
79 Griegos	0.46
80 Luis Moya	0.99
81 Nor Molinos	1.11
82 Trr Blanca	0.75
83 Loreto	0.95
84 Loreto Zac	0.79
85 V García	0.91
86 Azalitos	1.00
87 Ciénega Mala	0.43
88 Ojuelos	0.73
89 Paso El 40	1.29
90 V González	1.23

DATOS DE 1999	
Muestra	IM
91 P-PRIM1-3	0.94
92 P Saladillo	0.56
93 P-PRIMAI-II	0.62
94 P-PRIM I-II	0.94
95 P-CBTA	0.96
96 V Hidalgo (N)	0.37
97 Noria Ángeles	0.79
98 P-PRIMAI-II	0.95
99 P-OCA	0.81
100 P-PRIM I-II	0.55
101 Salinas	2.60
102 Tule	1.19
103 La Tinaja	1.89
104 Gachupines (N)	0.14
105 P Gachupines	1.12
106 P-GUA4	1.00
107 L Guadalupe	0.99
108 L Guada1	0.97
109 L Guada2	0.82
110 L Guada3	0.93
111 P La Venta1	0.16
112 P La Venta2	0.95
113 Agua sup	0.32
114 Sn Felipe	0.37
115 Los Fresnos	0.41
116 San Juanita	0.45
117 V Morro	1.63
118 Pedroza II	0.46
119 Constancia	0.73
120 H Jaralito	0.47
121 ZA-1183	0.39
122 El Mezquite	0.45
123 P ZA-1171	0.48
124 Lomas III	1.18
125 Presa S José	-0.04
126 Milpillias	0.69
127 G PILGRIM	0.32
128 C Paseo	0.53
129 C Llano	0.64
130 Mercado R	0.39
131 Polvillo-M	0.84

DATOS DE 1999	
Muestra	IM
132 Sn Juanico	1.10
133 Salazar	1.50
134 N Zapata	1.37
135 Simón Díaz	1.28
136 Ciudad 2000	1.43
137 Candido	0.42
138 La Pila	0.94
139 V Zaragoza1	1.53
140 V Zaragoza2	1.60
141 V de Pozos	1.20
142 Gja Florida	1.27
143 Santa Rita	0.95
144 Los Jasos	1.30
145 P de la Hda	0.45

DATOS DE 2010	
Muestra	IM
29-2 Nacimiento	2.28
31-2 Ex-Hacienda	2.36
34-2 pSMI2-19-X	2.28
36-2 NZAC-20X	0.35
44-2 P-NIG-22-X	0.63
56-2 Pozo 4	2.22
58-2 Pozo 9	1.14
63-2 Los Yañez	1.14
64-2 Corral Blanco	0.36
68-2 Belén del Refugio	0.76
69-2 Ornelas	2.03
76-2 Acosta	1.66
80-2 Luis Moya	0.96
88-2 Ojuelos	0.83
99-2 P-OCA	0.86
101- Salinas	2.36
102- Tule	1.47
123- ZA-1171	0.48
132- San Juanico G y C	1.49
137- Candido Navarro	0.42
144- Los Jasos	1.41

ANEXO 9.

**CÁLCULO DE LA
DISTANCIA DE
RECORRIDO**

CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

POZOS PROFUNDOS, MEDIO FRACTURADO, CONDICIONES CONFINADAS

Pozo	T (m ² /s) x10 ⁻⁴	b (m)	K=T/b
1187-ZA	3,8	50	7,60E-06
396-ZA	1,9	30	6,33E-06 K Mínimo
1174-ZA	2,9	30	9,67E-06 K Máximo
			7,87E-06 K Promedio

POZOS PROFUNDOS, MEDIO FRACTURADO, CONDICIONES SEMI-CONFINADAS

939-ZA	8,3	245	3,39E-06
449A-ZA	10,5	40	2,63E-05
439-ZA	4,2	70	6,00E-06
436-ZA	2,7	100	2,70E-06
438-ZA	55,7	100	5,57E-05
PSLB-104	26,3	90	2,92E-05
463-za	15,9	70	2,27E-05
403A-ZA	25,0	127	1,47E-05
617-ZA	4,1	40	1,03E-05
605-ZA	18,4	60	3,07E-05
86-ZA	0,9	70	1,34E-06 K Mínimo
PSLB-8	66,3	90	7,37E-05 K Máximo
PNG-2	7,4	120	6,17E-06
			2,18E-05 K Promedio

POZOS PROFUNDOS, MEDIO FRACTURADO, CONDICIONES NO CONFINADAS

ACU-351	16,2	102	1,59E-05
1126-ZA	7,9	135	5,85E-06
PSLB-12	1,9	222	8,56E-07 K Mínimo
1171-ZA	10,5	214	4,91E-06
700-ZA	2,1	132	1,59E-06
390-ZA	10,8	128	8,44E-06
505-ZA	39,1	65	6,02E-05 K Máximo
652-ZA	19,1	130	1,47E-05
391-ZA	11,6	130	8,92E-06
			1,35E-05 K Promedio

POZOS PROFUNDOS, DOBLE POROSIDAD, CONDICIONES CONFINADAS

Pozo	T (m ² /s) x10 ⁻⁴	b (m)	K _f =T/b	K _m x10 ⁻⁵	K _t (K _f + K _m)
381-ZA	16,5	30	5,50E-05 K Máximo	3,70E-05	3,88E-03
359-ZA	8,3	140	5,93E-06 K Mínimo	3,00E-06	2,03E-05
			3,05E-05 K Promedio	2,00E-05	1,95E-03

INFORMACIÓN USADA PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD Y DISTANCIA

POROSIDAD TOTAL-n (por peso) POR UNIDAD GEOLÓGICA (%)

Formación	Más Baja	Más Alta	Promedio
Riolita Panalillo superior (Tpr)	6,10	18,37	12,24
Riolita Panalillo Inferior (Tpa)	18,03	30,04	24,04
Riolita San Miguelito (Tsm)	0,11	35,85	17,98
Latita Portezuelo (Tpl)	0,01	37,09	18,55
Ignimbrita Santa María (Tsm)	6,21	6,74	6,48

POZOS PROFUNDOS, MEDIO FRACTURADO, CONDICIONES CONFINADAS

Litología	Clave	Pozo
Latita Portezuelo	Tpl	396-ZA
Latita Portezuelo	Tpl	1174-ZA

POZOS PROFUNDOS, MEDIO FRACTURADO, CONDICIONES SEMI-CONFINADAS

Panalillo inferior	Tpa	86-ZA
Latita Portezuelo	Tpl	PSLB-8

POZOS PROFUNDOS, MEDIO FRACTURADO, CONDICIONES NO CONFINADAS

Latita Portezuelo	Tpl	PSLB-12
Panalillo inferior	Tpa	505-ZA

POZOS PROFUNDOS, DOBLE POROSIDAD, CONDICIONES CONFINADAS

Latita Portezuelo	Tpl	381-ZA	
Panalillo superior e inferior	Tpr, Tpa	359-ZA	n Mínimo, n Mínimo 2

FUENTE: Carrillo-Rivera, 1992

GRADIENTE HIDRÁULICO (i) calculado a partir de la reconstrucción de equipotenciales

Ubicación	Valor	
AGS	0,005	
E-AGS	0,019	
V Reyes	0,003	Mínimo
SLP	0,042	Máximo
SE-SLP	0,013	
E-SLP	0,009	
sierras plegadas calizas	0,033	
	0,018	Promedio

DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD (V= K i/n)

POZOS PROFUNDOS, MEDIO FRACTURADO, CONDICIONES CONFINADAS

	n mínimo			n máximo			n promedio			n modelo matematico		
	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio
K minimo	6,33E-06	8,87E-05	3,80E-05	1,71E-09	2,39E-08	1,02E-08	3,41E-09	4,78E-08	2,05E-08	3,17E-06	4,43E-05	1,90E-05
K maximo	9,67E-06	1,35E-04	5,80E-05	2,61E-09	3,65E-08	1,56E-08	5,21E-09	7,30E-08	3,13E-08	ND		
K promedio	7,87E-06	1,10E-04	4,72E-05	2,12E-09	2,97E-08	1,27E-08	4,24E-09	5,94E-08	2,54E-08	3,93E-06	5,51E-05	2,36E-05

POZOS PROFUNDOS, MEDIO FRACTURADO, CONDICIONES SEMI-CONFINADAS

	n mínimo			n máximo			n promedio		
	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio
K minimo	2,20E-09	3,08E-08	1,32E-08	7,31E-10	1,02E-08	4,39E-09	5,59E-10	2,35E-09	1,01E-09
K maximo	7,37E-05	1,03E-03	4,42E-04	1,99E-08	2,78E-07	1,19E-07	3,97E-08	1,67E-07	7,15E-08
K promedio	7,12E-08	9,97E-07	4,27E-07	7,84E-09	1,10E-07	4,71E-08	1,02E-08	4,29E-08	1,84E-08

POZOS PROFUNDOS, MEDIO FRACTURADO, CONDICIONES NO CONFINADAS

	n mínimo			n máximo			n promedio			n modelo matematico		
	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio
K minimo	8,56E-07	1,20E-05	5,14E-06	2,31E-10	3,23E-09	1,38E-09	4,61E-10	1,94E-09	8,30E-10	2,52E-07	3,52E-06	1,51E-06
K maximo	3,34E-08	4,67E-07	2,00E-07	2,00E-08	2,80E-07	1,20E-07	2,50E-08	1,05E-07	4,50E-08	4,01E-06	5,61E-05	2,41E-05
K promedio	1,49E-08	2,09E-07	8,96E-08	6,02E-09	8,43E-08	3,61E-08	6,33E-09	2,66E-08	1,14E-08	1,46E-06	2,05E-05	8,79E-06

POZOS PROFUNDOS, DOBLE POROSIDAD, CONDICIONES CONFINADAS

	n mínimo			n máximo			n promedio		
	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio	i mínimo	i máximo	i promedio
K minimo	9,72E-09	1,36E-07	5,83E-08	3,23E-09	4,52E-08	1,94E-08	4,85E-09	2,04E-08	8,72E-09
K maximo	5,50E-05	7,70E-04	3,30E-04	1,48E-08	2,08E-07	8,90E-08	2,96E-08	1,25E-07	5,34E-08
K promedio	9,97E-08	1,40E-06	5,98E-07	2,16E-09	3,03E-08	1,30E-08	1,67E-08	7,00E-08	3,00E-08

$$K_t = K_f + K_m$$

K minimo	9,96E-09	1,39E-07	5,98E-08	3,31E-09	4,63E-08	1,98E-08	4,97E-09	6,95E-08	2,98E-08
K maximo	1,17E-03	1,63E-02	6,99E-03	3,14E-07	4,40E-06	1,88E-06	6,28E-07	8,79E-06	3,77E-06
K promedio	1,92E-06	2,68E-05	1,15E-05	2,11E-07	2,96E-06	1,27E-06	3,80E-07	5,33E-06	2,28E-06

DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA (km)

Pozos profundos, medio fracturado, condiciones confinadas

Flujos regionales

	n mínimo								
	i mínimo			i máximo			i promedio		
	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom
K mínimo	1058,56	1298,23	1178,40	14819,82	18175,25	16497,53	6351,35	7789,39	7070,37
K máximo	1615,69	1981,51	1798,60	22619,72	27741,17	25180,44	9694,17	11889,07	10791,62
K promedio	1314,84	1612,54	1463,69	18407,77	22575,57	20491,67	7889,05	9675,24	8782,15
n máximo									
K mínimo	0,29	0,35	0,32	4,00	4,90	4,45	1,71	2,10	1,91
K máximo	0,44	0,53	0,48	6,10	7,48	6,79	2,61	3,21	2,91
K promedio	0,35	0,43	0,39	4,96	6,09	5,52	2,13	2,61	2,37
n promedio									
K mínimo	0,57	0,70	0,64	7,99	9,80	8,89	3,42	4,20	3,81
K máximo	0,87	1,07	0,97	12,19	14,95	13,57	5,23	6,41	5,82
K promedio	0,71	0,87	0,79	9,92	12,17	11,05	4,25	5,22	4,73
n modelo matemático									
K mínimo	529,28	649,12	589,20	7409,91	9087,62	8248,77	3175,68	3894,70	3535,19
K promedio	657,42	806,27	731,85	9203,89	11287,79	10245,84	3944,52	4837,62	4391,07

Flujos intermedios

	n mínimo								
	i mínimo			i máximo			i promedio		
	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom
K mínimo	199,73	659,10	429,42	2796,19	9227,43	6011,81	1198,37	3954,61	2576,49
K máximo	304,85	1006,00	655,42	4267,87	14083,98	9175,92	1829,09	6035,99	3932,54
K promedio	248,08	818,67	533,38	3473,16	11461,44	7467,30	1488,50	4912,05	3200,27
n máximo									
K mínimo	0,05	0,18	0,12	0,75	2,49	1,62	0,32	1,07	0,69
K máximo	0,08	0,27	0,18	1,15	3,80	2,47	0,49	1,63	1,06
K promedio	0,07	0,22	0,14	0,94	3,09	2,01	0,40	1,32	0,86
n promedio									
K mínimo	0,11	0,36	0,23	1,51	4,97	3,24	0,65	2,13	1,39
K máximo	0,16	0,54	0,35	2,30	7,59	4,95	0,99	3,25	2,12
K promedio	0,13	0,44	0,29	1,87	6,18	4,03	0,80	2,65	1,73
n modelo matemático									
K mínimo	99,86	329,55	214,71	1398,10	4613,72	3005,91	599,18	1977,31	1288,25
K promedio	124,04	409,34	266,69	1736,58	5730,72	3733,65	744,25	2456,02	1600,14

DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA (km)

Pozos profundos, medio fracturado, condiciones semi-confinadas

Flujos regionales

	n mínimo								
	i mínimo			i máximo			i promedio		
	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom
K mínimo	0,37	0,45	0,41	5,15	6,32	5,73	2,21	2,71	2,46
K máximo	12312,71	15100,49	13706,60	172377,88	211406,83	191892,36	73876,23	90602,93	82239,58
K promedio	11,90	14,59	13,25	166,61	204,33	185,47	71,40	87,57	79,49
n máximo									
K mínimo	0,12	0,15	0,14	1,71	2,10	1,90	0,73	0,90	0,82
K máximo	3,32	4,07	3,70	46,48	57,00	51,74	19,92	24,43	22,17
K promedio	1,31	1,61	1,46	18,36	22,51	20,43	7,87	9,65	8,76
n promedio									
K mínimo	0,09	0,11	0,10	0,39	0,48	0,44	0,17	0,21	0,19
K máximo	6,64	8,14	7,39	27,88	34,19	31,03	11,95	14,65	13,30
K promedio	1,71	2,09	1,90	7,17	8,80	7,98	3,07	3,77	3,42

Flujos intermedios

	n mínimo								
	i mínimo			i máximo			i promedio		
	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom
K mínimo	0,07	0,23	0,15	0,97	3,21	2,09	0,42	1,37	0,90
K máximo	2323,15	7666,40	4994,78	32524,13	107329,62	69926,88	13938,91	45998,41	29968,66
K promedio	2,25	7,41	4,83	31,44	103,74	67,59	13,47	44,46	28,97
n máximo									
K mínimo	0,02	0,08	0,05	0,32	1,07	0,69	0,14	0,46	0,30
K máximo	0,63	2,07	1,35	8,77	28,94	18,85	3,76	12,40	8,08
K promedio	0,25	0,82	0,53	3,46	11,43	7,45	1,48	4,90	3,19
n promedio									
K mínimo	0,02	0,06	0,04	0,07	0,24	0,16	0,03	0,10	0,07
K máximo	1,25	4,13	2,69	5,26	17,36	11,31	2,25	7,44	4,85
K promedio	0,32	1,06	0,69	1,35	4,47	2,91	0,58	1,91	1,25

DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA (km)

Pozos profundos, medio fracturado, condiciones no confinadas

Flujos regionales

	n mínimo								
	i mínimo			i máximo			i promedio		
	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom
K mínimo	143,05	175,44	159,24	2002,68	2456,11	2229,40	858,29	1052,62	955,46
K máximo	5,58	6,84	6,21	78,07	95,74	86,91	33,46	41,03	37,25
K promedio	2,50	3,06	2,78	34,96	42,88	38,92	14,98	18,38	16,68
n máximo									
K mínimo	0,04	0,05	0,04	0,54	0,66	0,60	0,23	0,28	0,26
K máximo	3,35	4,10	3,73	46,86	57,47	52,16	20,08	24,63	22,35
K promedio	1,01	1,23	1,12	14,09	17,28	15,69	6,04	7,41	6,72
n promedio									
K mínimo	0,08	0,09	0,09	0,32	0,40	0,36	0,14	0,17	0,15
K máximo	4,18	5,13	4,66	17,57	21,55	19,56	7,53	9,23	8,38
K promedio	1,06	1,30	1,18	4,44	5,45	4,95	1,90	2,34	2,12
n modelo matemático									
K mínimo	42,07	51,60	46,84	589,02	722,39	655,70	252,44	309,59	281,02
K máximo	670,28	822,04	746,16	9383,88	11508,54	10446,21	4021,66	4932,23	4476,95
K promedio	244,85	300,28	272,56	3427,84	4203,95	3815,90	1469,07	1801,69	1635,38

Flujos intermedios

	n mínimo								
	i mínimo			i máximo			i promedio		
	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom
K mínimo	26,99	89,07	58,03	377,86	1246,95	812,41	161,94	534,41	348,17
K máximo	1,05	3,47	2,26	14,73	48,61	31,67	6,31	20,83	13,57
K promedio	0,47	1,55	1,01	6,60	21,77	14,18	2,83	9,33	6,08
n máximo									
K mínimo	0,01	0,02	0,02	0,10	0,34	0,22	0,04	0,14	0,09
K máximo	0,63	2,08	1,36	8,84	29,18	19,01	3,79	12,50	8,15
K promedio	0,19	0,63	0,41	2,66	8,78	5,72	1,14	3,76	2,45
n promedio									
K mínimo	0,01	0,05	0,03	0,06	0,20	0,13	0,03	0,09	0,06
K máximo	0,79	2,60	1,70	3,31	10,94	7,13	1,42	4,69	3,05
K promedio	0,20	0,66	0,43	0,84	2,77	1,80	0,36	1,19	0,77
n modelo matemático									
K mínimo	7,94	26,20	17,07	111,14	366,75	238,94	47,63	157,18	102,40
K máximo	126,47	417,34	271,91	1770,54	5842,81	3806,67	758,80	2504,06	1631,43
K promedio	46,20	152,45	99,32	646,76	2134,32	1390,54	277,18	914,71	595,94

DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA (km)

Pozos profundos, doble porosidad, condiciones confinadas

Flujos regionales

	K_f								
	n mínimo								
	i mínimo			i máximo			i promedio		
	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom
K mínimo	1,62	1,99	1,81	22,74	27,89	25,32	9,75	11,95	10,85
K máximo	9192,74	11274,12	10233,43	128698,42	157837,68	143268,05	55156,46	67644,72	61400,59
K promedio	16,67	20,44	18,55	233,34	286,17	259,76	100,00	122,65	111,32
	n máximo								
K mínimo	0,54	0,66	0,60	7,55	9,26	8,41	3,24	3,97	3,97
K máximo	2,48	3,04	2,76	34,70	42,56	38,63	14,87	18,24	18,24
K promedio	0,36	0,44	0,40	5,06	6,21	5,64	2,17	2,66	2,66
	n promedio								
K mínimo	0,81	0,99	0,90	3,40	4,17	3,79	1,46	1,79	1,62
K máximo	4,96	6,08	5,52	20,81	25,53	23,17	8,92	10,94	9,93
K promedio	2,79	3,42	3,10	11,70	14,35	13,03	5,02	6,15	5,58
	$K_t = K_f + K_m$								
	n mínimo								
K mínimo	1,66	2,04	1,85	23,31	28,59	25,95	9,99	12,25	11,12
K máximo	194719,27	238806,36	216762,23	2726069,71	3343289,04	3034671,22	1168315,59	1432838,16	1300573,38
K promedio	320,35	392,88	356,62	4484,92	5500,37	4992,63	1922,11	2357,30	2139,70
	n máximo								
K mínimo	0,55	0,68	0,62	7,74	9,49	8,62	3,32	4,07	3,69
K máximo	52,50	64,39	58,44	734,99	901,40	818,19	314,99	386,31	350,65
K promedio	35,29	43,28	39,29	494,10	605,97	550,04	211,76	259,70	235,73
	n promedio								
K mínimo	0,83	1,02	0,92	11,62	14,25	12,94	4,98	6,11	5,54
K máximo	104,97	128,74	116,85	1469,58	1802,31	1635,94	629,82	772,42	701,12
K promedio	63,58	77,98	70,78	890,14	1091,68	990,90	381,49	467,86	424,67

Flujos intermedios

	K_f								
	n mínimo								
	i mínimo			i máximo			i promedio		
	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom	edad min	edad max	edad prom
K mínimo	0,31	1,01	0,66	4,29	14,16	9,23	1,84	6,07	3,95
K máximo	1734,48	5723,80	3729,13	24282,72	80133,13	52207,85	10406,88	34342,77	22374,79
K promedio	3,14	10,38	6,76	44,03	145,29	94,66	18,87	62,27	40,57
	n máximo								
K mínimo	0,10	0,34	0,22	1,42	4,70	3,06	0,61	2,02	1,31
K máximo	0,47	1,54	1,01	6,55	21,61	14,08	2,81	9,26	6,03
K promedio	0,07	0,23	0,15	0,96	3,15	2,05	0,41	1,35	0,88
	n promedio								
K mínimo	0,15	0,50	0,33	0,64	2,12	1,38	0,28	0,91	0,59
K máximo	0,94	3,09	2,01	3,93	12,96	8,44	1,68	5,55	3,62
K promedio	0,53	1,73	1,13	2,21	7,29	4,75	0,95	3,12	2,03
	$K_t = K_f + K_m$								
	n mínimo								
K mínimo	0,31	1,04	0,68	4,40	14,51	9,46	1,88	6,22	4,05
K máximo	36739,44	121240,39	78989,80	514352,16	1697365,39	1105857,14	220436,64	727442,31	473938,78
K promedio	60,44	199,46	129,95	846,21	2792,50	1819,35	362,66	1196,79	779,72
	n máximo								
K mínimo	0,10	0,34	0,22	1,46	4,82	3,14	0,63	2,07	1,35
K máximo	9,91	32,69	21,30	138,68	457,63	298,16	59,43	196,13	127,78
K promedio	6,66	21,97	14,32	93,23	307,65	200,44	39,95	131,85	85,90
	n promedio								
K mínimo	0,16	0,52	0,34	2,19	7,24	4,71	0,94	3,10	2,02
K máximo	19,81	65,36	42,58	277,28	915,02	596,15	118,83	392,15	255,49
K promedio	12,00	39,59	25,79	167,95	554,24	361,09	71,98	237,53	154,75