



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Química

**Caracterización Hidrogeoquímica del Agua
Subterránea del Valle de Querétaro para el
Estudio de Sistemas de Flujo**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias Ambientales

Presenta:

I.BQ. José Pérez Villarreal

Centro Universitario
Santiago de Querétaro, Querétaro
Agosto de 2008
México



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL VALLE DE QUERÉTARO PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS DE FLUJO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

I.BQ. JOSÉ PÉREZ VILLARREAL

ASESOR:

DRA. DORA CELIA CARREÓN FREYRE

SINODALES:

Dra. Dora Celia Carreón Freyre
Presidente

Dr. Guillermo Cabrera López
Secretario

Dra. Maricela González Leal
Vocal

Dra. Minerva Ramos Gómez
Suplente

Dr. Alejandro Carrillo Chávez
Suplente

Q.B. Magali E. Aguilar Ortiz
Director de la Facultad de Química

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de investigación y Posgrado

RESUMEN

Los niveles piezométricos medidos en el acuífero del Valle Querétaro de los últimos 40 años registran descensos de más de 100 m, con un promedio de 120 m. La variación espacial de las condiciones de descenso evidencia la existencia de un sistema acuífero determinado por la estratigrafía del subsuelo, donde las fallas y fracturas pueden actuar como barreras o canales de flujo. Estudios previos han reportado que el acuífero del Valle de Querétaro es multicapa, profundo, con interacciones de secuencias granulares y fracturadas. Para este trabajo 60 muestras de agua de 38 sitios del acuífero fueron caracterizadas. Las propiedades físico-químicas fueron medidas en campo y los aniones cationes y algunos elementos traza se cuantificaron en el laboratorio. En ocho pozos de monitoreo se muestreo agua subterránea en dos profundidades y durante tres periodos de tiempo. Los resultados de iones mayores (diagramas de Piper y Stiff) indican que la mayoría de las aguas son bicarbonatadas-sódico-potásicas, lo que es indicativo de aportes de aguas profundas. Los sólidos disueltos y la conductividad eléctrica de las muestras evidencian que existía un sistema de flujo somero y libre que fluía hacia el centro del Valle de Querétaro hace más de 50 años, coincidiendo con estudios anteriores de evolución piezométrica del acuífero en el hecho de que se esta extrayendo agua de reservorios más profundos. La actividad hidrotermal y los patrones en la caracterización química del agua subterránea en zonas aledañas a discontinuidades geológicas indican que las fallas y fracturas determinan el flujo. El diagrama de Piper, junto con el análisis de clusters e índices de correlación, permitieron establecer una relación entre la estratigrafía y la composición química del agua subterránea. Al caracterizar agua subterránea de un mismo sitio en tres periodos diferentes se detectaron ciertos cambios en su composición química. La información aportada en este estudio demuestra que en acuíferos complejos, los registros piezométricos no son suficientes para determinar los sistemas de flujo de agua subterránea. La implementación de un monitoreo de las características químicas y físicas del acuífero dentro del marco geológico específico de la zona de estudio ha probado ser adecuado para el entendimiento de los sistemas de flujo en ambiente complejos.

Palabras clave: acuífero, fallas y fracturas, estratigrafía, caracterización química, sistemas de flujo.

SUMMARY

The piezometric levels measured in the aquifer of the Valley of Querétaro for the last 40 years record decrease of more than 100 m, with an average of 120 m. The spatial variation of the declining conditions evidence the existence of an aquifer system determined by the subsurface stratigraphy, where faults and fractures can act as barriers or channels flow. Previous studies have reported that the aquifer of the Valley of Querétaro is multi-layer, deep, with granular and fractured intercalated sequences. In this kind of aquifers the piezometric measurements are not enough to determine groundwater flow directions. For this work 60 water samples of 38 aquifers sites were characterized. The physico-chemical parameters were measured in field and the anions, cations and some trace elements were quantified in the laboratory. In eight monitoring wells groundwater was sampled in two different depths, and during three time periods. The results of major ions (Piper diagrams and Stiff) indicate that most waters are bicarbonate-sodium-potassium, which is indicative of contributions from deep water. The dissolved solids and electrical conductivity of the samples evidence that there was a shallow and free flow system flowing towards the center of Valley of Querétaro more than 50 years ago, consistent with previous piezometric evolution studies in the fact that groundwater is currently being extracted from deeper reservoirs. Hydrothermal activity and chemical patterns of groundwater in areas surrounding geologic discontinuities suggest that faults and fractures determine the groundwater flow. The Piper diagram, along with the **analysis** of clusters, and correlation index allowed to establish a relationship between the stratigraphy and chemical composition of ground water. With the characterization of groundwater from the same site in three different periods some changes were detected in their chemical composition. Information brought in this study demonstrate that in complex, the piezometric record is not enough to determine groundwater flow systems. Implementation of a monitoring of the chemical and physical characteristics of the aquifer with the specific geological setting has proven suitable to understanding flow system mechanism in complex environments.

Keywords: aquifer, faults and fractures, stratigraphy, chemical characterization, flow systems.

DEDICATORIAS

Para mis padres **Carlos Pérez** y **Lidia Villarreal**, quienes siempre han inculcado en mí el valor de la libertad, sobre todo han resaltado la importancia de ser uno mismo y no dejarse envolver por las preocupaciones cotidianas.

A mis hermanos **Israel**, **Carlos** y **Jesús**, quienes con su ejemplo me han enseñado a salir adelante, donde las situaciones en contra pueden convertirse en posibilidades a favor.

A tí **Cynthia Cedillo**, te agradezco ser mi amiga y compañera, ser bastión en los momentos difíciles, por tus consejos en los momentos de duda, por tu apoyo constante, por lo más importante darme tu amor y recibir el mío. Tu apoyo durante todo el desarrollo de mi trabajo de investigación es invaluable, esta tesis es también tuya, gracias.

A **Fco. Javier Pérez Medina** quien me impulsó en la licenciatura becándome a Chiapas, donde la experiencia que viví enriqueció mi visión y me abrió las puertas a Querétaro. Profesor Medina, el cáncer extinguió tu vida, pero no tus enseñanzas ellas viven con nosotros, gracias donde quiera que estés.

A mis amigos del departamento (**Cynthia, Poncho y familia, Beto, Gris, Anita, Nava, Herrejón**) de Michoacán (**Iván, Paco, Salvador, Rafa, Neto, Fernando**), de la UAQ (C. Ambientales y PROPAC), del Centro de Geociencias (CGEO), de la Yoga, en fin, a todos aquellos que de una u otra manera me apoyaron, gracias por su amistad.

A los profesores de la Maestría en Ciencias Ambientales que supieron incentivar en nosotros el deseo de colaborar en la mejora de nuestro entorno ambiental.

De manera muy especial a **Darío, Gris, Rocío, Jaime, Pablo, Adriana, Rubén, Francisco, Sagrario** y **Lizbeth**, compañeros de estudio con los que compartimos más que un salón de clases. Deseo resaltar que gracias a ustedes el aprendizaje no solo fue alumno-maestro, ya que debido a las experiencias de cada uno también fue alumno-alumno.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la vida el haberme permitido estar aquí en Querétaro, lugar donde viví experiencias amargas y gratas, más sin embargo llegar al momento de finalización de esta tesis lo justifica todo. Compañeros nunca hay que dejar de soñar, y que mejor que vivir nuestros sueños, sigamos adelante.

A mi asesora Dra. **Dora Carreón Freyre**, por confiar en mí sin conocerme antes, por mostrarme su lado humano, por darme la libertad de trabajo con la que trabajé gratamente, muchas gracias.

A mis sinodales Dr. **Guillermo Cabrera**, Dra. **Maricela González**, Dra. **Minerva Ramos** y Dr. **Alejandro Carrillo**, por sus aportaciones que permitieron mejorar y enriquecer el presente trabajo de tesis.

A mis compañeros del CGEO de la UNAM (en especial **Ignacio, Andrés, Rodrigo, Rodo, Ricardo, Gil, Dora, Mariano**), por su amistad que permitió formar un grato equipo de trabajo.

A los compañeros de los laboratorios del CGEO, geoquímica ambiental (**Carolina y Juan**) espectrometría de masas (**Ofelia**) y preparación de muestras (**Fabián y Ricardo**), por apoyarnos en el análisis químico de las muestras de agua subterránea.

Esta tesis es el resultado del esfuerzo de mucha gente (compañeros del departamento, de la UNAM, de la Comisión Estatal y Nacional del Agua, de la Maestría en Ciencias Ambientales de la UAQ, etc.), les agradezco profundamente su ayuda.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca que me fue otorgada durante dos años, permitiéndome concentrarme en mis estudios de maestría. De igual manera agradezco el apoyo económico de la beca otorgada a través del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología, lo que me permitió finalizar la presente tesis.

También le agradezco a todas las personas que de manera sutil nos apoyan y quienes muchas veces no aparecen en la obra, pero son los que montan el escenario (personal administrativo, académico y de limpieza de la UAQ).

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA	3
2.1 Uso del agua subterránea en el Valle de Querétaro	3
2.2 Condiciones geológicas del acuífero del Valle de Querétaro	5
2.2.1 Hidrogeología local	7
2.2.2 Evolución piezométrica	8
2.3 Hidrogeoquímica del agua	11
2.3.1 Estudio de los sistemas de flujo	12
2.3.2 Parámetros físico-químicos	14
2.3.3 Iones mayores, menores y elementos traza	16
2.3.4 Análisis químico	22
2.3.5 Interpretación de la información	23
2.3.5.1 Métodos gráficos	23
2.3.5.2 Métodos estadísticos	26
2.4 Tipos de pozos en monitoreo	28
2.4.1 Pozos testigo	28
2.4.2 Pozos piloto	28
HIPÓTESIS	29
OBJETIVOS	29
Objetivo general	29
Objetivos específicos	29
III. METODOLOGÍA	30
3.1 Trabajo de campo	30

3.1.1	Selección de los pozos para muestreo	30
3.1.2	Técnicas de muestreo	30
3.1.3	Medición de parámetros en campo	31
3.1.4	Preservación y transporte de la muestra	33
3.2	Trabajo de laboratorio	34
3.2.1	Análisis químico	34
3.2.1.1	Aniones	34
3.2.1.2	Cationes	34
3.2.1.3	Elementos traza	34
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1	Ubicación de los sitios en estudio	35
4.1.1	Mapa de la zona de estudio	35
4.1.2	Litologías tipo de los pozos en estudio	36
4.2	Análisis químicos y físico-químicos	38
4.3	Caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea	40
4.4	Condiciones de flujo	44
4.4.1	Relación entre la caracterización química del agua subterránea y las herramientas estadísticas con la estratigrafía	44
4.4.2	Propiedades físico-químicas del agua subterránea en relación con la estructura del subsuelo y las condiciones de flujo	50
4.4.3	Muestreo a dos profundidades entorno a flujos de agua subterránea	52
4.4.4	Variaciones en las características del agua subterránea en los tres periodos de muestreo y su relación con las condiciones de flujo	57
4.4.5	Flujos locales, intermedios y regionales en el acuífero del Valle de Querétaro	63
V.	CONCLUSIONES	65
VI.	LITERATURA CITADA	67
VII.	APÉNDICES	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Título	Página
1	Usos del agua subterránea en acuíferos del Valle de Querétaro.	3
2	Información demográfica del municipio de Querétaro.	4
3	Geología recopilada de pozos en estudio.	36
4	Resumen de los parámetros medidos para 60 muestras de 38 sitios del Valle de Querétaro.	38
5	Resumen de los índices de correlación en muestras de agua subterránea del Valle de Querétaro.	48
6	Correlación promedio entre los diferentes grupos estratigráficos presentes en el acuífero del Valle de Querétaro.	49
7	Tipos de flujos en los sitios donde se muestreo agua subterránea del acuífero del Valle de Querétaro.	64
8	Coordenadas UTM de los pozos muestreados durante el periodo Junio 2007-Febrero 2008.	72
9	lones mayores de pozos testigos muestreados en Junio 2007, Septiembre 2007 y Diciembre 2007-Febrero 2008.	73
10	lones menores y propiedades físico-químicas de pozos testigos muestreados en Junio 2007, Septiembre 2007 y Diciembre 2007-Febrero 2008.	74
11	Elementos traza de pozos testigos muestreados en Junio 2007, Septiembre 2007 y Diciembre 2007 - Febrero 2008.	75
12	lones mayores de pozos piloto muestreados de Diciembre de 2007-Febrero de 2008.	76
13	lones menores y propiedades físico-químicas de pozos piloto muestreados de Diciembre de 2007-Febrero de 2008.	77
14	Elementos traza de pozos piloto muestreados de Diciembre de 2007-Febrero de 2008.	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Abatimiento del nivel estático del acuífero del Valle de Querétaro.	5
2	Fallas y principales unidades geológicas del Valle de Querétaro.	6
3	Isolíneas que muestran la evolución piezométrica, en 1990 y 2002.	9
4	Configuraciones del descenso de la carga hidráulica para intervalos de 10 años desde 1970 a 2002.	10
5	Ejemplo de un diagrama de Stiff.	24
6	Agua clasificada por medio del diagrama de Piper.	25
7	Ejemplo de un dendograma.	27
8	Ubicación de los pozos piloto y testigo en el Valle de Querétaro.	35
9	Grupos litológicos característicos del Valle de Querétaro.	37
10	Diagrama de Piper del agua subterránea proveniente de diferentes sitios del Valle de Querétaro.	41
11	Ampliación del diagrama de Piper.	42
12	Diagramas de Stiff de los principales tipos de agua encontradas en el acuífero del Valle de Querétaro.	43
13	Grupos estratigráficos en el diagrama de Piper.	45
14	Grupos estratigráficos en el diagrama de clusters.	47
15	Distribución de la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, pH y diagramas de Stiff en diferentes sitios del Valle de Querétaro.	51
16	Diagrama de Piper de los pozos muestreados a dos diferentes profundidades.	54
17	Diagramas de Stiff de los pozos testigo muestreados en Junio de 2007 a dos profundidades.	55

18	Variación en la conductividad eléctrica, sólidos disueltos y pH, en dos rangos de profundidad por debajo del nivel estático.	56
19	Diagrama de Piper de los ocho pozos testigo muestreados en tres periodos de tiempo.	60
20	Diagramas de Stiff de los pozos testigo muestreados en Junio 2007, Septiembre 2007 y Diciembre 2007 a Febrero 2008.	61
21	Variación en la conductividad eléctrica, sólidos disueltos y pH, en tres periodos de muestreo.	62
22	Distribución de la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, pH, diagramas de Stiff y perfil piezométrico en el Valle de Querétaro.	82

I. INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso más importante para realizar las actividades del ser humano y sustentar la vida del entorno natural. Existen cuerpos de agua tanto en la superficie terrestre como en el subsuelo. Al agua que se obtiene del subsuelo se le denomina subterránea, y es aquella que se extrae de cuerpos geológicos saturados de este líquido (acuíferos). Los acuíferos se recargan de lluvia, nieve derretida, arroyos, entre otros, desde los cuales el agua se infiltra de la superficie hacia el subsuelo. El suministro de agua proveniente de los acuíferos es muy importante, puesto que la mayoría del agua dulce en estado líquido presente en el planeta se encuentra bajo el subsuelo. Actualmente, el agua subterránea se ha vuelto la fuente más importante de este vital líquido, México no es la excepción. Tal es el caso del Valle de Querétaro, el cual ha recurrido casi completamente al agua subterránea para suplir sus necesidades. A causa del acelerado crecimiento de la población y de las actividades en el Valle de Querétaro, las necesidades de agua subterránea se han incrementado de igual manera, y con ello la problemática asociada a su extracción (CEA-UAQ, 2002; CQRN, 2003). Según datos de la Comisión Estatal de Agua (CEA), se extraen del subsuelo anualmente cerca de $103 \times 10^6 \text{ m}^3$ del recurso hídrico cada año, y se estima que hay una recarga de $70 \times 10^6 \text{ m}^3$, por lo que existe un déficit de $33 \times 10^6 \text{ m}^3$, lo cual ocasiona un abatimiento anual del acuífero del rango de 1 a 4 m llegando a alcanzar hasta 6 m en algunos sitios. Este abatimiento del nivel estático ha creado la necesidad de entender el comportamiento del agua en el acuífero para una mejor gestión del recurso hídrico.

Las investigaciones previas realizadas en el Valle de Querétaro se han enfocado al estudio de las características del subsuelo y a correlacionar los movimientos del agua subterránea con la estratigrafía (Carreón *et al.*, 2005), incluso algunos estudios han aplicado modelos para simular las condiciones del acuífero (Gutiérrez *et al.*, 2002; Herrera *et al.*, 2007), pero hasta la fecha no se tienen trabajos que relacionen la geología, las direcciones de los flujos del recurso hídrico y la química del agua en un solo estudio que integre los conocimientos de varias disciplinas para tener un mejor entendimiento del

acuífero. La hidrogeoquímica es una herramienta que une los conocimientos anteriormente mencionados puesto que permite caracterizar el agua subterránea y aporta información para el estudio de las relaciones entre los diferentes sitios de muestreo (en sentido vertical y horizontal) del sistema acuífero. Cuando esta metodología se aplica en una secuencia de tiempo (en varias ocasiones durante un periodo establecido), se evalúa la evolución de las características químicas del recurso hídrico. Los estudios hidrogeoquímicos se basan en la medición de iones (mayores y menores), elementos traza y características físico-químicas del agua subterránea, para establecer patrones de comportamiento comunes entre muestras obtenidas de diferentes sitios del acuífero.

Debido a la variedad de parámetros a cuantificar en un estudio hidrogeoquímico, son necesarias diferentes técnicas de medición como lo son la espectroscopia de absorción atómica, la espectrometría de masas y la cromatografía de líquidos, entre otras.

Este estudio es uno de los primeros en implementar el muestreo en pozos desequipados que normalmente no se monitorean. El muestreo en pozos desequipados se pudo llevar a cabo gracias a que se implementó el uso de un muestreador portátil.

La problemática asociada al grado de abatimiento del nivel piezométrico en el acuífero del Valle de Querétaro, justifica investigar el comportamiento del agua en el subsuelo, buscando generar conocimiento de los mecanismos que rigen a los sistemas de flujo.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Uso del agua subterránea en el Valle de Querétaro

Actualmente, el Valle de Querétaro cuenta con una reducida cantidad de agua en cuerpos superficiales, por la cual se ha recurrido casi en su totalidad al subsuelo para satisfacer las demandas del recurso hídrico. La extracción del agua del subsuelo se ve favorecida por la perspectiva de ser un recurso de amplia distribución y abundante. Según datos de la CEA se extraen aproximadamente $103 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua en el acuífero del Valle de Querétaro, datos que coinciden con estudios realizados por el Centro Queretano de Recursos Naturales (CQRN) donde se estima un total de $109 \times 10^6 \text{ m}^3$. De los pozos activos (en 1997), 51.04% se utilizaban uso público urbano (servicios y recreativos), 23.08% para uso agrícola, 18.82% para la industria y 2.09% pecuarios (CQRN, 2003). En datos señalados por Carreón *et al.* (2005), se indica que en el Valle de Querétaro existen aproximadamente 304 pozos activos que explotan agua subterránea a profundidades entre 70 y 300 m de profundidad.

Los estudios efectuados por el CQRN en 2003, indican que los usos del agua subterránea en el Valle de Querétaro han cambiado. Actualmente se destina un mayor porcentaje del agua extraída del subsuelo al uso doméstico (en comparación a años anteriores), situación que contrasta con otros acuíferos del estado, como se indica en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Usos del agua subterránea en acuíferos del Valle de Querétaro (CQRN, 2003).

Acuífero	Púb. y Urb.		Agrícola		Industrial		Pecuario		Total
	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³
Querétaro	69.5	63.7	31.1	28.5	7.9	7.2	1.5	0.5	109
Amazcala	6.5	11.3	49.7	85.6	0	0	1.8	3.1	58
Buenavista	2.7	11.2	20.7	86.3	0	0	0.6	2.4	24
Huimilpan	3.4	19.8	13.2	77.9	0.1	0.5	0.3	1.8	17
Total	85	40.9	111	53.6	8.4	4.0	3.1	1.5	208

Como se muestra en el Cuadro 1 en el Valle de Querétaro se destina un porcentaje alto del recurso hídrico al uso doméstico, debido al crecimiento de la población.

Cuadro 2. Información demográfica del municipio de Querétaro (CQRN, 2003).

Concepto	Unidad	Valor
Superficie del municipio	Km ²	759.9
Fracción territorial en el estado	%	6.5
Población en 1990	habitantes	456 458
Población en 1995	habitantes	559 222
Población en 2000	habitantes	639 839

Si asociamos que el número de habitantes en el Valle de Querétaro sigue en aumento (con el hecho de que esto genera la necesidad de una mayor extracción de agua del subsuelo para satisfacer las exigencias de la población), se puede dilucidar el tamaño de la problemática asociada al descenso generalizado del nivel estático en el acuífero. Datos proporcionados por la CEA manifiestan la tendencia en el abatimiento del nivel de agua en el acuífero del Valle de Querétaro. La Figura 1 muestra el abatimiento general del nivel estático en el acuífero. El abatimiento del nivel estático en el Valle de Querétaro no es uniforme, esto es evidencia de que en el Valle de Querétaro no existe un acuífero, sino un sistema acuífero.

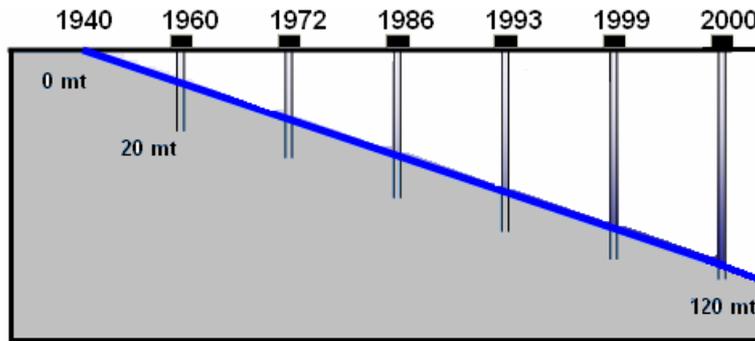


Figura 1. Abatimiento del nivel estático del acuífero del Valle de Querétaro (CEA, 2002).

2.2 Condiciones geológicas del acuífero del Valle de Querétaro

La zona que comprende al Valle de Querétaro es definida como una cuenca sedimentaria resultado del hundimiento producido por un sistema de fallas escalonadas debido a esfuerzos distensivos en dirección al poniente y oriente, con fallas ordenadas con orientación noreste-sureste. El Valle de Querétaro está delimitado por fallas regionales (Aguirre *et al.*, 1998; Carreón *et al.*, 2005), se encuentra a una presenta un rango de 1790 a 1800 m sobre el nivel del mar (msnm). El basamento (rocas que forman la base del acuífero) del Valle de Querétaro está formado por rocas sedimentarias marinas, calizas, calizas arcillosas, lutitas y lutitas calcáreas en estratos delgados. El paisaje geológico del Valle es típicamente volcánico, donde se presentan contrastes geomorfológicos asociados a la variada composición de las rocas que de manera general forman un relleno de sedimentos aluviales, flujos de lava y depósitos vulcanoclásticos lacustres de aproximadamente 100 m de espesor según la zona. Un esquema transversal de la geología del Valle de Querétaro donde se muestra la estratigrafía (variación de las estructuras del material rocoso con la profundidad) correspondiente se presenta en la Figura 2a.

2.2.1 Hidrogeología local

El acuífero del Valle de Querétaro se encuentra dentro de los municipios de Santiago de Querétaro, Corregidora y una pequeña zona de El Marqués. Datos del CQRN (2003), afirman que dicho acuífero abarca una zona de 484 km². Este acuífero se considera sobreexplotado, puesto que se calcula que se extrae 30% más agua que de la que se recarga, donde su descenso anual del nivel estático alcanza de 1 a 4 m y en algunas zonas hasta 6 m. Herrera-Zamarrón *et al.* (2007) han documentado los efectos del abatimiento del nivel estático y señalan que la continua disminución de los niveles estáticos ha originado la cancelación de los volúmenes de agua descargados a través de manantiales, disminuyendo también el escurrimiento de los cauces. Señalan además, que cuando el nivel freático disminuyó y alcanzó las capas de conductividad hidráulica baja, el acuífero varió en algunas zonas de libre a confinado y se definieron dos sistemas de flujo subterráneo, uno local y otro intermedio.

Estudios realizados por Carreón *et al.* (2005), definen el modelo conceptual (comprensión del medio físico y su relación con el flujo subterráneo) del acuífero del Valle de Querétaro, como un sistema multicapa de tipo granular y fracturado, de permeabilidad baja a media. Se considera que las capas sedimentarias con alto contenido de limo y arcillas funcionan como acuitardos que confinan localmente unidades acuíferas, y el amplio espesor de la zona no saturada (mayor a 100 m) ocasiona retardos importantes en el flujo del agua infiltrada, retardando la recarga del acuífero. El nivel estático del acuífero va de 60 a 250 m, cuenta con un basamento impermeable con topografía irregular, que puede llegar a alcanzar 600 m de profundidad. Los estudios efectuados por Carreón *et al.* (2005), evidencian que en el Valle de Querétaro existe un sistema acuífero con flujo local y regional, proponiendo la existencia de seis unidades hidroestratigráficas.

2.2.2 Evolución piezométrica

La piezometría permite localizar la profundidad a la que se encuentra la saturación del subsuelo. El análisis piezométrico permite reconocer zonas con problemas de extracción. De forma general, la profundidad histórica de los niveles piezométricos define la dirección del flujo subterránea, ayudando a asociar permeabilidades por cambios de las litologías, texturas, gradientes y cargas hidráulicas (Paces *et al.*, 2002).

Dada la necesidad de agua subterránea en el Valle de Querétaro, se han realizado estudios que aportan información de la piezometría histórica. Gutiérrez *et al.* (2002), señalan que en el año de 1930 la explotación del agua se realizaba de alumbramientos someros con baja capacidad de extracción y que la condición de equilibrio recarga-extracción del acuífero se mantuvo hasta la década de 1940. Durante el periodo de 1970 a 1986 hubo abatimientos de 5 m hasta mayores de 35 m, donde las profundidades del nivel estático se encontraban entre 50 y 70 m.

Carreón *et al.* (2005), describen la piezometría histórica del acuífero del Valle de Querétaro, información recopilada de los pozos durante el periodo de 1970 a 2003. Una vez que se tienen las medidas piezométricas se pueden trazar isolíneas. Las isolíneas son líneas que indican zonas con la misma carga hidráulica (profundidad del agua subterránea), y se forman al trazar líneas en zonas donde se espera que el agua subterránea esté a la misma profundidad. A partir de las isolíneas se forman las líneas de flujo. Las líneas de flujo son perpendiculares a las curvas equipotenciales e indican los movimientos del agua subterránea que van de las zonas de mayor a menor carga hidráulica. A partir de las isolíneas y de las líneas de flujo se trazan mapas. Para el caso del Valle de Querétaro Carreón *et al.*, han elaborado los mapas de isolíneas que aparecen en la Figura 3. De la piezometría del acuífero del Valle de Querétaro Carreón *et al.* (2005), realizaron mapas (Figura 4), que indican los descensos de la carga hidráulica de manera histórica y aparecen diferentes conos de abatimiento (zonas hacia donde convergen las líneas de flujo).

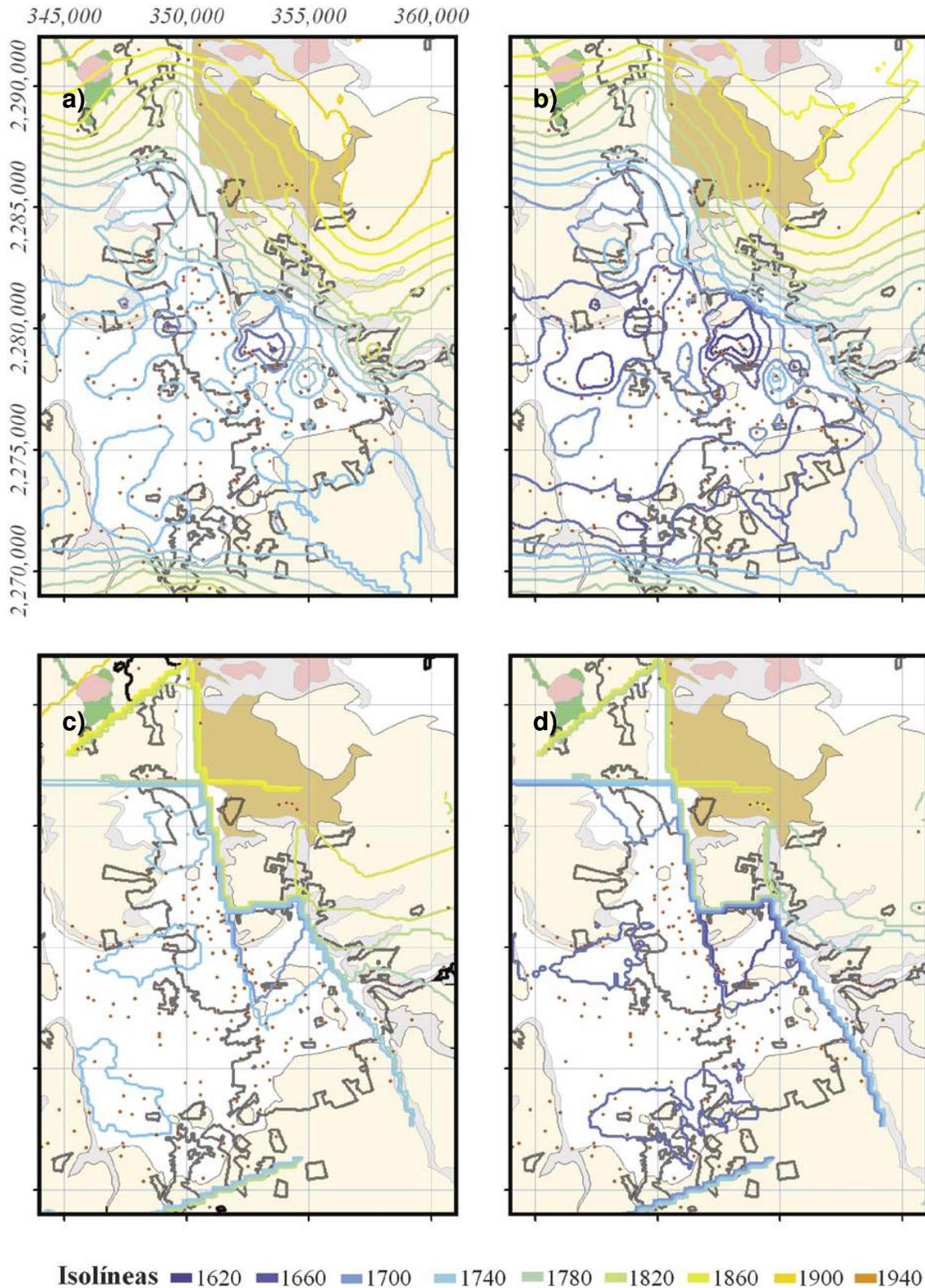


Figura 3. Isolíneas que muestran la evolución piezométrica, en 1990 con sus coordenadas UTM (a), y 2002 (b). En las figuras 3c y 3d se muestran las isolíneas en un medio discontinuo tomando como fronteras las fallas y fracturas, para los periodos 1990 y 2002, respectivamente (Carreón *et al.*, 2005).

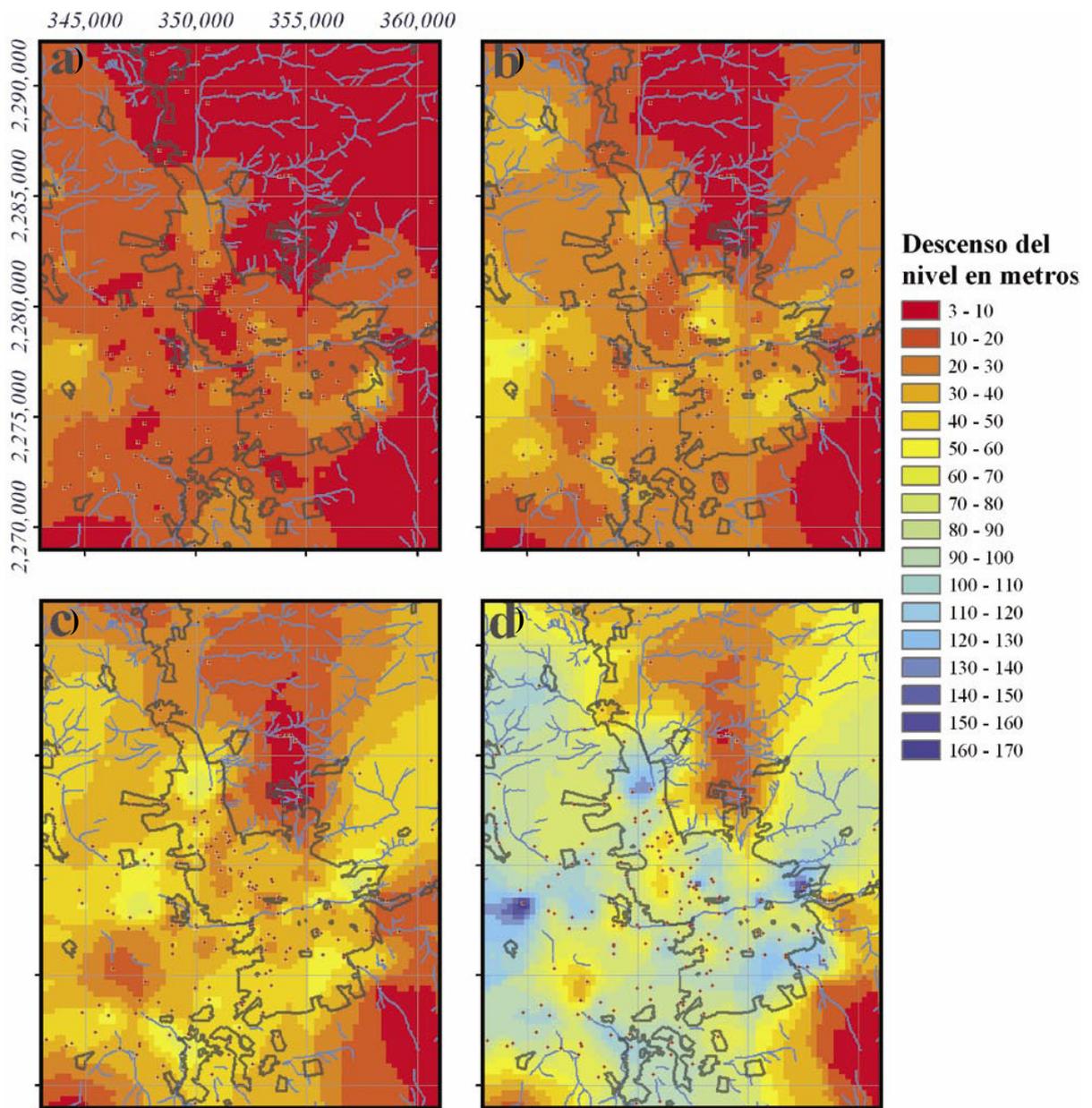


Figura 4. Configuraciones del descenso de la carga hidráulica para intervalos de 10 años desde 1970 a 2002: (a) 1970-2002 con sus coordenadas UTM, (b) 1980-1990 y (c) 1990-2002. La figura 4d muestra el descenso total de 1970 a 2002 (Carreón *et al.*, 2005).

2.3 Hidrogeoquímica del agua

De acuerdo a los estudios efectuados por Custodio y Llamas (1996), la hidrogeoquímica es una conjunción de las ciencias que estudian la relación de las propiedades físico químicas del agua con la geología regional y su evolución con el tiempo, además investiga los mecanismos que definen los tipos y cantidades de especies químicas en el agua en función de la interacción con cuerpos geológicos (Cánovas *et al.*, 2007). La interacción del agua se debe a que es una sustancia química muy activa con facilidad de disolver y reaccionar con otras especies inorgánicas y orgánicas. Las características descritas con anterioridad se deben a que la molécula de agua es heteronuclear y los enlaces hidrógeno – oxígeno son de tipo covalente polar, lo que le provee un momento dipolar grande y una constante dieléctrica elevada que le da un gran poder solvente, impidiendo así que las sustancias que se disuelven en ella conserven sus moléculas intactas. De esta manera, cuando un soluto se dispersa en el agua cada extremo de la molécula de la sustancia es atraído por el dipolo de carga opuesta al del agua. La capacidad de disolución y su reactividad ocasiona que el agua adquiera sustancias disueltas conforme va transcurriendo por el ciclo hidrológico (gases, sólidos u otros líquidos), y sus características se modifican. Por lo tanto, las aguas subterráneas son soluciones cuyo carácter químico depende de la naturaleza y proporción de las sustancias contenidas (Convoy y Goss, 2000).

En México, se han efectuado diferentes estudios hidrogeoquímicos como los realizados en el estado de Yucatán (Pacheco-Avila *et al.*, 2004) y en el puerto de Veracruz (Flores *et al.*, 2005) con diferentes fines. En Yucatán, el estudio tuvo como objetivo caracterizar el agua subterránea tanto química como bacteriológicamente (Pacheco *et al.*, 2004). En Veracruz se buscó determinar la evolución de la calidad del agua subterránea, con especial interés en la búsqueda de posibles intrusiones salinas en el acuífero. Tanto para Yucatán como Veracruz, la interpretación de los resultados obtenidos por medio de los estudios hidrogeoquímicos fueron las herramientas para responder a las incógnitas planteadas. En nuestro caso se recurre a los estudios hidrogeoquímicos para determinar la relación de la dirección de los flujos de agua en el subsuelo en base a sus características físico-químicas.

2.3.1 Estudio de los sistemas de flujo

El estudio del flujo del agua dentro del subsuelo ha evolucionado conforme una mayor cantidad de argumentos se han incorporado a los modelos planteados. Los modelos más sencillos para determinar los flujos del agua subterránea consideran sólo los perfiles piezométricos donde el movimiento ocurre de las zonas de mayor hacia menor carga hidráulica. Los modelos anteriormente mencionados pueden tener grandes errores si no consideran el marco hidrogeoquímico y geológico específico de la zona de estudio. Actualmente, los estudios enfocados al agua subterránea consideran modelos con mayor cantidad de variables, evidencia de ello es el artículo publicado en 1989 por Schlehuber *et al.*, investigación realizada en el Valle de San Jacinto (Riverside, California) donde se recurre al análisis de los niveles del agua y la química para deducir patrones de flujo mencionando la influencia que ejercen las fallas y fracturas. Otro estudio realizado en Nueva Zelanda por Eser y Rosen en 1999, recurre también a estudios hidrológicos e hidroquímicos, dentro del marco estratigráfico de la zona, para determinar el flujo del agua subterránea. Ciertamente los perfiles piezométricos tienen aún gran importancia en la conclusión final.

En lo concerniente al Valle de Querétaro en 2005 Carreón *et al.* estudiaron el efecto de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo del agua subterránea, donde se encontró una fuerte influencia de las fallas y fracturas en el comportamiento piezométrico del acuífero, incluyendo un estudio de isótopos ambientales para determinar antigüedad del agua en diferentes zonas, sus resultados evidenciaron la existencia de un sistema acuífero. Cooke *et al.*, en un artículo publicado en 2006, resaltan la importancia de la estratigrafía así como las fallas y fracturas en los sistemas de flujo del agua subterránea. Ciertamente, los estudios actuales utilizan las herramientas de la hidrogeoquímica para fines diversos como delimitar acuíferos (Connair y Murray, 2002), estudiar la interacción del agua con la roca (Gi-Tak *et al.*, 2006) o monitorear la hidrodinámica de acuíferos (Barbieri *et al.*, 2005), entre otras funciones. Entre estas investigaciones el uso de isótopos (Gupta *et al.*, 2005; Leybourne *et al.*, 2006; Petelet-Giraud *et al.*, 2007) y concentraciones de elementos traza (Chi-

Man y Jiao, 2006; Cánovas *et al.*, 2007; Silliman *et al.*, 2007), suelen ser comunes. Estas investigaciones coinciden en el procedimiento de la toma, procesamiento y análisis de la muestra; A este respecto, Santoyo *et al.* (2000) describen detalladamente la metodología. Otro rasgo común entre las diferentes publicaciones es la búsqueda de la certeza de las mediciones, por ello en campo se mide pH, conductividad, potencial redox, oxígeno disuelto, temperatura, alcalinidad y sólidos totales disueltos (Schiavo *et al.*, 2006). Una vez que se tienen los resultados de los análisis químicos de las muestras de agua se busca como procesar los datos (McNellis *et al.*, 1968). Herramientas útiles para el manejo de los datos incluyen utilizar gráficas para representar los resultados de laboratorio (principalmente iones mayores), como lo son los diagramas de Piper, Stiff, Collins, Schoeller, diagramas de rectángulo etc, como lo señala D'Amore (1983). Guler *et al.* (2002) señalan que para un entendimiento más detallado de los datos es necesaria la estadística. Autores como Melloul y Collin (1992), y Farnham *et al.* (2003), resaltan el uso de técnicas estadísticas como el análisis de clusters. El análisis de clusters es una técnica para agrupar datos individuales según su similitud (Hussain *et al.*, 2008). También se han desarrollado índices estadísticos para determinar el grado de correlación entre diferentes muestras, uno de ellos es el desarrollado por Tien-Chang (1998), el cual relaciona grupos en base a dicho parámetro. En el marco de la interpretación de los datos se han desarrollado programas que auxilian en la interpretación. Por ejemplo Izbicki *et al.* (2004) se apoyaron en modelos computacionales para simular el movimiento de partículas en un acuífero de California, mientras que Fairchild (2006) modeló la hidrogeoquímica en relación a la infiltración de agua en un acuífero. También la hidrogeoquímica con las herramientas computacionales y estadísticas, tiene diversas aplicaciones, desde estudiar el comportamiento de elementos raros en el agua (Gammons *et al.*, 2005), hasta determinar cantidades basales de elementos traza en acuíferos (Lee y Helsel, 2005) y para caracterizar por medio de isótopos las recargas de un acuífero (Dotsika *et al.*, 2006 ; Palmer *et al.*, 2007).

Para el estudio de los sistemas de flujo de agua subterránea, se recurre a la información piezométrica y geológica para unificarla con los resultados de los análisis químicos y físico-químicos del agua subterránea colectada en diferentes

sitios del acuífero, y así por medio de las herramientas gráficas y estadísticas se buscan patrones de similitud.

2.3.2 Parámetros físico-químicos

En el estudio del agua subterránea los parámetros físicos y físico-químicos aportan información para su caracterización.

a) Potencial de hidrógeno (pH)

El pH del agua es la medida de la alcalinidad y acidez e indica la concentración de los iones hidrógeno (H^+) y se mide en una escala logarítmica con rango de 0-14. Las mediciones de este parámetro se consideran más exactas cuando se realizan en campo durante la toma de muestra, debido a que el pH puede modificarse con el transcurso del tiempo a causa de cambios de temperatura, escape o incorporación de gases (Palmer, 2007). El pH describe en forma general la composición del agua. Las sustancias disueltas alteran el pH natural del agua. Un pH de 7 indica que el agua es neutra, a valores menores indica acidez y valores mayores un carácter básico (Mazor, 1991). De manera natural la mayoría de las aguas subterráneas tienen un pH que varía entre 6.5 y 8.

b) Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene el agua para conducir electricidad. La conductividad se mide en microsiemens por centímetro ($\mu S/cm$) ó microohms/cm ($\mu\Omega^{-1}/cm$). La conductividad aumenta con la temperatura ($2\%/^{\circ}C$), por lo que se mide sobre una temperatura de referencia ($18^{\circ}C$ o $25^{\circ}C$). Mientras más iones hay en el agua mayor es su conductividad. También influyen en la conductividad el tipo de iones (carga eléctrica, estado de disociación, movilidad, entre otras). La conductividad en aguas dulces puede variar entre 100 y 2000 $\mu S/cm$ (Custodio y Llamas, 1996).

c) Sólidos disueltos

El agua es un solvente capaz de disolver la mayoría de los sólidos en algún grado. De la mayoría de solutos encontrados en el agua subterránea, sólo

una parte pequeña están presentes en una cantidad mayor a 1 ppm, bajo condiciones naturales típicas (Deutsch *et al.*, 1997). De los sólidos disueltos en el agua, los iones mayores ocupan de 97-99% del total, los menores de 1-3% y los traza alrededor de 0.1% (Freeze y Cherry, 1979; Deutsch *et al.*, 1997). Es importante resaltar que la abundancia relativa de los elementos que componen a los sólidos disueltos en el agua subterránea depende de su movilidad química (Singhal y Gupta, 1999). Conforme el agua subterránea migra en el subsuelo de las zonas de recarga a las zonas de descarga, cambia su composición química al disolver pequeñas cantidades de materiales que encuentra en su camino, aumentando la cantidad de sólidos disueltos que contiene (Kehew, 2001).

d) Potencial redox (Eh)

El potencial redox mide la tendencia de un sistema a oxidar ó reducir una especie química. Los sistemas redox están en relación directa con el pH, el oxígeno disuelto, la presión y la temperatura. El Eh es muy importante en los procesos de disolución de sales por el ataque del agua a los minerales, ya que las especies químicas pueden cambiar su estado de valencia, oxidándose unas veces y reduciéndose otras. En el agua subterránea el pH y el Eh existentes no permiten la liberación de O₂ ni de H₂ (Eh entre +0.700 y – 0.480 voltios). Los posibles oxidantes en el agua del subsuelo son el O₂ tomado del aire, Fe⁺³, SO₄⁻², NO₃⁻ y Fe(OH)₂.

El Eh se mide electromecánicamente utilizando un electrodo de referencia, se debe determinar siempre en campo, ya que pequeños cambios en las condiciones ambientales pueden producir importantes cambios en su valor.

e) Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en el agua tiene las capacidades de producir un medio oxidante y de solubilizar ó insolubilizar iones, además juega un papel importante en la actividad de los microorganismos. El oxígeno se consume con facilidad si existen sustancias oxidables, como la materia orgánica, Fe⁺⁺, NH₄⁺, NO₂⁺, entre otros, en especial por acción biológica, también su descenso se asocia a la oxidación de rocas. El oxígeno disuelto depende de la presión, la temperatura (al aumentar la temperatura disminuye su solubilidad) y la salinidad. La edad del agua se asocia con la cantidad de oxígeno disuelto, conforme

avanza el tiempo menos oxígeno tiene. La contaminación de cuerpos de agua por drenajes o materia orgánica resulta en un consumo del oxígeno disuelto. En la mayoría de las aguas subterráneas las concentraciones de oxígeno disuelto están entre 0 y 5 partes por millón (ppm), frecuentemente 2 ppm (Custodio y Llamas, 1996).

f) Temperatura

Aunque la temperatura del agua no es una característica química, afecta algunas de las propiedades geoquímicas (como la solubilidad de gases y minerales). Sus mediciones deben ser determinadas directamente en campo (Deutsch *et al.*, 1997), aunque existen aproximaciones a las temperaturas dentro de un acuífero por medio de los geotermómetros (Méndez-Ortiz, 2007). La temperatura del agua subterránea está relacionada con la profundidad (aumentando aproximadamente 1°C por cada 100 m de profundidad). Fallas y fracturas pueden generar actividad hidrotermal, aumentando la temperatura del agua subterránea.

2.3.3 Iones mayores, menores y elementos traza

Los iones mayores componen entre el 97-99 % de los sólidos disueltos en el agua subterránea, los iones menores del 1-3 %, y los elementos traza menos del 0.1 %. En estudios hidrogeoquímicos se cuantifican los aniones mayores (Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- y CO_3^{2-}) y cationes mayores (Na^+ , K^+ , Mg^{+2} y Ca^{+2}), para caracterizar el agua. También es común determinar los iones menores (en este estudio F^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y Br^-). Los elementos traza están en cantidades muy pequeñas en relación al total de sustancias disueltas en el agua, y se analizan cuando de manera específica hay un interés en ellos (en este caso Li^+ , Mn, Fe, As y Pb) (Kehew, 2001).

a) Cloruros (Cl^-)

Se encuentra de manera natural en todas las aguas subterráneas en concentraciones bajas (menor que los sulfatos y bicarbonatos), aunque su contenido llega a aumentar por contaminación antropogénica o debido a la evolución natural del agua. El ión cloruro no forma sales de baja solubilidad,

además no se oxida ni reduce en aguas naturales, tampoco es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de los procesos bioquímicos, por lo que se le considera un buen trazador. Los valores de concentraciones más frecuentes en agua se encuentran en un rango de 10 a 250 ppm, aunque lo común es que se aproxime a 20 ppm en líquido extraído del subsuelo (Custodio y Llamas, 1996). La NOM-127-SSA1-1994 (salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización) establece un límite permisible (lp) de 250 ppm.

b) Sulfatos (SO_4^{-2})

El ión sulfato procede del lavado de materiales sedimentarios salinos, de la oxidación de sulfuros, de la descomposición de sustancias orgánicas, entre otros. La disolución de yeso (anhidrita) proporciona la mayor cantidad de sulfatos al agua subterránea. El ión sulfato está sujeto a procesos de reducción, en especial cuando hay presencia de bacterias y materia orgánica. Cuando el ambiente es reductor ($\text{pH} < 7$), la forma reducida de H_2S es la más estable, mientras que en soluciones alcalinas predomina HS^- . El agua de zonas de recarga es predominantemente bicarbonatada y conforme evoluciona se transforma a agua sulfatada y finalmente a clorada. Un incremento en los sulfatos puede asociarse a la infiltración de aguas residuales. En aguas dulces, los sulfatos se encuentran en rangos de 2 a 150 ppm, los valores en el agua subterránea son cercanos a 30 ppm (Custodio y Llamas, 1996).

c) Alcalinidad (HCO_3^- y CO_3^{-2})

La alcalinidad es una medida de la capacidad de neutralizar un ácido. La alcalinidad de una solución se determina por medio de una titulación con ácido (comúnmente H_2SO_4) a un pH cercano a 4.5. La alcalinidad se usa para determinar las cantidades de carbonato y bicarbonato en el agua subterránea, bajo la suposición de que otras especies químicas que posiblemente puedan ser tituladas simultáneamente se consideran mínimas. Hay que tener cuidado con la anterior suposición debido a que a valores de pH mayores a 9 especies de sílice pueden estar en cantidades significativas ó en lugares con contaminación orgánica ya que algunos aniones orgánicos titulables pueden estar presentes. El

carbonato y bicarbonato comunican alcalinidad al agua dándole capacidad de consumo de ácido puesto que crean una solución tampón (Deutsch *et al.*, 1997). El carbonato y bicarbonato no se oxidan ni reducen en aguas naturales, aunque se precipitan con facilidad como CaCO_3 . La dilución de calizas y dolomías es una fuente de bicarbonato y carbonato. El agua dulce puede tener entre 50 y 350 ppm de bicarbonato (agua subterránea cerca de 200 ppm). El ión carbonato está en concentraciones mucho menores que el bicarbonato. Si el $\text{pH} < 8.3$ se considera ausente al ión carbonato. En aguas alcalinas con $\text{pH} > 8.3$ puede haber cantidades importantes de carbonato, hasta de 50 ppm (Custodio y Llamas, 1996).

d) Sodio (Na^+)

Se le asocia a la meteorización de silicatos y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y evaporítico. Las sales de sodio son muy solubles y tienden a permanecer disueltas. Las aguas con contenidos elevados de Na^+ suelen tener contenidos elevados de F^- . Su concentración en agua dulce puede variar entre 1 y 150 ppm (Custodio y Llamas, 1996), y de 17.3 a 508 ppm (Reimann y Caritat, 1998). La NOM-127-SSA1-1994 establece un lp de 200 ppm.

e) Potasio (K^+)

El potasio generalmente procede de la meteorización de feldespatos y la disolución de depósitos de evaporizas. Cuando su concentración es alta puede ser un indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales. El potasio es muy soluble y difícil de precipitar. Se absorbe fácilmente por arcillas en formación, formando parte de su estructura. Por ello, en las aguas naturales a pesar de su mayor abundancia, el K se encuentra en menores cantidades que el sodio. Su concentración puede variar entre 0.01-24.27 ppm (Reimann y Caritat, 1998) y 0.1-10 ppm (Custodio y Llamas, 1996), aunque en casos raros se puede encontrar hasta en cientos de ppm.

f) Magnesio (Mg^{+2})

El magnesio es el constituyente mayoritario de los minerales formadores de rocas pertenecientes a los sistemas ígneos. Puede proceder de la dilución de

rocas carbonatadas, evaporizas y de silicatos ferromagnesianos. Sus concentraciones en agua dulce varían de 1-100 ppm (Custodio y Llamas, 1996).

g) Calcio (Ca^{+2})

El calcio suele ser el catión principal en el agua, debido a su presencia en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Forma sales que van de una baja a una alta solubilidad. Se precipita fácilmente como CaCO_3 . Su concentración en agua dulce varía de 10-250 ppm, e incluso alcanza 600 ppm (Custodio y Llamas, 1996) en zonas productoras de yeso.

h) Litio (Li^+)

Forma sales muy solubles en agua, y es poco retenido en el subsuelo. No se le considera tóxico, incluso no existe un límite en la normatividad Mexicana, pero se han reportado cantidades anómalas en algunos pozos del Valle de Querétaro. En aguas subterráneas se le ha encontrado en rangos de 0-59 ppb y 187-641 ppb (Reimann y Caritat, 1998).

i) Manganeso (Mn)

Es un elemento al que no se le considera tóxico, pero crea problemas en los suministros de agua. Las aguas subterráneas que lo poseen, contienen poco oxígeno disuelto y tienen alto contenido de CO_2 . Hay registros de manganeso en agua subterránea que varía de 0.002 hasta 2.975 ppm (Reimann y Caritat., 1998). La NOM-127-SSA1-1994 indica un lp de 0.15 ppm.

j) Hierro (Fe)

El hierro es un componente indeseable en el agua potable, puesto que puede producir depósitos. Al hierro se le encuentra entre 0 y 10 ppm, pero en aguas aireadas se encuentra en menos de 0.5 ppm. Con pH entre 5 y 8, el hierro ocasionalmente alcanza 50 ppm. En aguas muy ácidas su valor puede llegar a 100 ppm (Custodio y Llamas, 1996). La NOM-127-SSA1-1994 indica un lp de 0.30 ppm.

k) Arsénico (As)

Es un elemento al que se le asocia con problemas de salud. Es un componente que de manera natural está presente en gran parte de la corteza

terrestre y que en algunos lugares se encuentra presente en altas concentraciones. Debido a que el arsénico puede estar en el subsuelo, éste puede diluirse en el agua subterránea; por lo tanto, debe vigilarse que su concentración no exceda el valor indicado en la norma NOM-127-SSA1-1994, de 0.05 ppm. Se han reportado concentraciones muy variables de arsénico en agua subterránea, por ejemplo Reimann y Caritat, (1998) señalan valores variables menores a 0.011 y entre 0.025-1 ppm.

l) Plomo (Pb)

Entre los elementos que son menos deseados en el agua, el plomo se ha relacionado ampliamente con problemas de salud (Sanin *et al.*, 1998). Se le encuentra ampliamente distribuido en el medio ambiente, donde concentraciones anormalmente altas provienen de actividades antropogénicas como la minería e industria dedicada a la quema de combustibles fósiles, principalmente (Vega *et al.*, 1990). La norma mexicana indica un máximo de 25 ppm de plomo en agua para uso y consumo humano. Valores reportados por Reimann y Caritat, (1998), señalan valores comunes de plomo en agua subterránea menores a 4 ppm.

m) Fluoruros (F⁻)

Los fluoruros son poco solubles en agua, donde contribuyen ligeramente a la alcalinidad. El fluoruro es importante en la conservación de la dentadura, aunque puede causar un daño a la salud (dientes y huesos) cuando está presente en concentraciones elevadas (Gómez y Martín, 2002). Su concentración en agua suele estar presente entre 0.1 y 1 ppm, aunque puede alcanzar valores de 10 ppm, incluso hasta 50 ppm en aguas muy sódicas con poco calcio. El calcio limita la concentración de F⁻ (Custodio y Llamas, 1996). La NOM-127-SSA1-1994 indica un lp de 1.5 ppm.

n) Nitratos (NO₃⁻)

El NO₃⁻ se encuentra de manera natural en la mayoría de las aguas subterráneas, sus concentraciones varían desde 0.01 ppm hasta varios miligramos por litro. Cuando la cantidad de NO₃⁻ excede 10 ppm puede ser indicio de contaminación por fuentes como fertilizantes, aguas negras

municipales, fosas sépticas, y zonas donde se acumula gran cantidad de materia orgánica, entre otras. Este ión es poco adsorbido por los minerales de las arcillas, por lo tanto se mueve de manera libre en un acuífero. El origen primario de los NO_3^- es el gas nitrógeno atmosférico, el cual se vuelve orgánico por el proceso de fijación. El nitrógeno orgánico se vuelve inorgánico por la acción de microorganismos formando NO_3^- , en este proceso existe un producto intermedio, el NO_2^- , el cual es de corta vida y ocasionalmente se acumula en cantidades significativas en ambientes naturales (Hounslow, 1995).

o) Fosfatos (PO_4^{-3})

Los fosfatos suelen estar presentes en forma de sales solubles, aunque la mayoría lo son muy poco; en general, se precipita como $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, como se hidrolizan con facilidad contribuyen a la alcalinidad del agua. La presencia de calcio limita el contenido de fosfatos mientras que el CO_2 lo favorece. La normatividad mexicana establece un máximo de fosfatos de 1.5 ppm. Su concentración en agua oscila entre 0.01 y 1 ppm, pero puede alcanzar valores de hasta 10 ppm y ocasionalmente alcanza 50 ppm (Custodio y Llamas, 1996).

p) Bromuros (Br^-)

El comportamiento del Br^- , es parecido al del ión Cl^- . En las concentraciones usuales no se le relaciona con problemas de salud. Los valores normales reportados indican que en agua dulce no sobrepasa 0.01 ppm (Custodio y Llamas, 1996).

2.3.4 Análisis químico

Los materiales disueltos en el agua subterránea requieren técnicas analíticas específicas en cada caso. Las técnicas necesarias para el análisis de aniones, cationes y elementos traza son la cromatografía de líquidos, espectroscopía de absorción atómica en flama y la espectrometría de masas, respectivamente.

a) Cromatografía de líquidos (CL)

La cromatografía de líquidos es una técnica de separación y cuantificación de los componentes de una disolución (Skoog y Leary, 1990). En la CL, una muestra de la disolución se impulsa por medio de una fase líquida a través de una columna que contiene en su interior una fase sólida. Las sustancias contenidas en la muestra recorren en diferentes tiempos la columna dependiendo de que tanto sean retenidas por la fase estacionaria (fase sólida). Cada sustancia contenida en la muestra llegará a un detector selectivo donde originará una señal dependiendo de la concentración en que esté presente.

b) Espectroscopía de absorción atómica (EAA)

La espectroscopía de absorción atómica se basa en el principio de que los átomos libres en estado fundamental pueden absorber luz en una determinada longitud de onda. La absorción es específica, por lo que cada elemento absorbe a longitudes de onda únicas. La EAA es una técnica analítica aplicable al análisis de trazas de elementos metálicos en muestras biológicas, metalúrgicas, farmacéuticas, aguas, minerales, alimentos, medio ambiente, entre otras. Para su análisis, un elemento es llevado a su estado fundamental por medio de calor, se le hace llegar una longitud de onda específica mediante una lámpara y se mide la cantidad de luz que absorbe por medio de un detector (Skoog y Leary, 1990).

c) Espectrometría de masas (EM) con plasma acoplado inductivamente (ICP)

Los espectrómetros de masas convierten los componentes de una muestra en iones que se mueven rápidamente y se separan en función a su relación masa/carga (m/z). De forma general, un espectrómetro de masas está compuesto de un módulo para convertir la muestra en iones (en este caso el

ICP). Posteriormente, los iones son llevados a una zona de separación, en la cual imanes separan los componentes de la sustancia que llega a ellos. Finalmente, detectores específicos cuantifican la carga y la masa de los iones.

2.3.5 Interpretación de la información

El estudio de las relaciones del agua subterránea en diferentes puntos del sistema acuífero comprende el análisis de los datos físicos y químicos por métodos gráficos y estadísticos.

2.3.5.1 Métodos gráficos

Los datos de los análisis de aguas pueden ser mostrados en forma gráfica para facilitar su comparación visual (D'Amore, 1983), algunas herramientas útiles son los mapas hidroquímicos y los diagramas hidroquímicos.

a) Mapas hidroquímicos

Estos mapas muestran la variación espacial de las características hidroquímicas del agua, la información se expresa en líneas donde la propiedad en estudio tiene un mismo valor (isolíneas). Las tendencias de estas líneas indican la variación geográfica de la propiedad, un ejemplo de los mapas hidroquímicos se muestra en la Figura 3. Hay diferentes tipos de mapas hidroquímicos; entre los cuales se mencionan los de concentraciones químicas, conductividades eléctricas, entre otros (Schlehuber *et al.*, 1989). Por ejemplo, los mapas de las concentraciones de ión Cloro son útiles para determinar los flujos de agua, debido a que su concentración aumenta con la dirección, al igual que los sólidos disueltos (Singhal y Gupta, 1999).

b) Diagramas hidroquímicos

Los diagramas hidroquímicos se emplean para comparar los análisis químicos de diferentes muestras de agua subterránea. Se han desarrollado varios tipos de diagramas hidroquímicos, los más útiles son los diagramas de Stiff y Piper (Kehew, 2001).

Diagramas de Stiff

Estos diagramas son representaciones gráficas de los análisis químicos. Se originan al acomodar las concentraciones en miliequivalentes (meq) por litro de los iones mayores sobre un plano, a la izquierda se ubican los cationes y a la derecha están los aniones. La concentración de un catión se representa en sentido inverso en línea recta con la de un anión, formándose un total de tres parejas paralelas entre ellas en sentido vertical. El orden de los cationes (Sodio+Potasio, Calcio y Magnesio) y de los aniones (Cloro, Alcalinidad y Sulfatos) puede variar. La cantidad de cada ión origina una arista. Cuando se unen las aristas por medio de líneas, se forma una figura de seis lados. Un ejemplo de un diagrama de Stiff se muestra en la Figura 5.

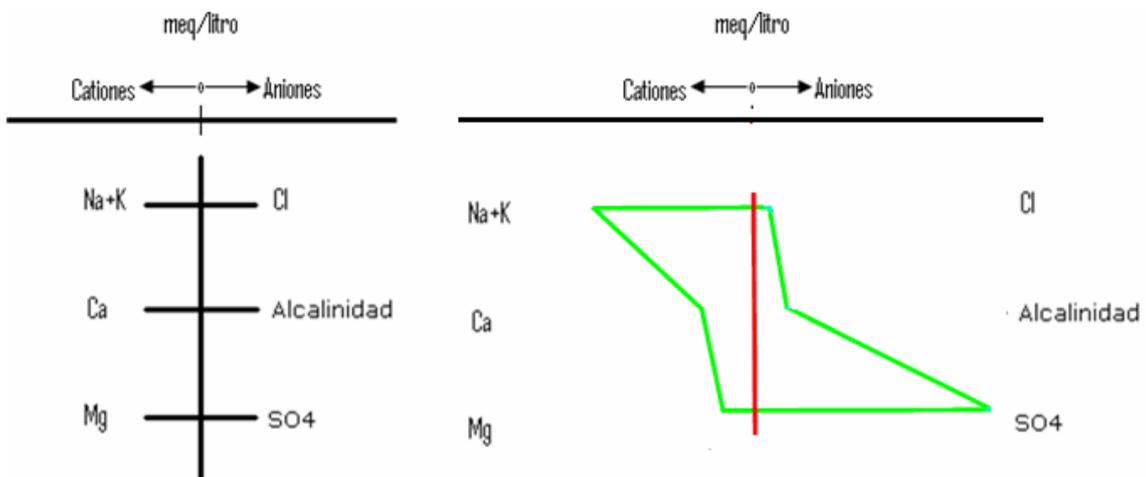


Figura 5. Ejemplo de un diagrama de Stiff.

La forma que adopta el diagrama de Stiff depende de la cantidad de iones mayores que contenga un agua y de la proporción que mantienen entre sí los aniones y cationes. Por lo tanto, aguas con diagramas de Stiff parecidos poseen características químicas similares. La forma del diagrama de Stiff representa “la huella digital del agua”. Estos diagramas también son un indicio de la calidad del agua (McNellis *et al.*, 1969).

Diagramas de Piper

Este diagrama también es una representación gráfica de los análisis químicos, agrupa el agua en familias que son nombradas mencionando los iones mayores que estén en mayor proporción en la muestra. El diagrama consiste en dos triángulos, uno de ellos para cationes y el otro para aniones, y finalmente una figura en forma de diamante localizada en el centro. Los lados de los triángulos son utilizados para poner las proporciones de los iones. Los valores se muestran como porcentajes del total de cationes ó aniones en unidades de miliequivalentes por litro. Por lo tanto, cada análisis de agua resulta en un punto en el triángulo de los cationes (izquierda) y otro en el de los aniones (derecha). Estos puntos son proyectados diagonalmente hacia arriba, paralelos a las diagonales de los triángulos, y se forma un nuevo punto en el diamante en la intersección de ambos. Esta intersección puede ser mostrada como un punto ó como un círculo, cuyo diámetro es proporcional al total de sólidos disueltos (Figura 6). Estos diagramas sirven para clasificar las aguas según la posición que ocupan en el diamante central (Tien-Chang, 1998). Cuando se muestrea un mismo punto en un acuífero durante un tiempo, se puede establecer la evolución que el agua está siguiendo.

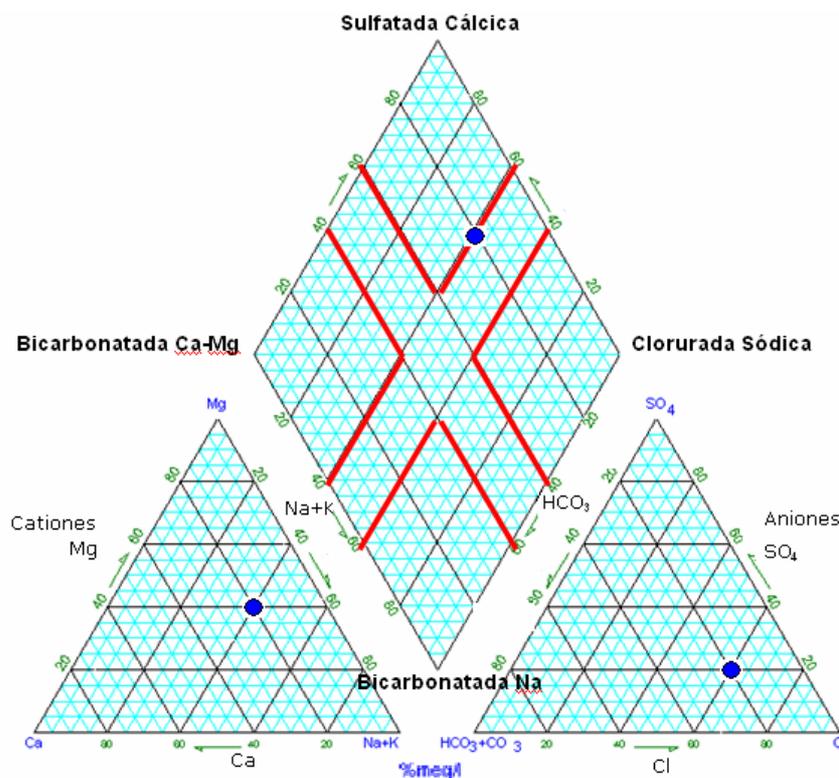


Figura 6. Agua clasificada por medio del diagrama de Piper.

2.3.5.2 Métodos estadísticos

Una clasificación robusta en grupos de datos es una herramienta importante en la caracterización hidrogeoquímica de muestras de agua. Por ello, el uso de la estadística se ha vuelto importante en lo que se refiere al estudio de sistemas acuíferos. Una de las ventajas del uso de métodos estadísticos es el hecho de que se pueden manejar grandes cantidades de muestras, utilizar n número de parámetros a comparar y mostrar los resultados obtenidos en una forma compacta (Melloul *et al.*, 1992). Una de las técnicas estadísticas más utilizadas en el análisis de datos hidrogeoquímicos de muestras de aguas son el análisis de clusters y los índices de correlación.

a) Análisis de clusters

Este análisis consiste en determinar a partir de un número establecido de muestras, cuáles son la que guardan cercanía entre ellas (Hussain *et al.*, 2008). Para evaluar la cercanía se estudian n número de parámetros, cada uno de ellos forma un eje o dimensión representado como un plano. Estos planos pueden ser evaluados en su conjunto a través de distancias numéricas (como las Euclidianas). Dichas distancias numéricas se obtienen al procesar estadísticamente los valores de los parámetros a evaluar (Guler *et al.*, 2002). Los análisis estadísticos de los datos pueden realizarse con programas computacionales (como Minitab, Statistica, JMP, entre otros). Los resultados de los análisis generalmente se muestran en forma de dendogramas, los cuales son gráficos en los que se agrupan las muestras acorde al índice de similitud entre ellas (Silliman *et al.*, 2007). Estos gráficos permiten evaluar de forma visual cuáles son las muestras más parecidas ó las que tienen una mayor diferencia. En el dendograma mostrado en la Figura 7, en el eje Y se presenta el índice de similitud, mientras que en el eje X se presentan las muestras, de esta manera se pueden observar algunos agrupamientos (por ejemplo en las observaciones 1 y 9).

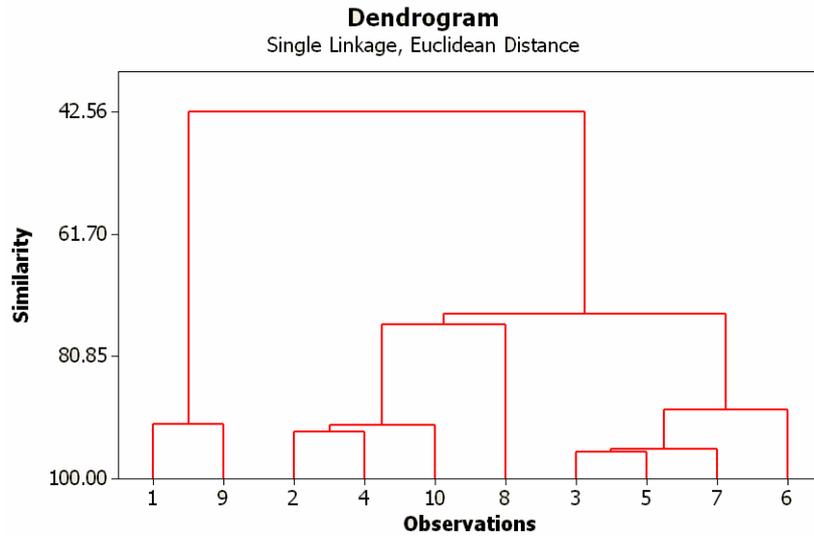


Figura 7. Ejemplo de un dendrograma.

b) Índices de Correlación

La correlación se basa en el supuesto de que una variable independiente X está controlada y que, en consecuencia, no es una variable aleatoria. El índice de correlación indica la relación lineal entre las variables en estudio y toma valores de -1 a $+1$. Los valores negativos nos indican una correspondencia inversamente proporcional entre los datos y viceversa (Walpole y Myers, 1985). Se han desarrollado índices de correlación muy específicos para el manejo de los datos hidroquímicos provenientes de muestras de agua, muestra de ello es el desarrollado por Tien-Chang en 1998. El índice de correlación anteriormente mencionado toma en cuenta para su análisis 6 variables (sodio+potasio, magnesio, calcio, cloro, alcalinidad y sulfatos) a comparar entre dos muestras. Cada muestra se compara de forma individual contra cada una de las restantes, hasta analizar el total. El índice desarrollado por Tien-Chang toma valores de 0 a 1, mientras más cercano es a la unidad, más similares son las muestras.

2.4 Tipos de pozos en monitoreo

Las muestras de agua provenientes del acuífero del Valle de Querétaro se pueden obtener en dos formas diferentes. Para este trabajo de investigación, los pozos se clasifican en testigos y pilotos (Carreón *et al.*, 2007), según sea el procedimiento en que se obtiene la muestra de agua subterránea.

2.4.1 Pozos testigo

Cuando un pozo de extracción de agua se encuentra fuera de operación y se le ha retirado la bomba y cableado de su interior, puede ser usado para el monitoreo del acuífero. La recolección de agua subterránea en este tipo de pozos se lleva a cabo por medio de un muestreador de intervalos discretos, el cual se opera totalmente en forma manual y es portátil. Dicho muestreador es un equipo diseñado para obtener muestras a profundidades específicas, evitando la mezcla de aguas de diferentes profundidades. Es interesante mencionar que tanto la CEA como la CONAGUA no muestrean estos pozos. Por lo anterior, este trabajo propuso y realizó muestreos en los pozos testigo implementando la metodología para ello.

2.4.2 Pozos piloto

Son pozos que se encuentran operando ya sea de manera continua ó intermitente. Estos pozos cuentan con una bomba (de flecha o sumergible), la cual genera la fuerza que propulsiona el agua desde la profundidad hasta la superficie a través de una tubería. Estos pozos cuentan con una llave de purga, la cual sirve para obtener muestras de agua y llevar un registro de sus datos químicos conforme transcurre el tiempo. Los pozos piloto pueden ser operados por la Comisión Estatal del Agua o concesionados a particulares. Los particulares pueden ser ranchos, ejidos, empresas, escuelas y otras instituciones que requieran un gran volumen de agua para llevar a cabo sus actividades.

HIPÓTESIS

Las características químicas del agua subterránea están directamente relacionadas con la estratigrafía y estructura del subsuelo, por lo tanto, la caracterización del acuífero en diferentes sitios permite identificar los sistemas de flujo presentes en el Valle de Querétaro.

OBJETIVOS

Objetivo general

Identificar la relación entre las características químicas del agua subterránea con la estratigrafía y estructura del subsuelo.

Objetivos específicos

- Determinar las cantidades de iones mayores, de iones menores (fluoruros, nitratos, fosfatos y bromuros), así como algunos elementos traza (arsénico, litio, fierro, manganeso y plomo) en las muestras de agua subterránea.
- Caracterizar la hidrogeoquímica de las muestras de agua provenientes de diferentes sitios del Valle de Querétaro.
- Analizar la variación de las características principales del agua durante un periodo de tiempo de 6 meses (pozos testigo).
- Identificar las condiciones de flujo del sistema acuífero.

III. METODOLOGÍA

3.1 Trabajo de campo

3.1.1 Selección de los pozos para muestreo

En el caso de los pozos testigo, se seleccionaron aquellos que no estaban en operación, debido a que debía evitarse que el muestreador pudiera enredarse con algún obstáculo. Además, se buscó que los pozos estuvieran distribuidos en la zona de estudio y fuesen representativos de la estratigrafía del área. Una vez que se seleccionó una serie de pozos candidatos a ser muestreados, se dió preferencia a aquellos pozos que contaban con información del corte litológico resultado de su perforación y el esquema final de terminación del mismo.

Los pozos se seleccionaron de una lista de la Comisión Estatal de Aguas a los cuales se les determina el nivel estático cada año. Los criterios a seguir fueron la accesibilidad al pozo, que estuviesen activos y que tuvieran las condiciones apropiadas para medir el nivel estático anualmente.

3.1.2 Técnicas de muestreo

Pozos testigo

Debido a que el nivel estático del agua en el Valle de Querétaro varía de 60 a 250 m bajo el suelo, se utilizó un equipo especial capaz de tomar muestras a dicha profundidad, como lo es el muestreador de intervalos discretos (modelo 425-t marca Soilinst). Este equipo consiste en un carrito de manguera de alta presión, una bomba neumática y un envase de metal de acero inoxidable. Debido a que las muestras se tomaron a profundidades mayores a las que se localizaba el nivel estático, existe una presión por parte de la columna de agua sobre el muestreador, por lo que fue necesario contrarrestarla, para lo cual se presurizó el sistema, permitiendo así que se tomara líquido sólo en un punto deseado. Para operar el equipo se conectó la manguera de alta presión al muestreador, posteriormente se presurizó el sistema con ayuda de la bomba neumática hasta llegar a la presión necesaria para contrarrestar la columna de

agua. Para determinar la presión necesaria a aplicar en la toma de muestra se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Presurización} = ((m * 9.8) + 70 \text{ m}) / 100 \text{ m}) * \text{bar} \quad \text{ecuación 1}$$

m = Metros de columna de agua

Presurizado el sistema se desconectó la bomba y se hizo descender el muestreador por el pozo, sosteniendo el peso con ayuda de un cable de acero. Una vez que se llegó a la profundidad en donde se tomó la muestra de agua, se despresurizó el sistema abriendo la válvula de purga del carrete, y se dejaron transcurrir 10 minutos para permitir la entrada de agua. Posteriormente se volvió a presurizar el sistema, esto se realizó para cerrar el muestreador y evitar fugas de agua. Finalmente, se llevó el equipo a la superficie y se despresurizó para obtener la muestra de agua contenida en el interior del muestreador.

Pozos piloto

Debido a que estos pozos estuvieron en operación, se tomó agua directamente de la válvula de muestreo, dejando previamente correr el agua 10 minutos. Se tomó la muestra de la válvula más cercana a la columna de extracción del pozo, para evitar extraer agua clorada.

3.1.3 Medición de parámetros en campo

Para medir de manera fidedigna la temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto, potencial redox, alcalinidad y posición geográfica se determinaron todos los parámetros *in-situ*.

a) Temperatura

La determinación de la temperatura fue diferente si el pozo era testigo ó piloto. En los pozos testigo se midió a través de un sensor marca Solinst modelo Levelogger LT que se colocó de manera permanente dentro de la columna de agua del pozo. Mientras que en los pozos piloto, se midió directamente de la purga de agua con un termómetro de inmersión de vidrio marca Brannan de rango de -20° a 150°C.

Potencial de Hidrógeno

La lectura se realizó con un equipo portátil marca Termo, modelo Orion cinco estrellas, previa calibración del sensor a 4, 7 y 10 unidades. Antes de introducir el sensor a la muestra, se enjuagó con agua desionizada. Posteriormente, el sensor se introdujo en la muestra de agua subterránea hasta la estabilización de la lectura y se registró.

b) Conductividad eléctrica

Se midió con un equipo portátil marca Termo, modelo Orion cinco estrellas, previa calibración del sensor a 1413 μS y 12.9 mS. Antes de introducir el sensor a la muestra, se enjuagó con agua desionizada. Posteriormente, el sensor se introdujo en la muestra de agua subterránea hasta la estabilización de la lectura y se registró con su respectiva temperatura.

c) Sólidos disueltos (SD)

La cantidad de SD se obtenía al sumar la cantidad total de iones mayores obtenidos por análisis químicos de las muestras de agua subterránea.

d) Potencial de òxido-reducción

Se determinó con un equipo portátil marca Termo, modelo Orion cinco estrellas, previa calibración del sensor por medio del estándar Orion ORP 967901. Antes de introducir el sensor a la muestra se enjuagó con agua desionizada. Posteriormente, el sensor se introdujo en la muestra de agua subterránea hasta la estabilización de la lectura y se registró con su respectiva temperatura.

e) Oxígeno disuelto

Se cuantificó con un equipo portátil marca Termo, modelo Orion cinco estrellas, previa calibración del sensor por medio de una celda de humidificación portátil. Antes de introducir el sensor a la muestra se enjuagó con agua desionizada. Posteriormente, el sensor se introdujo en la muestra de agua subterránea hasta la estabilización de la lectura y se registró con su respectiva temperatura.

f) Alcalinidad

Se determinó por medio de un titulador portátil marca HACH. Para ello, se tomó una muestra de 20 ml de agua subterránea, y se les agregó 2 gotas de solución indicadora de naranja de metilo. Posteriormente, se agregó por medio del titulador digital ácido sulfúrico 1.6 N hasta llegar al cambio de coloración en la muestra. La cantidad de ácido usado se multiplica por un factor de conversión de 6.1 para expresar la alcalinidad en carbonato de calcio.

g) Ubicación geográfica

A cada pozo se le tomaron sus coordenadas geográficas (las cuales se presentan en el cuadro 7) para su manejo en los Sistemas de Información Geográfica (SIGS), usando para ello un GPS (sistema de posicionamiento global) marca Garmin modelo 12XL. El sistema de coordenadas usadas fueron las UTM en base al punto de referencia NAD 27 y el elipsoide de Clark 1866.

3.1.4 Preservación y transporte de la muestra

Cada muestra de agua subterránea se dividió en dos y se colocaron de manera correspondiente en envases de polietileno de alta densidad, una se llevó a pH=2 (con ácido nítrico marca J.T. Baker de 69.4% de concentración) la cual se destinó para análisis de cationes y elementos traza; el otro que fue para aniones, no recibió modificación alguna. Finalmente, los envases se sellaron con cera (utilizando papel parafilm) y se marcaron para su identificación. Las muestras se transportaron al laboratorio de análisis químicos del Centro de Geociencias de la UNAM, protegidas de la luz del sol y manteniéndolas a temperaturas bajas por medio de una hielera.

Las muestras se refrigeraron a una temperatura aproximada a 4° C (NOM-230-SSA1-2002), para su posterior análisis.

3.2 Trabajo de laboratorio

Antes de realizar el análisis químico se permitió que las muestras alcanzaran la temperatura ambiente, después se filtraron al vacío a través de una membrana de nitrocelulosa de 0.45 μm marca Millipore.

3.2.1 Análisis químico

A la parte acidificada de la muestra se le determinaron cationes mayores y elementos traza, mientras que en la otra parte se midieron los aniones mayores.

3.2.1.1 Aniones

La cromatografía de líquidos se empleó para el análisis de los aniones mayores siguiendo la metodología especificada en el método 300.1 de la EPA.

3.2.1.2 Cationes

El análisis de los cationes mayores se realizó aplicando el método EPA 700.B, utilizando la técnica de la espectroscopia de absorción atómica en flama.

3.2.1.3 Elementos traza

Para determinar las cantidades de litio, manganeso, hierro, arsénico y plomo, se recurrió a la técnica de la espectrometría de masas, siguiendo el método EPA 200.8.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Ubicación de los sitios en estudio

4.1.1 Mapa de la zona de estudio

En base a las coordenadas de los sitios en estudio y por medio del programa ARCGIS se ubicaron los pozos en el Valle de Querétaro, los cuales se presentan en la Figura 8. Las coordenadas de los pozos se encuentran en el Cuadro 8.

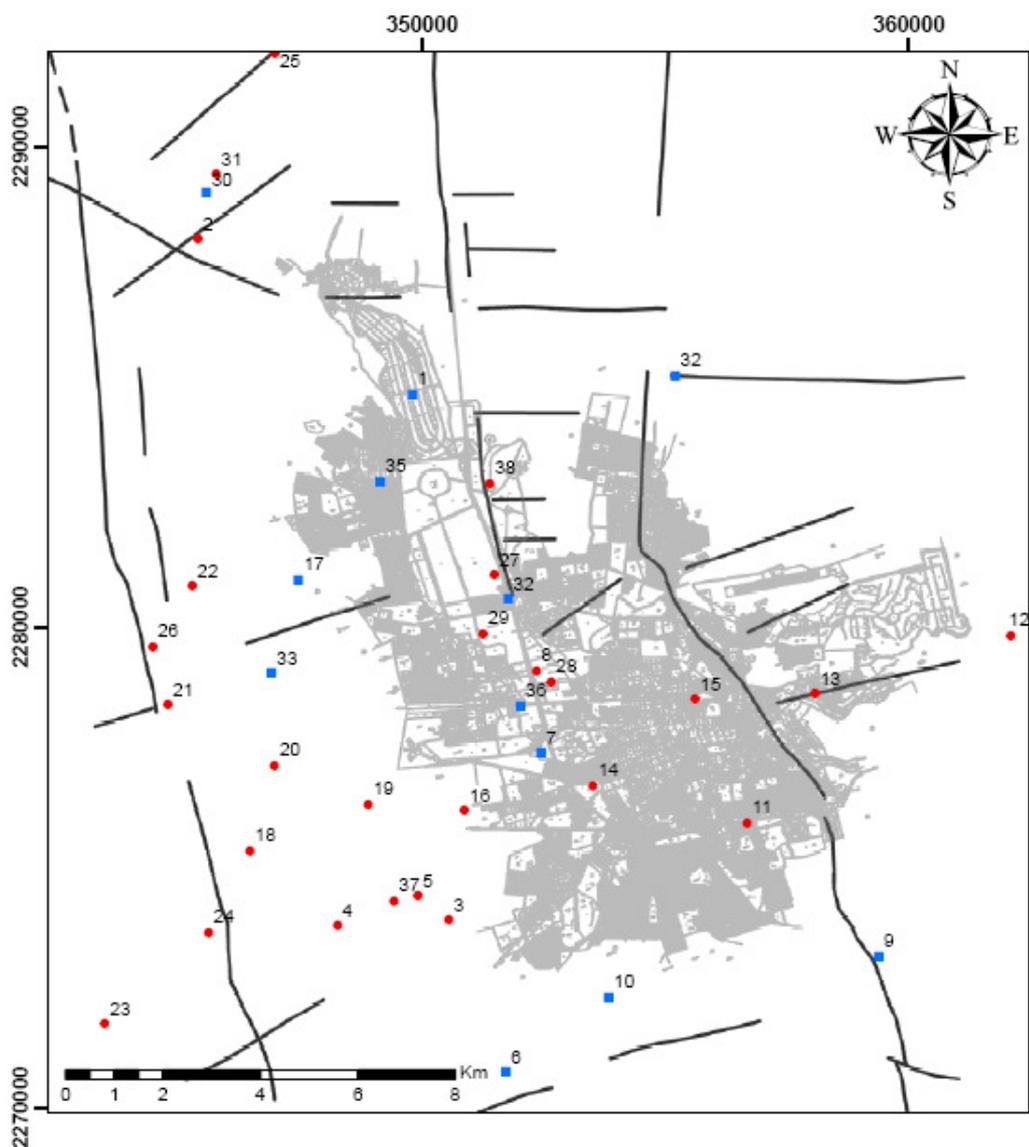


Figura 8. Ubicación de los pozos piloto (círculos) y testigo (cuadros) en el Valle de Querétaro. La zona sombreada indica la mancha urbana y las líneas señalan fallas o fracturas.

4.1.2 Litologías tipo de los pozos en estudio

A partir de cortes litológicos de pozos testigos y pilotos (mostrados en el apéndice) se elaboró una lista (Cuadro 3) donde se indica el tipo y porcentaje de roca que está en contacto con el agua subterránea.

En base a los cortes litológicos se formaron cuatro grupos considerando la similitud geológica, denominándoseles A, B, C y D (Figura 9).

Grupo A: predominan las rocas andesitas y basaltos.

Grupo B: existe cantidad superior a 40% de piroclastos y lacustres.

Grupo C: consiste de pozos donde hay varios tipos de rocas.

Grupo D: sólo incluye un pozo, el 31; éste es un caso especial por la profundidad que posee (1 km) y la composición rocosa (casi 90% de calizas).

Cuadro 3. Geología recopilada de pozos en estudio.

Grupo	Pozo	Estratigrafía
A	22	TmmAB(100%)
A	21	Tmm AB(100%)
A	36	TmmAB(100%)
A	3	Tmt AB(100%)
A	9	Tmt AB(100%)
A	12	Tmt AB(100%)
A	11	Tmm AB(20%), ToA(69%) y ToR(11%)
B	25	Tom Py Lac(50%), Tomlg(19%), TmDa(11%) y TeCgAr(20%)
B	1	Tmt AB(6%), Tom PyLac(71%), Tmm AB(7%) y ToA(16%)
B	26	Tmt AB(45%) y Tom Py Lac(41%) y Tmm AB(16%)
C	33	Tmm AB(50%), Tom Py Lac(10%), ToR(3%), ToA(10%)y TeCgAr(23%)
C	35	TmmAB(26%), Tomlg(16%), TmiV(18%), ToA(14%), Arcilla Verde(8%) y ToR(18%)
C	11	Tmm AB(20%), ToA(69%) y ToR(11%)
C	17	Tmm AB(9%), Tomlg(46%), ToA(45%)
C	34	Tmt AB(18%), Tom PyLac(6%) y ToR(48%) y Desconocido(30%)
C	30	ToR(25%), TeCgAr(67%) y KCz(8%)
D	31	Calizas (90%) y Otros (10%)

* La columna de la estratigrafía contiene las siguientes abreviaciones: Tmm (terciario mioceno medio), Tmt (terciario mioceno tardío), Tom (terciario oligoceno medio), To (terciario oligoceno), Tmi (terciario mioceno inferior), Te (terciario eoceno), A (andesitas), B (basaltos), P (piroclastos), Lac (lacustres), R (riolita), Cg (conglomerado), Ar (arcillas), V (volcánicos), TeCgAr (terciario eoceno conglomerados y arcillas), KCz (calizas del cretácico), lg (ignimbritas), Da (dasitas), Tm (terciario medio).

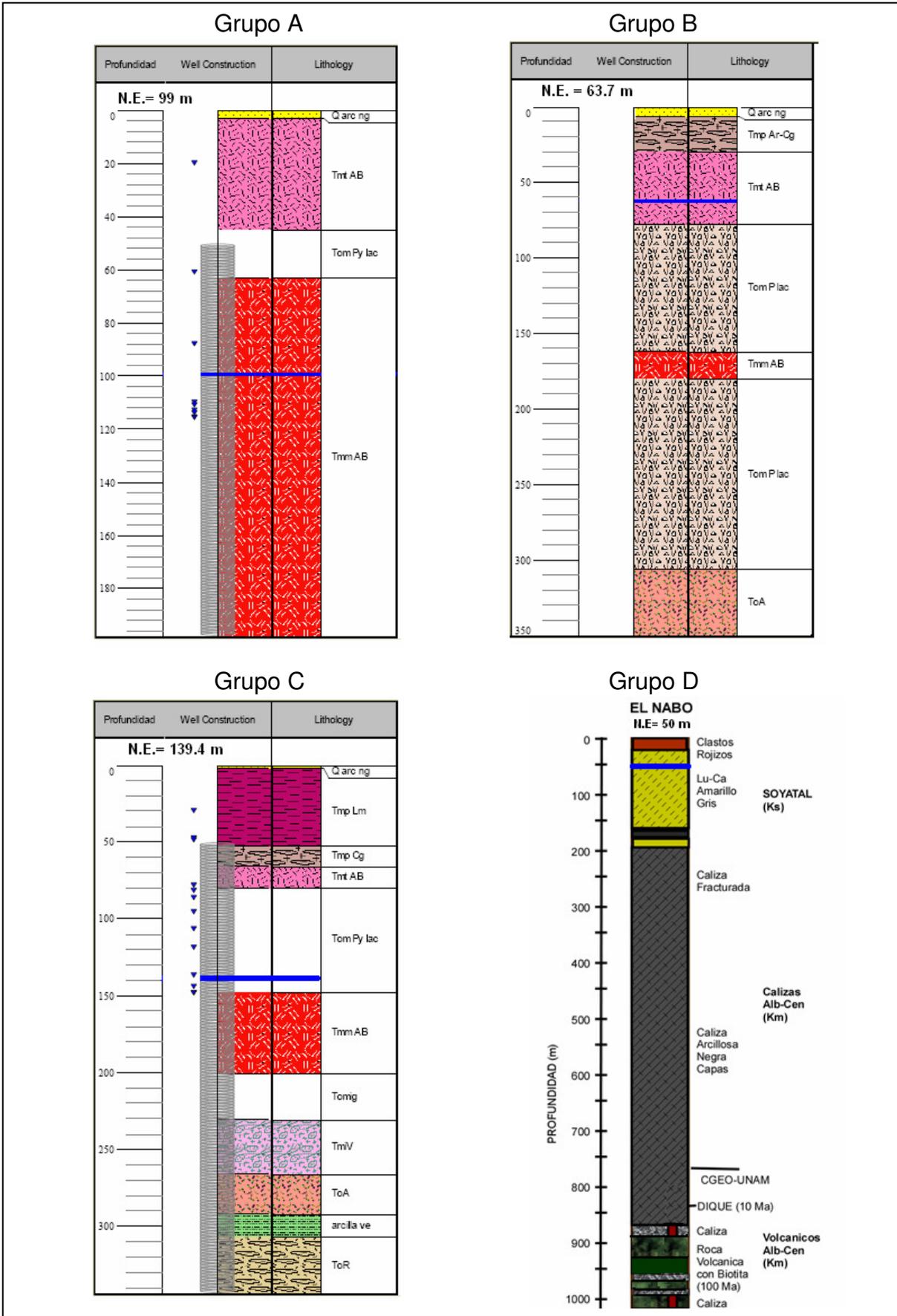


Figura 9. Grupos litológicos característicos del Valle de Querétaro.

4.2 Análisis químicos y físico-químicos

En el Cuadro 4 se indica el resumen de los parámetros medidos en 60 muestras, los datos completos se encuentran en el apéndice.

Cuadro 4. Resumen de los parámetros medidos en 60 muestras de 38 sitios del Valle de Querétaro.

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo	Promedio
K	ppm	0.50	24.17	12.34
Mg	ppm	0.00	36.00	14.36
Ca	ppm	1.10	84.66	38.37
Na	ppm	13.00	307.32	87.23
Cl	ppm	0.00	84.60	20.89
Alcalinidad	ppm	96.00	488.00	290.43
SO ₄ ⁻²	ppm	0.90	168.56	54.74
PO ₄ ⁻³	ppm	0.00	4.10	0.03
F	ppm	0.00	9.30	1.25
Br	ppm	0.00	0.62	0.08
NO ₃ ⁻	ppm	(0 y 90.716)	(53.673 y 148.73)	28.87
Li	ppb	(12.37 y 225.16)	(156.10 y 435.94)	109.27
Mn	ppb	(0.09 y 151.66)	(82.80 y 704.82)	50.08
Fe	ppb	15.15	1298.00	174.64
As	ppb	1.02	33.38	6.99
Pb	ppb	0.06	17.01	1.13
Sólidos Disueltos	ppm	257.61	949.82	531.10
Oxígeno Disuelto	mg/L	1.53	7.49	3.43
Redox	mV	-71.10	254.50	116.23
pH	Log ₁₀	6.98	9.80	7.68
Conductividad	μS/cm	337.00	1757.00	722.71
Temperatura	°C	17.00	64.00	30.80

En los pozos testigos se destaca lo siguiente con respecto a la NOM-127-SSA1-1994:

- Sólo una muestra (pozo número 7 ubicado al centro del Valle de Querétaro) presentó sodio por arriba del límite permisible (200 ppm) en lo que refiere a los iones mayores.
- El fluór rebasó el límite permisible de 1.5 ppm en casi el 40% de las muestras (pozos ubicados al norte del Valle de Querétaro), lo cual pudiera deberse a una contaminación natural.

- Más del 70% de las muestras rebasaron el límite permisible de 10 ppm para nitratos (presentando una media de 17.07 ppm), lo que podría indicar que existe una intrusión de fertilizantes o aguas negras al acuífero, situación que ha sido señalada en estudios anteriores (CEA-UAQ, 2002).
- Doce muestras sobrepasan el límite permisible de 6.5-8.5 para el pH; esto se presentó en zonas cercanas a fallas y fracturas (falla central y falla Tlacote).

Para los pozos piloto:

- Todos los iones mayores están dentro de los límites establecidos por la norma correspondiente.
- La concentración de fluór rebasó del límite permisible en cuatro pozos (8, 27, 29 y 30), localizados al noroeste del Valle de Querétaro.
- Los nitratos (con una media de 34.98 ppm) presentan mayor concentración que el límite permisible a excepción del pozo 31 ubicado al noroeste del Valle de Querétaro.
- Los elementos traza cumplieron con la normatividad (NOM-127-SSA1-1994).

El Mn y el Fe presentaron concentraciones promedio de 90.78 y 280.35 ppm para pozos testigo, mientras que para los pozos piloto 5.99 y 175.87 ppm respectivamente, lo cual pudiera deberse que al estar los pozos testigo fuera de operación puede existir mayor interacción entre el agua y el tubo de metal.

Tanto en muestras de pozos testigo como piloto existen cantidades anómalas de litio (un promedio de 109.27 ppb) en la zona noroeste del Valle de Querétaro, lo cual se relaciona con aguas que han interactuado con rocas de origen volcánico, ya que dicho elemento es componente de los estratos inferiores de la corteza terrestre.

Los valores encontrados de litio y fluór en este trabajo de investigación coinciden con estudios previos, señalando la presencia de dichos elementos químicos en algunos sitios del acuífero (CEA-UAQ, 2002).

4.3 Caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea

Para caracterizar las muestras de agua subterránea se recurrió a los diagramas de Piper y Stiff, en base a los análisis químicos de iones mayores. Se determinó en este estudio que los tipos de agua que prevalecen en el acuífero son bicarbonatada-sódico-potásica y bicarbonatada-cálcica, coincidiendo con estudios previos realizados en el Valle de Querétaro (CEA-UAQ, 2002).

a) Diagrama de Piper

El uso más frecuente de los diagramas de Piper consiste en caracterizar el agua según la proporción en moles que los iones mayores disueltos guarden entre sí. Piper clasifica el agua en cuatro grandes grupos de acuerdo a su emplazamiento en la cercanía a las caras del diamante.

En la Figura 10 se presentan 36 muestras de agua subterránea del mismo número de pozos. Existen sitios en los cuales se tomaron muestras durante varias ocasiones, en estos casos se incluyen en el diagrama sólo los resultados del último muestreo, con el objetivo de tener una mayor homogeneidad en las condiciones en que se realizó tanto el trabajo de campo y como el de laboratorio. Para visualizar mejor la posición de las muestras dentro del diagrama de Piper, en la Figura 11 se realizó una ampliación del segmento donde se concentran los datos. En el diagrama de Piper se observó que la mayoría de las muestras de agua se encuentran ubicadas entre las aristas izquierda e inferior del diamante por lo que las muestras pertenecen a las familias bicarbonatadas-cálcico-magnésicas y bicarbonatadas-sódico-potásicas.

Los pozos localizados en la misma unidad mostrada en el mapa de geología superficial (Figura 15) pueden o no presentar proporciones similares de iones mayores en el diagrama de Piper (Figura 10). Algunos ejemplos de proporciones similares son los pozos que se presentan en la Figura 10 como sitios 3, 5, 4, 16 y 19 respectivamente (localizados al sur oeste del Valle de Querétaro). Ejemplos de proporciones diferentes incluyen los pozos que se muestran en la Figura 10 como sitios 6 y 10 respectivamente (localizados al sur del Valle de Querétaro).

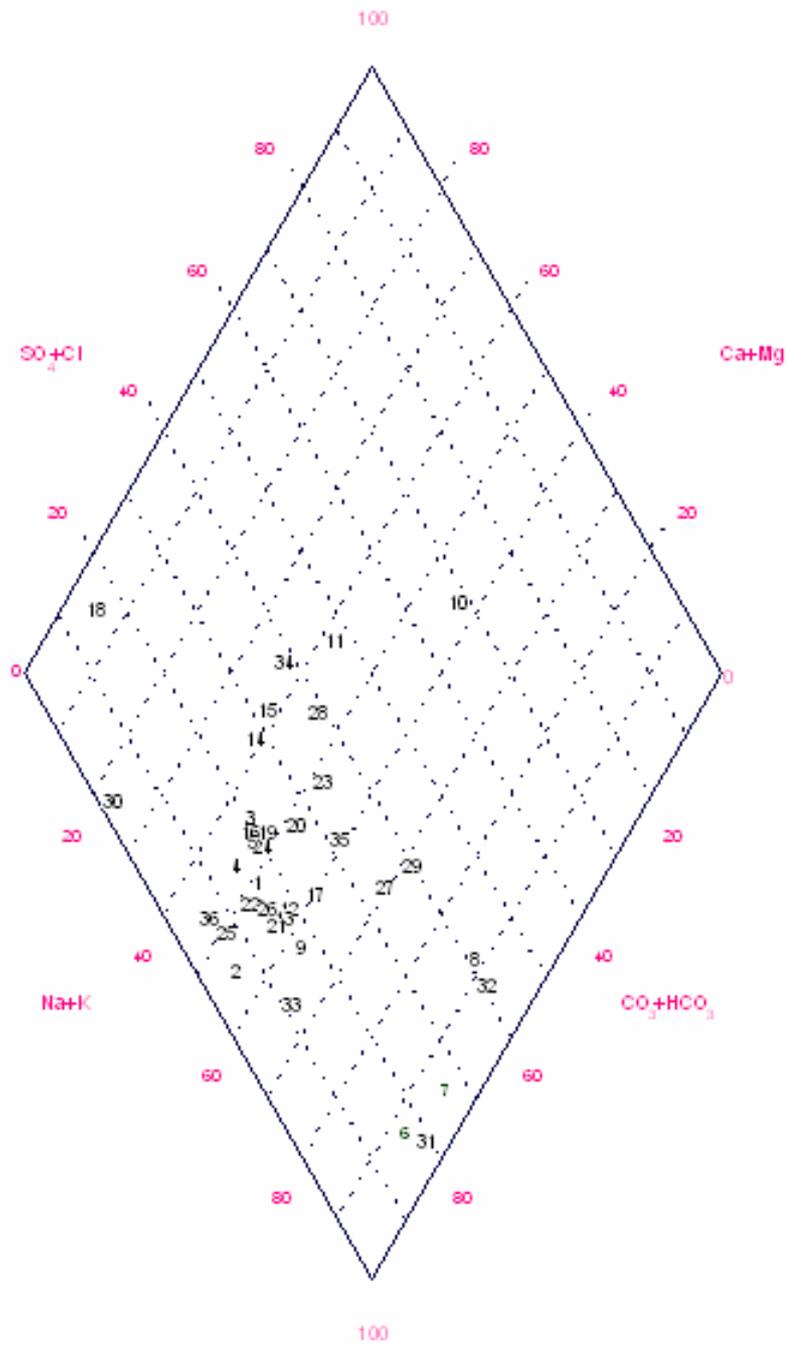


Figura 10. Diagrama de Piper del agua subterránea proveniente de diferentes sitios del Valle de Querétaro.

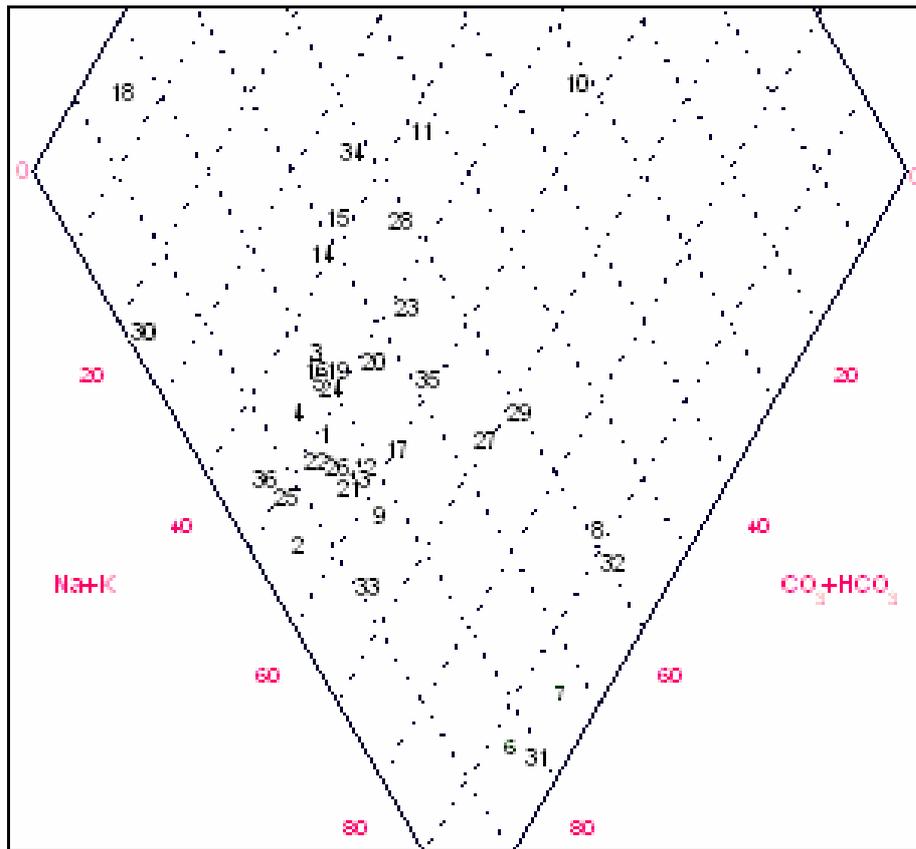


Figura 11. Ampliación del diagrama de Piper. Sección donde se muestra el segmento en el cual se concentran las muestras de agua subterránea proveniente de diferentes puntos del Valle de Querétaro y correspondencia del número con su respectivo pozo.

b) Diagrama de Stiff

La caracterización de las muestras por medio del diagrama de Stiff indica que la mayoría de las aguas son bicarbonatadas-sódico-potásica, a excepción de los pozos 30 y 18 ambas son de tipo bicarbonatadas-cálcica (lo que puede asociar a flujos locales de reciente ingreso al acuífero) y 10 de tipo sulfatadas-sódico-potásicas (se puede relacionar a aguas de mayor antigüedad de flujos regionales). A continuación se presentan los diagramas de Stiff con el objetivo de representar los tres tipos de aguas encontradas en el Valle de Querétaro.

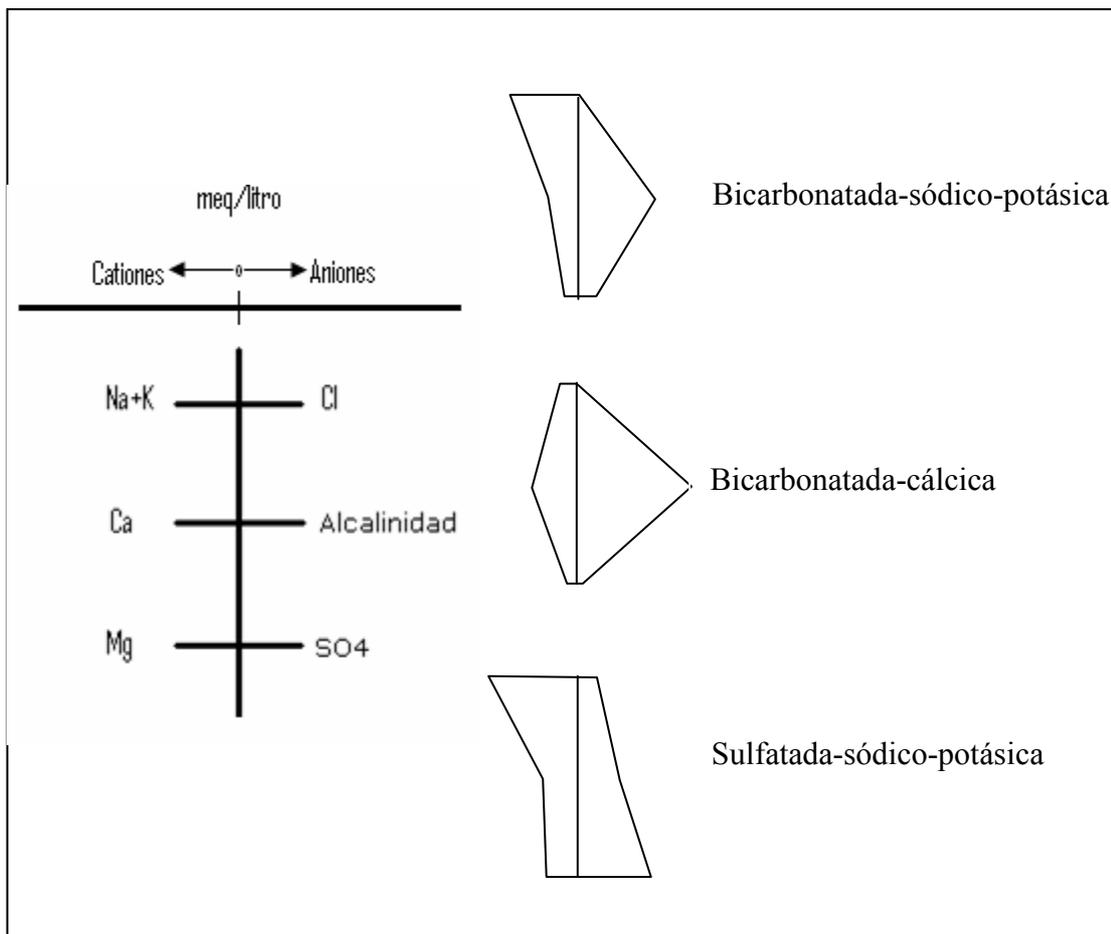


Figura 12. Diagramas de Stiff de los principales tipos de agua encontradas en el acuífero del Valle de Querétaro.

4.4 Condiciones de flujo

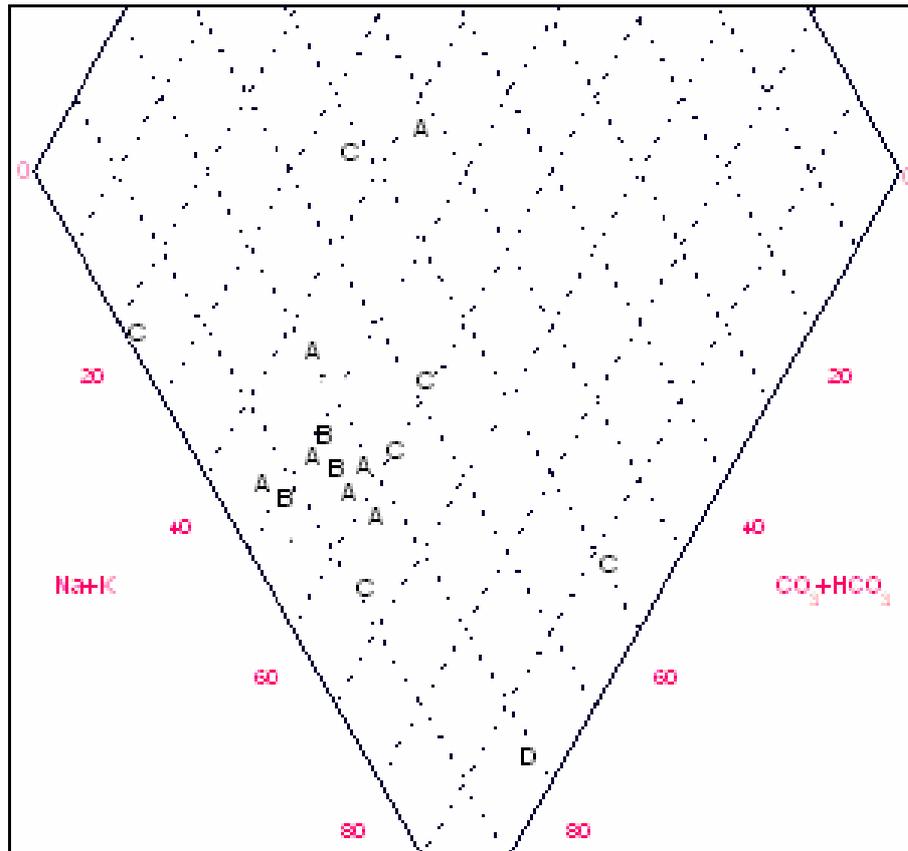
4.4.1 Relación entre la caracterización química del agua subterránea (Piper) y las herramientas estadísticas con la estratigrafía.

Para establecer la relación entre la composición química del agua subterránea y la estratigrafía del sitio de donde se extrajo, se recurrió al diagrama de Piper y a la estadística, tomando en cuenta la clasificación del pozo de acuerdo a los materiales rocosos presentes en cada caso.

a) Diagrama de Piper y grupos estratigráficos

En el diagrama de Piper, se comprobó la relación entre los grupos estratigráficos y las características químicas del agua subterránea. Al ubicar los grupos estratigráficos en el diagrama de Piper (Figura 13) se observaron las siguientes tendencias:

- Un agrupamiento de las andesitas y basaltos hacia el lado izquierdo en la parte inferior del diagrama (Pozos A). Aunque los pozos tipo A son 100% andesitas y basaltos, su dispersión fue superior que los del tipo B y menor que los del tipo C. Lo anterior se puede asociar a diferencias en la composición mineral de las andesitas y basaltos presentes en los pozos tipo A.
- Una zona donde se localizan muestras con mayoría de materiales lacustres (pozos B). Estos pozos presentaron la menor dispersión en el diagrama, posiblemente debido a homogeneidad en los materiales lacustres presentes.
- Una zona de transición, donde no predomina un tipo de roca, en la parte media, hacia debajo del diagrama (Pozos C). Estos presentaron la mayor dispersión debido a que los materiales rocosos presentes son variados.
- En la esquina inferior del diagrama de Piper, se ubica el pozo 31 (localizado al noroeste del Valle de Querétaro), su corte litológico indica la presencia de calizas que pueden corresponder a los depósitos cretácicos.



Grupo	Número del pozo
A	21
A	12
A	11
A	22
A	9
A	36
A	3
B	25
B	1
B	26
C	35
C	32
C	30
C	33
C	17
C	34
D	31

Figura 13. Grupos estratigráficos (A, B, C y D) en el diagrama de Piper.

b) Análisis de cluster y grupos estratigráficos

Para el análisis de agrupamiento de las muestras por clusters (grupos), se evaluó la cantidad de iones mayores. Se utilizó el programa MINITAB 15.0, utilizando como base de los agrupamientos la distancia euclidiana. El dendograma relacionado con los grupos estratigráficos se muestra en la Figura 14. Este dendograma indica que existe un vínculo (en base a las distancias euclidianas) entre la composición química del agua subterránea (iones mayores) y el grupo estratigráfico correspondiente. Este vínculo se demuestra al ubicarse los grupos estratigráficos en conglomerados con distancias euclidianas cercanas.

Las observaciones en base al análisis de clusters son:

- El grupo A refiere a clusters (o subgrupos) tanto lejanos como cercanos (asociado a diferencias en la composición mineral de las andesitas y basaltos), donde predominaron los elementos con distancia euclidianas similares.
- Los elementos del grupo B formaron los clusters más cercanos entre sí (posiblemente debido a la homogeneidad de materiales lacustres presentes).
- El grupo C se ubicó en clusters tanto lejanos como cercanos, sin una tendencia (debido a que esta agrupación de pozos presenta gran heterogeneidad en sus materiales rocosos).

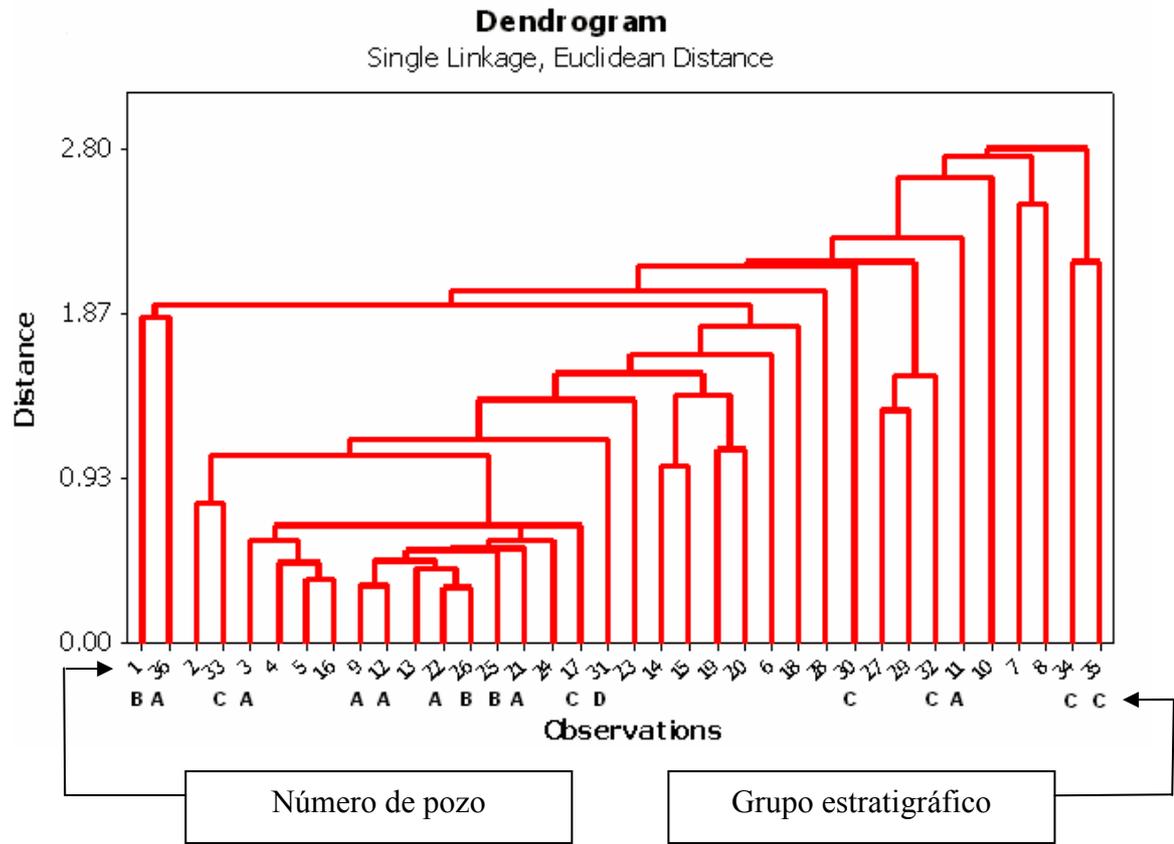


Figura 14. Grupos estratigráficos en el diagrama de clusters (A, B, C y D).

c) Índice de correlación

El índice de correlación desarrollado por Tien-Chang (1998) indica el grado de similitud existente entre un grupo de muestras de agua, con respecto al contenido de iones mayores. El anterior índice de correlación proporciona un valor positivo con rango de 0 a 1 para cada una de las muestras. El índice de correlación es útil para ayudar a establecer el grado de parentesco en aguas proveniente de acuíferos complejos (multi-capa, profundos, con intercalaciones de secuencias granulares y fracturadas), puesto que valores cercanos a 1 pueden evidenciar que pasaron por procesos similares. Los pozos 30 y 10 tuvieron los índices de correlación más bajos en el Valle de Querétaro (Cuadro 5), esto indica que fueron las muestras con mayor variación con respecto al total que se evaluaron.

Cuadro 5. Resumen de los índices de correlación en muestras de agua subterránea del Valle de Querétaro.

Pozo	Pozo de mayor correlación	Pozo de menor correlación
1	22 (0.9996)	10 (0.4458)
2	33 (0.9983)	10 (0.3604)
3	5 (0.9995)	10 (0.4575)
4	16 (0.9996)	10 (0.4523)
5	3 (0.9995)	10 (0.4678)
6	27 (0.9912)	10 (0.6390)
7	8 (0.9872)	30 (0.5027)
8	7 (0.9872)	30 (0.3742)
9	13 (0.9994)	10 (0.4912)
10	11 (0.7929)	30 (0.1955)
11	34 (0.9407)	8 (0.6816)
12	13 (0.9995)	10 (0.5213)
13	12 (0.9995)	10 (0.4984)
14	3 (0.9940)	10 (0.4940)
15	14 (0.9909)	10 (0.5373)
16	4 (0.9996)	10 (0.4622)
17	12 (0.9927)	10 (0.5971)
18	14 (0.9722)	10 (0.3304)
19	36 (0.9995)	10 (0.5218)
20	23 (0.9939)	10 (0.6204)
21	23 (0.9988)	10 (0.4721)
22	26 (0.9999)	10 (0.4470)
23	20 (0.9939)	10 (0.6741)
24	5 (0.9980)	10 (0.5090)
25	2 (0.9982)	10 (0.3886)
26	22 (0.9999)	10 (0.4487)
27	32 (0.9937)	30 (0.6332)
28	20 (0.9889)	10 (0.6259)
29	27 (0.9894)	10 (0.5201)
30	33 (0.9669)	10 (0.1955)
31	21 (0.9944)	10 (0.4660)
32	27 (0.9937)	30 (0.6180)
33	2 (0.9983)	10 (0.3495)
34	35 (0.9767)	10 (0.6419)
35	17 (0.9914)	10 (0.6446)
36	19 (0.9995)	10 (0.5109)

* En negritas el número de pozo, entre paréntesis se muestra el valor del índice de correlación.

Lo anterior fue congruente con la caracterización hidrogeoquímica obtenida por los diagramas de Stiff y Piper, donde dichos pozos son de grupos de agua diferentes al común encontrado en el Valle de Querétaro. El índice también comprobó una relación dentro de los grupos estratigráficos (Cuadro 6), a continuación se explica cada uno:

- El grupo A, siempre presentó menor variación que el grupo C y menor que el grupo B, lo que se asocia a que en algunos casos las andesitas y basaltos tuvieron cierta variación en sus composiciones minerales.
- El grupo B, presentó menor variación, asociado a homogeneidad en los materiales lacustres presentes.
- El grupo C, presentó mayor variación, asociado a la heterogeneidad de los materiales rocosos que lo componen.
- El grupo D no es comparable, puesto que sólo se compone del pozo 31.

Cuadro 6. Correlación promedio entre los diferentes grupos estratigráficos presentes en el acuífero del Valle de Querétaro.

	PROMEDIO	A	B	C	D
A	0,94734	0,95514	0,96573	0,92741	0,95718
B	0,96421	0,96573	0,99845	0,94093	0,99065
C	0,92427	0,92741	0,94093	0,90900	0,94397
D	0,96094	0,95718	0,99065	0,94397	1.00000

Los análisis de similitud dentro de los grupos estratigráficos en base a los diagramas de Piper, índices de correlación y clusters, indican que existe congruencia entre los agrupamientos en base a los análisis químicos del agua con los grupos estratigráficos correspondiente a cada pozo. La congruencia en los diferentes análisis realizados indica que existe una relación entre la estratigrafía y la composición química del agua subterránea.

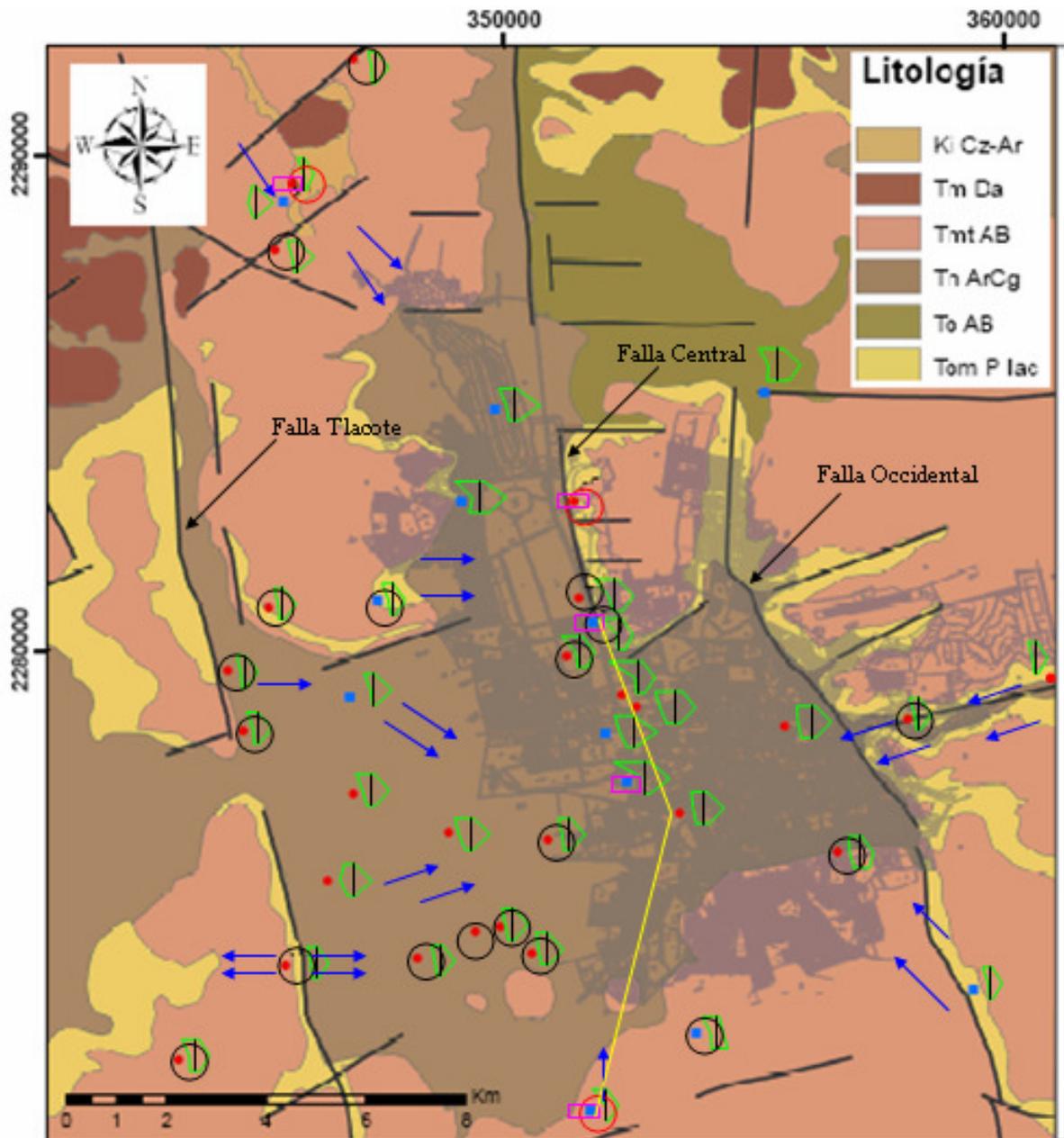
4.4.2 Propiedades físico-químicas del agua subterránea en relación con la estructura del subsuelo y las condiciones de flujo

En la Figura 15, se presenta dentro del mapa geológico del Valle de Querétaro, una compilación de las tendencias en la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, pH y diagramas de Stiff.

En varias ocasiones los diagramas de Stiff no siguen la tendencia de aquellos que le rodean. Lo anterior pudiera deberse a que aunque un pozo esté cercano de otro espacialmente, cada uno puede estar extrayendo agua de unidades hidroestratigráficas de diferente profundidad. Un ejemplo de lo anterior es el pozo 18 localizado al sur oeste del Valle de Querétaro, cuyo diagrama de Stiff contrasta con todos los que le rodean.

Se observa que la temperatura en varios sitios del acuífero alcanza 30°C, y en algunos casos rebasa este valor. Dichas temperaturas anómalas se encuentran generalmente cercanas a las fallas y fracturas, las cuales se extienden a lo largo del Valle de Querétaro en tres sistemas principales (fallas Tlacote, central y occidental). De esta manera, las fallas y fracturas están asociadas a la actividad hidrotermal. Como evidencia de lo anterior se observa que a lo largo de la falla Tlacote localizada al oeste del Valle de Querétaro, cuatro pozos (21, 22, 24 y 26) registran temperaturas superiores a 30° C. Otro fenómeno se presenta en una franja ubicada al centro del Valle de Querétaro (asociada a la falla central), donde cuatro sitios (pozos 6, 7, 32 y 38) presentan valores de pH superiores a 8.5. Valores de pH altos se asocian a aguas subterráneas profundas. Diferencias entre los valores de los parámetros a un lado y otro de las fallas, indican que estas actúan como barreras ó canales de flujo (caso de la falla central, a la derecha de esta la cantidad de sólidos disueltos y la conductividad eléctrica es mayor que a la izquierda), caso similar a documentado Huisar-Álvarez (2003) en Pachuca, Hidalgo.

Tanto la conductividad eléctrica como los sólidos disueltos tienden a aumentar su valor de la periferia hacia el centro del Valle de de Querétaro. Estos parámetros indican como se movían los flujos de agua subterránea cuando el acuífero era libre (presión en equilibrio con la atmosférica) hace aproximadamente 50 años. Los diagramas de Stiff muestran un aumento de los iones mayores de la periferia al centro del Valle de Querétaro, aportando evidencia de que el agua solía moverse en dicha trayectoria.



- Pozo piloto
- Pozo testigo
- Fallas o fracturas
- Temperaturas mayores a 30°C
- pH Mayor a 8.5
- Tendencia de aumento de conductividad eléctrica ó sólidos disueltos
- Tendencia de aumento de conductividad eléctrica y sólidos disueltos

Figura 15. Distribución de la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, pH y diagramas de Stiff en diferentes sitios del Valle de Querétaro. Se muestran los diagramas de Stiff (en color verde). Nótese un alineamiento en los pozos con pH mayor a 8.5 (línea amarilla), siguiendo el trazo de la Falla Central.

4.4.3 Muestreo a dos profundidades entorno a flujos de agua subterránea

Con el objetivo de detectar flujos provenientes de diferentes unidades hidroestratigráficas, en Junio de 2007 se muestreó en pozos testigo a dos diferentes profundidades el mismo día y de forma puntual evitando la mezcla de aguas, cada muestra se caracterizó de manera independiente. Se observó que bajo las condiciones que se llevo a cabo el muestreo a dos profundidades, la toma de muestra puntual no distingue entre diferentes unidades hidroestratigráficas. Por lo tanto el muestreo puntual en un mismo sitio a dos profundidades no distinguió flujos provenientes de diferente profundidad. Como evidencia de lo anterior, las muestras de agua obtenidas del mismo pozo a dos diferentes profundidades aparecen muy cercanas en el diagrama de Piper (Figura 16), mientras que los diagramas de Stiff son muy similares (Figura 17).

Las muestras tomadas a dos profundidades del mismo pozo (testigos) tuvieron composiciones químicas muy similares, por lo tanto en todos los casos cabe destacar lo siguiente:

- Muestras tomadas a dos profundidades del mismo pozo ocuparon posiciones cercanas en el diagrama de Piper, incluso en algunos casos no se alcanzaba a distinguir una muestra de otra (Figura 16).
- Los diagramas de Stiff tomaron formas similares (Figura 17).

La similitud en las muestras tomadas a dos profundidades puede deberse a los siguientes sucesos:

- La mezcla de aguas donde intervienen factores como fracturas en los materiales geológicos y el ranurado del pozo.
- La distancia vertical entre una muestra y otra no haya sido suficiente para que se notaran diferencias.

En lo que refiere a las propiedades físico-químicas se tiene que:

- La conductividad eléctrica en las muestras aumentaba con la profundidad en la mayoría de los casos. En el caso del pozo 34 (localizado al noreste del valle de Querétaro), se presentó una diferencia de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre una profundidad y otra, debido a que los sólidos presentaron valores muy similares, se puede atribuirse a un error del equipo de medición.

- Los sólidos disueltos aumentaron con la profundidad (a excepción del pozo 34). Este aumento se debe a que bajo las mismas condiciones, el agua interactúa con la roca conforme se desplaza verticalmente en el subsuelo.
- En todos los pozos muestreados a dos profundidades el pH no siguió una tendencia (se esperaba que aumentara con la profundidad) lo que se le atribuye a la mezcla de aguas.

Las gráficas de conductividad eléctrica, sólidos disueltos y pH se presentan en la Figura 18.

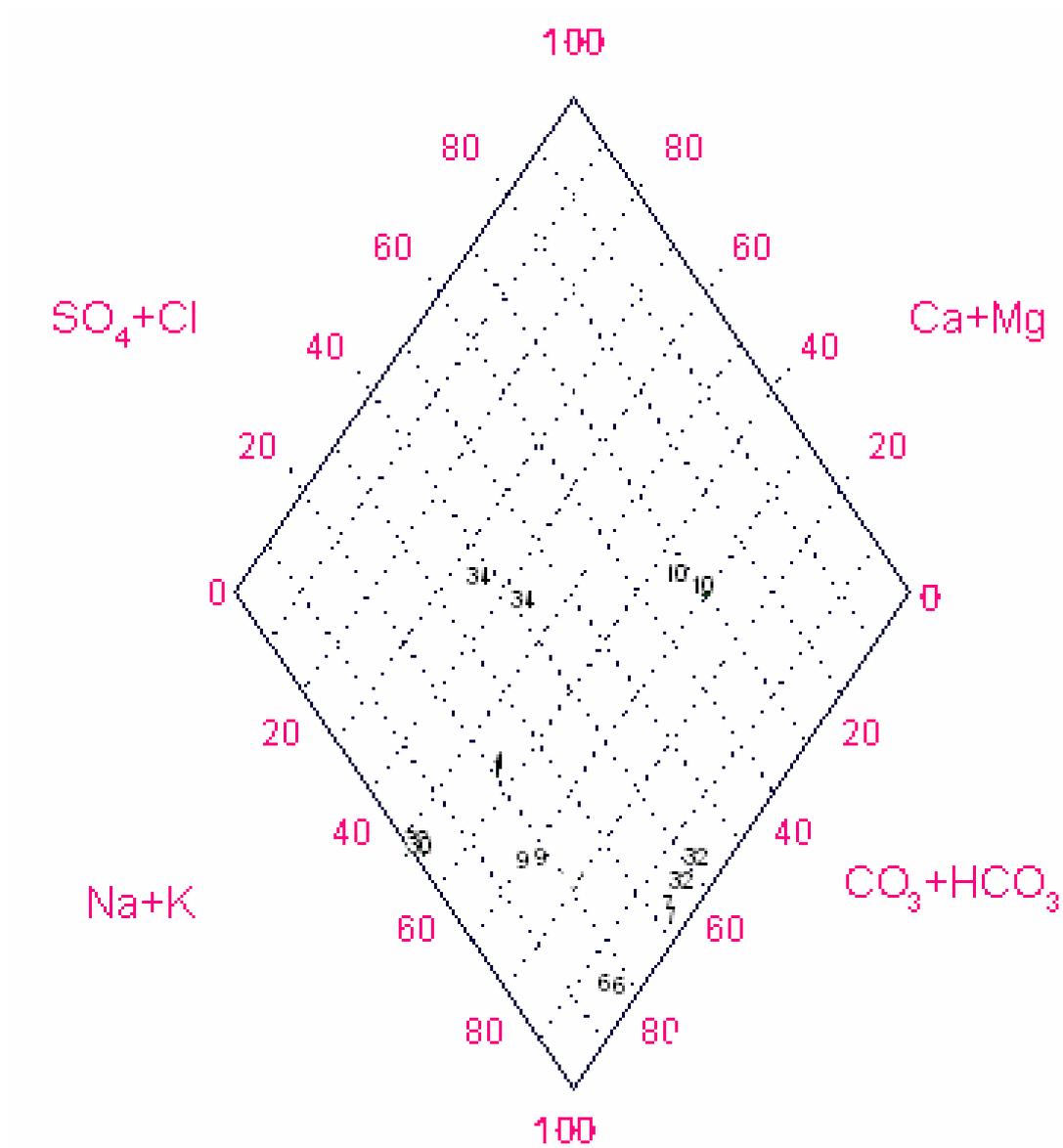


Figura 16. Diagrama de Piper de los pozos muestreados a dos diferentes profundidades. Aparecen las numeraciones dobles para indicar que se tomó muestra de agua subterránea a dos profundidades.

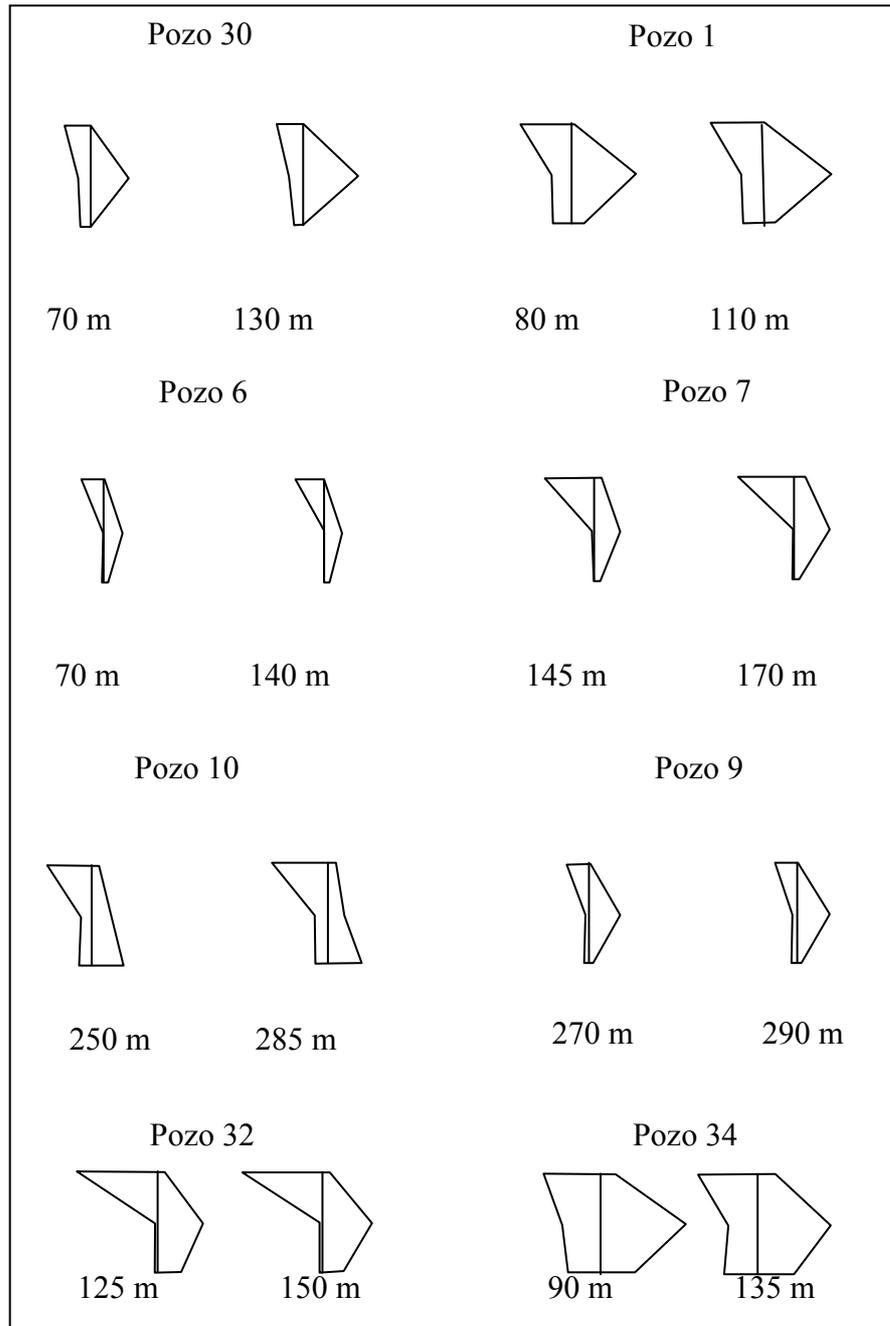
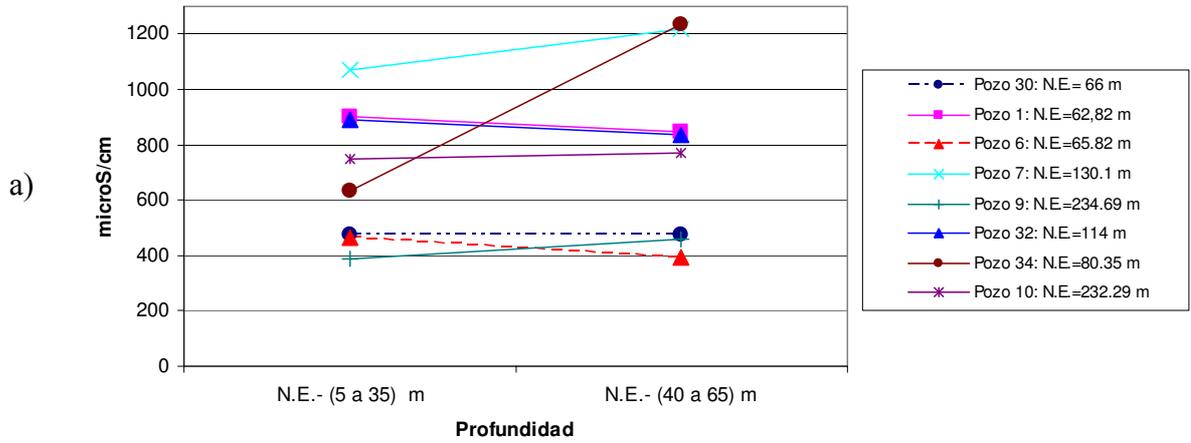
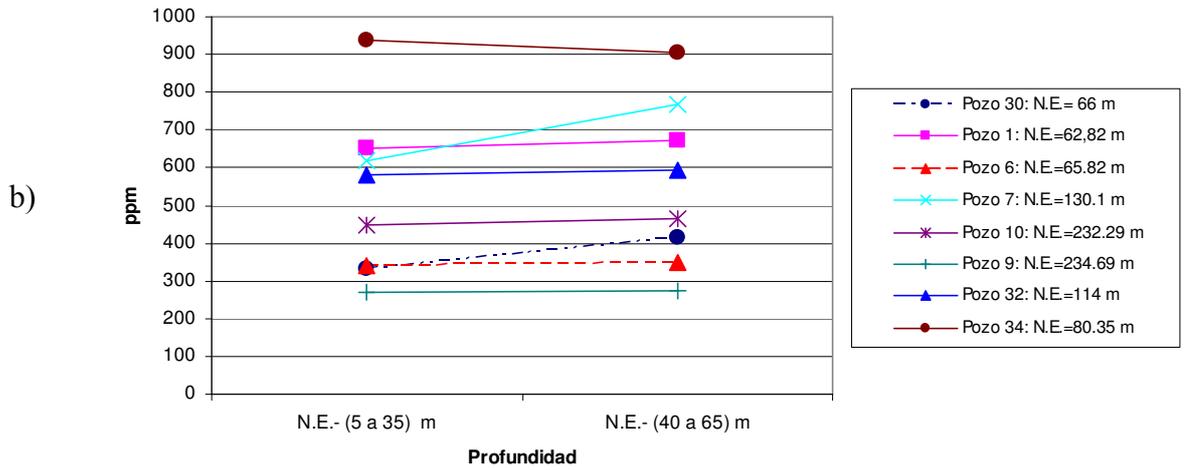


Figura 17. Diagramas de Stiff de los pozos testigo muestreados en Junio de 2007 a dos profundidades.

Variación de la conductividad eléctrica



Variación de los sólidos disueltos



Variación del pH

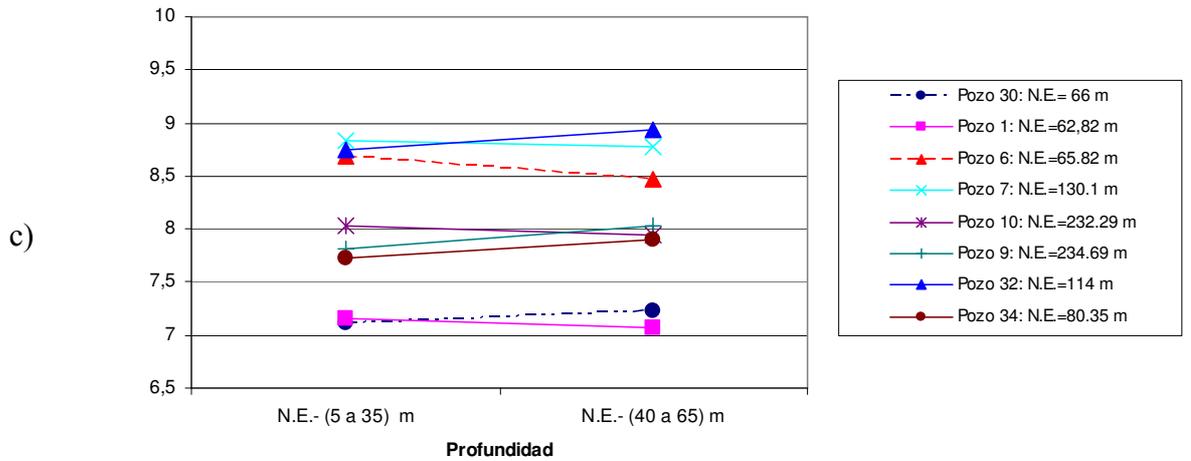


Figura 18. Variación en la conductividad eléctrica (a), sólidos disueltos (b) y pH (c), en dos rangos de profundidad por debajo del nivel estático (N.E.).

4.4.4 Variaciones en las características del agua subterránea en los tres periodos de muestreo y su relación con las condiciones de flujo

Con el objetivo de buscar la relación entre la recarga pluvial y los condiciones de flujo, se tomaron muestras en Junio 2007 (inicio de lluvias), Septiembre de 2007 (lluvias) y Diciembre 2007-Febrero 2008 (época de sequía).

El diagrama de Piper de los ocho pozos testigos (1, 6, 7, 9, 10, 17, 30 y 32) muestreados a intervalos de tiempo se muestra en la Figura 19. Existen dos comportamientos diferentes en los que se pueden presentar, en uno se trasladan las muestras hacia la derecha siguiendo la secuencia de muestreo y el otro en donde las muestras no presentan movimiento en una dirección definida.

- Los pozos que siguen una dirección definida son 30, 17 y 32, desplazándose a la izquierda del diagrama de Piper. Estos pozos tienen una tendencia al aumento de calcio y la disminución de sodio aumentando la alcalinidad, lo que puede ser explicado por la dilución de rocas calizas que contienen carbonato de calcio.
- Los demás pozos (1, 6, 7, 9 y 10) no siguen un movimiento en una dirección definida.

En la Figura 20 se presentan los diagramas de Stiff de los ocho pozos testigo donde se tomó muestra en Junio 2007 (a), Septiembre 2007 (b) y Diciembre 2007 a Febrero 2008 (c), encontrándose que:

- En el pozo 30 localizado al noroeste del valle de Querétaro, se presentó una disminución gradual del contenido de sodio y potasio, aumentando la concentración de calcio, en el primer muestreo el agua se caracterizó como bicarbonatada-sódico-magnésica, y fue cambiando su composición hasta llegar a ser bicarbonatada-cálcica, lo que nos habla de una posible disolución de calizas.
- Los pozos 1, 6, 7, 9, 10, 17 y 32 siguen un patrón similar en los tres muestreos con ligeras variaciones temporales.

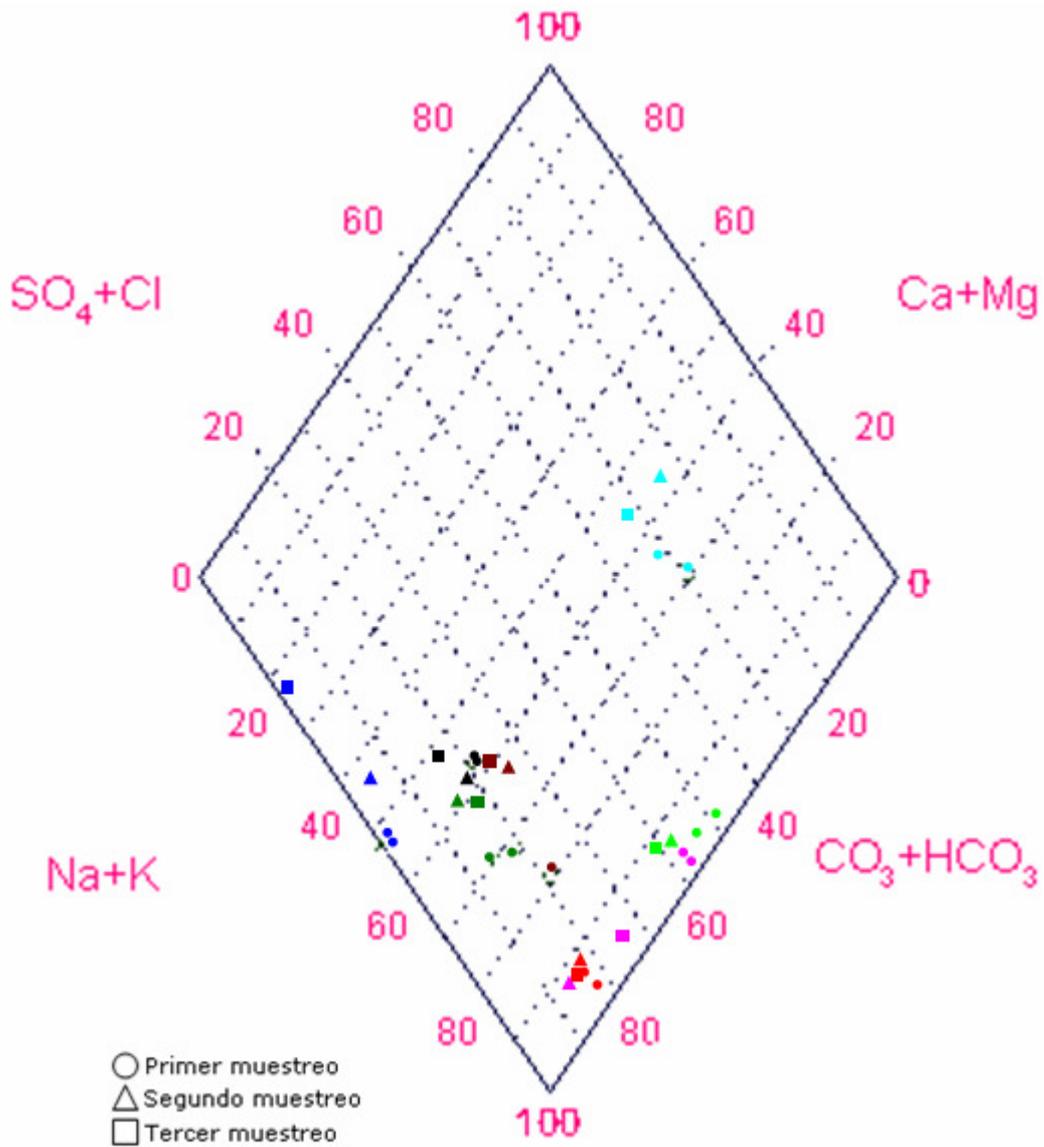
Al graficar la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos y el pH (Figura 21) para cada periodo de muestreo, se observó lo siguiente:

- Para la conductividad se observaron tres comportamientos diferentes. El primer comportamiento consistió en una disminución gradual de la conductividad (pozos 9 y 10), posiblemente un flujo constante aporta agua causando dilución. En el segundo comportamiento, la conductividad aumentaba y volvía a disminuir (pozos 1, 17, 6, 7 y 32), en este periodo de muestreo se presentó la época de lluvias, pero la recarga podría provenir de zonas lejanas y hasta el tercer muestreo se observó la dilución. Finalmente, en el tercer comportamiento la conductividad eléctrica disminuía y volvía a aumentar (pozo 30) donde la dilución se tiene muy ligada a las lluvias, aumentando nuevamente la conductividad ya que finalizaban las recargas pluviales.
- En los sólidos disueltos hubo dos tendencias una a subir y luego disminuir y la otra un descenso continuo. Al aumentar y disminuir la cantidad de sólidos disueltos (pozos 30, 1, 6, 7, 10, 9 y 32), pudiese indicar que las recargas no provienen de zonas cercanas, puesto que aunque llueve los sólidos disueltos aumentan, y en el tercer muestreo disminuyen nuevamente por dilución cuando el agua de las lluvias anteriores llega hasta ellos. El pozo 17 presentó una tendencia constante a la disminución de sólidos disueltos, posiblemente por la existencia de un flujo que se presenta de manera constante.
- El pH se comportó en dos formas diferentes, la primera de aumentar y disminuir, y la segunda una disminución continua. El ascenso y posterior descenso del pH (pozos 30, 1, 6, 7, 17 y 9) se puede asociar primero a una concentración de ciertos materiales disueltos, y el descenso a una dilución (que acerca el pH a la neutralidad) ligada a la recarga pluvial. El descenso constante del pH puede indicar un aporte constante de algún flujo.

Al comparar las variaciones de conductividad eléctrica, sólidos disueltos y pH, se observó que sólo tres pozos siguen la misma tendencia en los tres muestreos (1, 6 y 7). Esto pudiera explicarse a que se tuvieron problemas con el

equipo de medición (conductividad y pH), que pudieron ocasionar que algunas lecturas presentaran cierto error. Puesto que los sólidos disueltos se determinaron por la suma de los iones mayores y menores obtenidos de los análisis de laboratorio, éste es el parámetro con mayor exactitud y al que se le tiene mayor confianza para relacionar las lluvias con la recarga al acuífero.

La diferencia en tiempo de los cambios de conductividad, sólidos disueltos y pH, con respecto a las lluvias, puede dar idea de la lejanía de la recarga de origen pluvial.



- | | | | |
|------|-----|------|------|
| ● 6 | ● 7 | ● 32 | ● 10 |
| ● 17 | ● 9 | ● 1 | ● 30 |

Figura 19. Diagrama de Piper de los ocho pozos testigo muestreados en tres periodos de tiempo (Junio 2007, Septiembre 2007 y Diciembre 2007 – Febrero 2008).

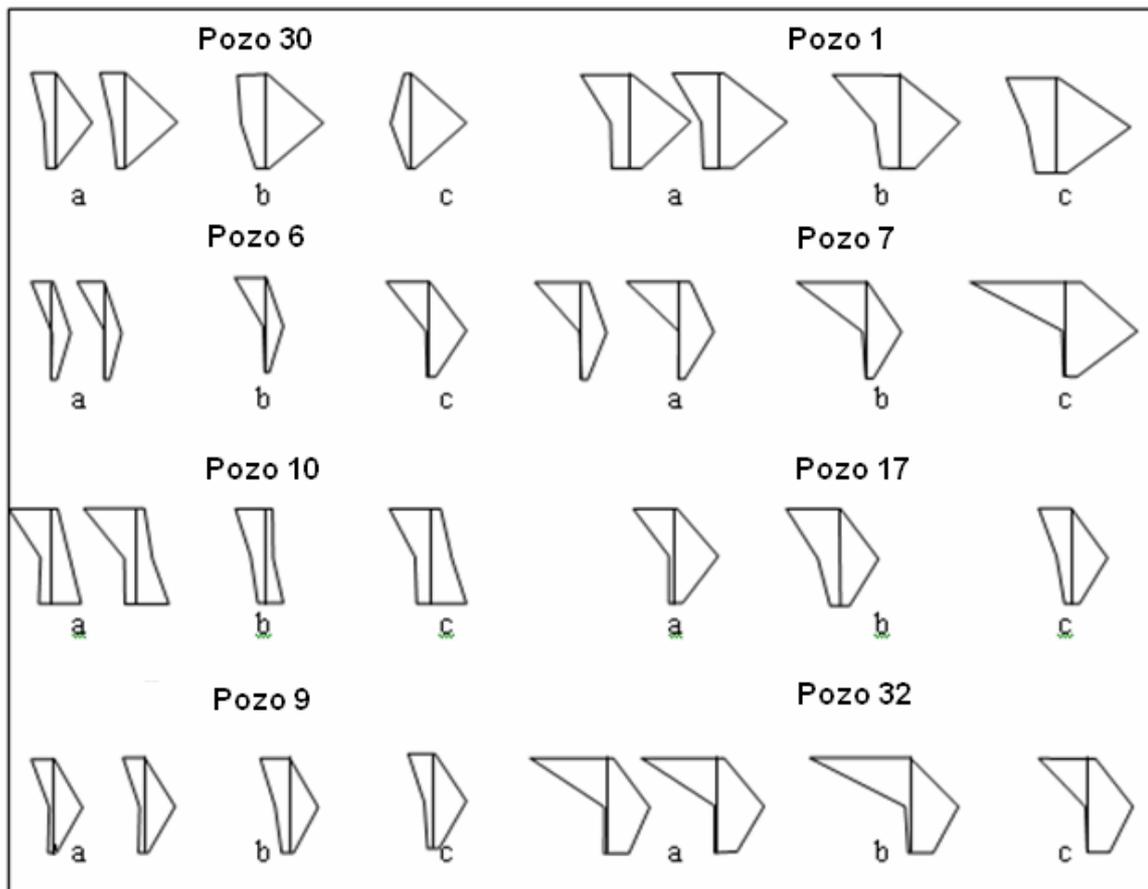


Figura 20. Diagramas de Stiff de los pozos testigo muestreados en Junio 2007 (a), Septiembre 2007 (b) y Diciembre 2007 a Febrero 2008 (c).

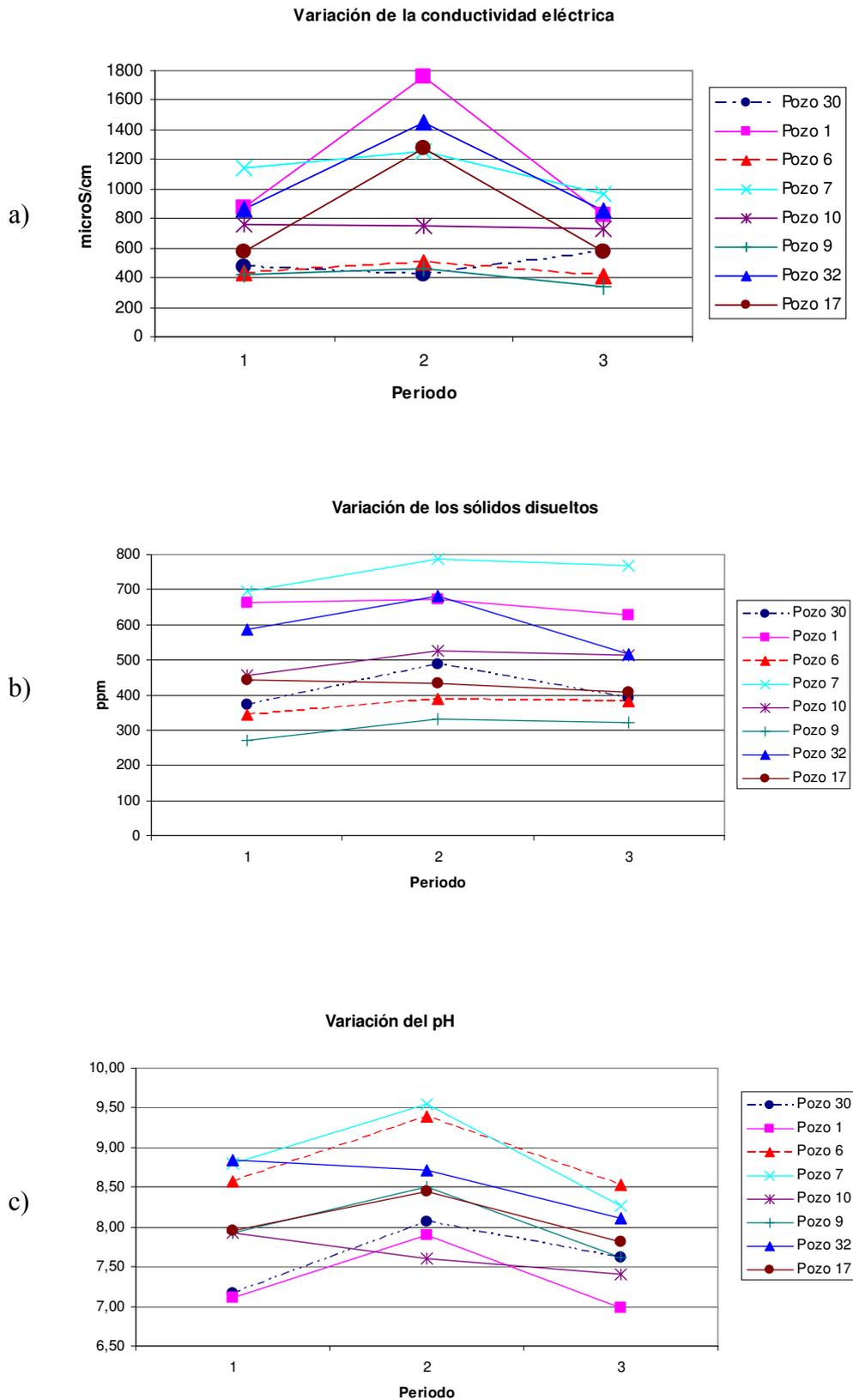


Figura 21. Variación en la conductividad eléctrica (a), sólidos disueltos (b) y pH (c), en tres periodos de muestreo (Junio 2007, Septiembre 2007 y Diciembre 2007 – Febrero 2008).

4.4.5 Flujos locales, intermedios y regionales en el acuífero del Valle de Querétaro

La clasificación de los sistemas de flujo de agua subterránea se realiza en base al conocimiento hidráulico de la zona en estudio, entorno al marco geológico y la influencia antropogénica, por lo que las consideraciones propias para un pozo difícilmente se pueden extrapolar a otros. Carrillo-Rivera *et al.* (2001;2002) han realizado estudios hidrogeoquímicos en Zacatecas, Guanajuato, San Luís Potosí, Querétaro e Hidalgo, estados que comparten cierta similitud geológica y estructural en sus acuíferos. Estos autores proponen que cuanto mayor es la profundidad de un flujo de agua subterránea se registra un aumento en el valor de parámetros como el flúor, litio, sodio, temperatura, sólidos disueltos y conductividad eléctrica. Los flujos clasificados como locales presentan los valores más bajos en los parámetros evaluados. Los flujos intermedios tienen características medias entre los locales y regionales. Los flujos clasificados como regionales registran los valores más altos en los parámetros evaluados, en especial de temperatura, sólidos disueltos y conductividad. Es importante mencionar que un pozo puede recibir aportaciones de uno ó más flujos. Como ejercicio en el cuadro 7 se propone una clasificación de los flujos en base a su profundidad. El pozo 31 vuelve a ser diferente a todos los presentes en el Valle de Querétaro, ya que aunque los sólidos disueltos y la conductividad eléctrica son bajos es clasificado como regional, debido a su profundidad (1000 m) y los valores altos de temperatura registrados durante su operación (65°C). La clasificación de los flujos que se presenta, es congruente con los resultados de las propiedades físico-químicas mostradas en la figura 15, en el hecho de que cada vez se esta extrayendo agua de mayor profundidad, por lo que en el Valle de Querétaro cada vez hay menos flujos locales (la mayoría ubicados en zonas altas del valle), presentándose una mayor cantidad de intermedios que a su vez siguiendo los regimenes actuales de explotación tendrán a extraer agua de regionales. En la Figura 22 se presenta la piezometría reportada por CONAGUA en 2007 así como la distribución de las principales propiedades físico-químicas y los diagramas de Stiff para el Valle de Querétaro. Se observan en la zona central del Valle (rodeada de fracturas) variaciones en la dirección de los flujos intermedios (determinadas por las unidades hidroestratigráficas y las condiciones de explotación). Dicha zona presenta los

mayores descensos del nivel estático y los mayores contenidos de calcio, sugiriendo una aportación de agua que circula por las calizas correspondiendo a un flujo regional. La actividad termal y las mayores concentraciones de litio en zonas de fallas implican una aportación de agua con influencia magmática.

Cuadro 7. Tipos de flujos en los sitios donde se muestreo agua subterránea del acuífero del Valle de Querétaro.

Número de Pozo	Tipo de Pozo	Na	Li	F	Temp.	Cl	S. Dis.	Conduc.	pH	Flujo
		ppm	ppb	ppm	°C	ppm	ppm	µS/cm		
9	Testigo	48,06	30,83	0,62	23,00	5,43	299,17	579,00	7,99	Local
30	Testigo	41,20	18,43	0,37	25,00	1,10	406,12	486,75	7,51	Local
2	Piloto	56,50	38,91	0,35	30,00	2,24	448,34	471,00	7,09	Intermedio
3	Piloto	65,61	59,64	0,58	29,50	23,56	539,32	687,00	7,20	Intermedio
4	Piloto	55,48	54,52	0,58	30,00	9,27	439,90	541,00	7,22	Intermedio
5	Piloto	60,94	54,95	0,60	30,00	17,91	485,14	600,00	7,13	Intermedio
12	Piloto	48,94	47,63	0,85	30,00	7,42	335,26	403,00	7,62	Intermedio
13	Piloto	54,44	60,05	0,94	32,00	10,07	380,84	434,00	7,43	Intermedio
16	Piloto	62,42	80,85	0,72	30,00	21,07	493,82	599,00	7,46	Intermedio
18	Piloto	50,96	26,65	0,31	26,00	20,06	599,80	733,00	6,99	Intermedio
19	Piloto	93,01	51,25	0,59	26,00	28,25	671,21	844,00	7,49	Intermedio
21	Piloto	61,55	87,04	0,74	34,00	6,93	427,29	512,00	7,52	Intermedio
22	Piloto	52,31	43,96	0,50	32,00	4,33	402,61	462,00	7,61	Intermedio
23	Piloto	81,39	70,81	0,82	30,00	27,03	516,13	717,00	7,61	Intermedio
24	Piloto	52,57	50,80	0,59	30,00	12,16	401,70	500,00	7,63	Intermedio
25	Piloto	42,77	21,62	0,38	33,00	2,58	342,64	400,00	7,47	Intermedio
26	Piloto	49,94	40,93	0,49	32,00	4,82	388,42	452,00	7,81	Intermedio
28	Piloto	116,78	33,06	0,54	24,00	84,60	839,80	1147,00	7,36	Intermedio
33	Testigo	59,00	109,68	0,50	-	4,80	499,52	504,00	-	Intermedio
36	Testigo	114,77	32,38	0,56	25,50	0,00	689,14	1317,00	7,31	Intermedio
1	Testigo	106,76	237,39	2,27	23,00	10,16	656,11	1082,75	7,28	Regional
6	Testigo	108,78	19,92	0,90	38,50	3,78	364,51	443,50	8,77	Regional
7	Testigo	236,36	288,57	7,81	24,70	45,41	735,99	1126,00	8,86	Regional
8	Piloto	187,00	416,50	2,40	16,00	53,97	717,38	940,00	7,69	Regional
10	Testigo	98,56	29,91	0,33	34,50	33,70	488,20	751,75	7,71	Regional
11	Piloto	64,59	63,41	0,48	33,00	24,92	607,56	760,00	7,16	Regional
14	Piloto	77,51	146,20	1,24	-	30,03	734,19	542,00	7,43	Regional
15	Piloto	90,63	156,10	1,35	-	43,79	836,93	1063,00	7,26	Regional
17	Testigo	82,55	97,15	1,93	31,85	9,03	428,07	811,00	8,07	Regional
20	Piloto	101,34	112,70	0,75	27,50	26,05	595,69	855,00	7,32	Regional
27	Piloto	129,00	262,00	2,34	31,00	25,51	679,07	844,00	7,49	Regional
29	Piloto	119,65	226,00	2,03	30,00	24,68	592,45	797,00	7,49	Regional
31	Piloto	43,00	39,97	2,80	65,00	0,80	257,61	480,00	9,15	Regional
32	Testigo	163,07	398,84	3,42	33,00	19,93	592,98	1006,75	8,63	Regional
34	Testigo	118,50	53,68	2,25	-	56,70	919,80	934,50	7,81	Regional
35	Testigo	148,00	306,11	1,10	27,80	52,50	949,82	1438,00	7,60	Regional

* Los pozos muestreados en más de una ocasión ó a dos profundidades, fueron promediados.

V. CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis químicos (realizados en laboratorio) y físico-químicos (medidos en campo) de las muestras de agua subterránea extraída de diferentes sitios del acuífero del Valle de Querétaro, indican que las cantidades de iones mayores, menores y elementos traza en la mayoría de los pozos cumplen con los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización).

El 86% de los sitios donde se analizaron nitratos presentaron cantidades superiores a la normatividad, probablemente asociado a la intrusión de fertilizantes o aguas negras; el litio, se presentó en cantidades anómalas en la zona noroeste del Valle de Querétaro, lo que se relaciona con aguas que han interactuado con materiales geológicos de tipo magmático básico; y en 4 sitios cercanos a la falla central el pH rebasó el límite permisible de 8.5.

La concordancia entre los agrupamientos de pozos por dos caminos diferentes, uno en base a la geología y otro a partir de los iones mayores (diagrama de Piper, clusters e índices de correlación) estableció una relación entre la estratigrafía y la composición química del agua subterránea.

Los cambios en la composición química del agua subterránea con respecto a los iones mayores, las temperaturas superiores a 30°C, valores de pH superiores a 8.5 y conductividad eléctrica (por arriba del promedio), en los pozos ubicados en las cercanías a fallas y fracturas, demuestran que estas actúan como fronteras de flujo (barreras ó canales).

El aumento de los sólidos disueltos y la conductividad eléctrica del agua subterránea, de la periferia hacia la planicie del Valle de Querétaro, indica un flujo superficial hacia el centro de la cuenca que prevaleció probablemente cuando el acuífero tenía condiciones someras.

La variación en las cantidades de iones mayores en las muestras de agua subterránea tomadas en diferentes periodos de tiempo (antes, durante y después de las lluvias), indican que existe una relación entre los flujos de ciertos pozos (30, 17 y 32) y la infiltración de origen pluvial.

Las características químicas y físico-químicas del agua subterránea provenientes de 36 diferentes sitios del acuífero del Valle de Querétaro indican que se presenta una mayoría de flujos intermedios, seguidos en cantidad por regionales y solo dos locales. Donde el descenso del nivel estático de los pozos y los valores por arriba del promedio de sodio, litio, flúor, temperatura y sólidos disueltos indican que cada vez se esta extrayendo agua de mayor profundidad.

La información aportada en este trabajo de investigación demuestra que para el estudio de sistemas de flujo de agua subterránea en las condiciones actuales del Valle de Querétaro (acuífero profundo, multicapa, con intercalaciones de medio granular y medio fracturado), no es suficiente el monitoreo de niveles piezométricos. El monitoreo del agua subterránea tanto físico como químico, dentro del marco de la geología local, ha generado conocimiento sobre los mecanismos que rigen a los sistemas de flujo y recarga del agua subterránea en el Valle de Querétaro.

VI. LITERATURA CITADA

- Aguirre, D.G.J., Ramón, Z.F., Pacheco, A. F.J., Guzmán, S.M., Nieto, O.J., 1998, El graben de Querétaro, México, observaciones de fallamiento activo. *Geos*, v. 2, n. 1: 2-7.
- Barbieri, M., Boschetti, T., Petitta, M., Tallini, M., 2005, Stable isotope (^2H , ^{18}O and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Applied Geochemistry*, 20: 2063-2081.
- Cánovas, C.R., Olías, M., Nieto, J.M., Cerón, J.C., 2007, Hidrogeochemical characteristics of the Tinto and Odiel Rivers (SW Spain). Factors controlling metal contents. *Science of the total Environment*, 373: 363-382.
- Carreón, F. D., Ochoa, G. H., Ortiz, V. I., Barrón, M. I., Gámez, G. F. J., Pérez, V. J., León, R. A., Barajas, N. D. 2007. Monitoreo del Flujo de Agua Subterránea en el Valle de Querétaro. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59:2.
- Carreón, F.D., Cerca, M., Luna, G.L., Gámez, G.F.J., 2005, Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geofísicas* v. 22, n. 1: 1-18.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Herat, T., 2001, Inducción de agua termal profunda a zonas someras; Aguascalientes, México. *Revista Latinoamericana de Hidrología*, v. 1, n. 1: 41-53.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Edmundo, W.M., Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosi basin, México. *Journal of Hydrology* 261: 24-47.
- Centro Queretano de Recursos Naturales (CQRN), 2003, El sistema de agua en la región Querétaro de la cuenca Lerma-Chapala. Publicación del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro, Primer Reporte Técnico.
- Chi-Man, L., Jiao, J.J., 2006, Heavy metal and trace elements distributions in groundwater in natural slopes and highly urbanized spaces in Mid-Levels area, Hong Kong. *Water Research*, 40: 753-767.
- Comisión Estatal de Aguas (CEA), Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), 2002, Estudio integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro. Convenio de Colaboración CEA-UAQ, Tomo 1.

- Connair, D.P., Murray, B.S., 2002, Karst groundwater basin delineation, Fort Knox, Kentucky. *Engineering Geology*, 65: 125-131.
- Convoy, M.J., Goss, M.J., 2000, Natural protection of groundwater against bacteria of fecal origin. *Journal of Contaminant Hydrology* v. 1: 1-24.
- Cooke, M.L., Simo, J.A., Underwood, C.A., Rigken, P., 2006, Mechanical stratigraphic controls on fracture patterns within carbonates and implications for groundwater flow. *Sedimentary Geology*, 184: 225-239.
- Custodio, E., Llamas, M.R., 1996, *Hidrología subterránea*. Editorial Omega Segunda Edición.
- D'Amore, F., 1983, Some observations on the chemical classification of ground waters. *Geothermics*, v. 12, n. 2/3: 141-148.
- Deutsch, W.J., 1997, *Groundwater Geochemistry, Fundamentals and Applications to Contamination*. Editores Lewis, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida.
- Dotsika, E., Leontiadis, I., Poutoukis, D., Cioni, R., Raco, B., 2006, Fluid geochemistry of the Chios geothermal area, Chios Island, Greece. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 154: 237-250.
- EPA Method 200.8, Determination of trace elements in water and wastewaters by ICP-Mass Spectrometry.
- EPA Method 300.1, Determination of inorganic anions in drinking water by ion chromatography.
- EPA Method 700.B, Flame atomic absorption spectrophotometry.
- Eser, P., Rosen, M.R., 1999, The influence of groundwater hydrology and stratigraphy on the hydrogeochemistry of Stump Bay, South Taupo Wetland, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 220: 27-47.
- Fairchild, I.J., Tuckwell, G.W., Baker, A., Tooth, A.F., 2006, Modelling of dripwater hydrology and hydrogeochemistry in a weakly karstified aquifer (Bath, UK). Implications for climatic change studies. *Journal of Hydrology*, 321: 213-231.
- Farnham, J.M., Johannesson, K.H., Singh, A.K., Stetzenbach, K.J., 2003, Factor analytical approaches for evaluating groundwater trace elements chemistry data. *Analytica Chimica Acta*, 490: 123-138.
- Flores, I.N., Jacobo, M.A., Martínez, H., 2005, Evolución de la calidad del agua en el acuífero costero de Veracruz. *Quinto Congreso Nacional de Aguas Subterráneas*.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*. Editorial Prentice Hill.

- Gammons, C.H., Wood, S.A., Pedrozo, F., Varekamp, J.C., Nelson, B.J., Shope, C.L., Baffico, G., 2005, Hydrogeochemistry and rare earth element behavior in a volcanically acidified watershed in Patagonia, Argentina. *Chemical Geology*, 222: 249-267.
- Gi-Tak, C., Seong-Taek, Y., Kangjoo, K., Bernhard, M., 2006, Hydrogeochemistry of sodium-bicarbonate type bedrock groundwater in the Pocheon spa area, South Korea: water-rock interaction and hydrologic mixing. *Journal of hydrology*, 321: 326-343.
- Gómez, S.G., Martín, D.M., 2002, Flúor y fluorosis dental. Dirección General de Salud Pública, Primera Edición.
- Guler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E., Turner, A.K., 2002, Evaluation of graphical multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10: 455-474.
- Gupta, S.K., Deshpande, R.D., Bhattacharya, S.K., Jani, R.A., 2005, Groundwater S¹⁸O and SD from central Indian Peninsula. influence of the Arabian Sea and the Bay of Bengal branches of the summer monsoon: *Journal of Hydrology*, 303: 38-55.
- Gutiérrez, C.N., Palacios, V.E., Peña, D.S., Palacios, V.O., 2002, Escenarios para el aprovechamiento sustentable del acuífero del Valle de Querétaro. *Agrociencia* v. 36, n. 1: 1-10.
- Herrera-Zamarrón, G., Simuta-Champo, R., Bravo-Jácome, A. 2007, Modelo de flujo del agua subterránea y diseño de red de monitoreo para el acuífero del Valle de Querétaro. Segundo Congreso Nacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, México.
- Hounslow, A.W., 1995, *Water Quality Data, Análisis and Interpretation*. Editores Lewis.
- Huizar-Alvarez, R., Hernández, G., Carrillo-Martínez, M., Carrillo-Rivera, J.J., Hergt, T., Ángeles, G., 2003, Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, central México. *Environmental Geology* 43: 385-389.
- Hussain, M., Ahmed, S.M., Abdrrahman, W., 2008, Cluster analysis and quality assessment of logged water at an irrigation project, eastern Saudi Arabia: *Journal of Environmental Management*, 86: 297-307.
- Izbicki, J.A., Sramos, C.L., Nishikawa, T., Martin, P., 2004, Comparison of ground-water flow model particle-tracking results and isotopic data in the Mojave River ground-water basin, southern California, USA. *Journal of Hydrology* 292: 30-47
- Kehew, A.E., 2001, *Applied chemical hydrogeology*. Editorial Prentice Hill, Upper Saddle New Jersey.

- Lee, L., Helsel, D., 2005, Baseline models of trace elements in major aquifers of the United States. *Applied Geochemistry*, 20: 1560-1570.
- Leybourne, M.I., Clark, I.D., Goodfellow, W.D., 2006, Stable isotope geochemistry of ground and surface waters associated with undisturbed massive sulfide deposits; constraints on origin of waters and water-rock reactions. *Chemical Geology*, 231: 300-325.
- Mazor, E., 1991, *Chemical and Isotopic groundwater hydrology*. Editorial Marcel Dekker, Segunda Edición.
- McNellis, J.M., Morgan, C.O., Lowell, B.H., 1968, Computer – produced tables, maps, and diagrams as tools in the interpretation of brine data from Southeastern Kansas (U.S.A.). *Chem. Geol.*, 4: 303-324.
- Melloul, A., Collin, M., 1992, The “principal components “statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the Coastal Plain aquifer of Israel. *Journal of Hydrology*, 140: 49-73.
- Méndez-Ortiz, B.A., 2007, *Geoquímica e Isotopía de Aguas de Formación (Salmueras Petroleras) de Campos Mesozoicos de las Cuencas del Sureste de México: Implicación en su Origen, Evolución e Interacción Agua-Roca en Yacimientos Petroleros*. Tesis Doctoral, Centro de Geociencias de la UNAM. Juriquilla, Querétaro.
- NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
- Paces, J.B., Ludwig, K.R., Peterman, Z.E., Neymark, L.A., 2002, 234U/238U evidence for local recharge and patterns of groundwater flow in the vicinity of Yucca Mountain, Nevada, USA. *Applied Geochemistry* v.17: 751-779.
- Pacheco-Avila, J., Cabrera-Sansores, A., Pérez-Ceballos, R., 2004, Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán. *México: Ingeniería* v. 8, n. 2: 165-179.
- Palmer, C.M., 2007, *Principles of contaminant Hydrogeology*. Editorial Lewis, Segunda Edición, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida.
- Petelet-Giraud, E., Négrel, Gourcy, L., Schmidt, C., Schirmer, M., 2007, Geochemical and isotopic constraints on groundwater-surface water

- interactions in a highly anthropized site. The Wolfen/Bitterfeld megasite (Mulde subcatchment, Germany). *Environmental Pollution*, 148: 707-717.
- Reimann, C., Caritat, P., 1998, Chemical elements in the environment. Editorial Springer.
- Sanin, L.H., González, C.T., Romieu, J., Hernández, A.M., 1998, Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la salud. *Salud pública de México*, v. 40, n. 4: 359-368.
- Santoyo, E., Santoyo-Gutiérrez, S., Verma, S.P., 2000, Trace analysis of heavy metals in groundwater samples by ion chromatography with post-column reaction and ultraviolet-visible detection. *Journal of Chromatography A*, 884: 229-241.
- Schlehuber, M.J., Tien-Chang, L., Hall, B.S., 1989, Groundwater level and hydrochemistry in the San Jacinto Basin, Riverside Country, California. *Journal of Hydrology*, 106: 79-98.
- Schiavo, M.A., Hauser, S., Cusimano, G., Gatto, L., 2006, Geochemical characterization of groundwater and submarine discharge in the south-eastern Sicily. *Continental Shelf Research*, 26: 826-834.
- Silliman, S.E., Boukari, M., Crane, P., Azonsi, F., Neal, C.R., 2007, Observations on elemental concentrations of groundwater in central Benin. *Journal of Hydrology*, 335: 374-388.
- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., 1999, *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Editores Académicos Kluwer, 3300 Dordrecht, Holanda.
- Skoog, D.A., Leary, J.J., 1990, *Análisis instrumental*. Editorial Mc Graw Hill, Cuarta edición.
- Tien-Chang, L., 1998, LEEGRAM: A program for normalized Stiff diagrams and quantification of grouping hydrochemical data. *Computer and Geoscience*, v. 24, n. 6: 523-529.
- Vega, M.J., Contreras, R.A., Ríos, L.E., Marchetti P.N., Agurto, V.M., 1990, Exposición al plomo y sus efectos en la salud infantil. *Revista Chilena de Pediatría*, v. 61, n. 3: 154-160.
- Walpole, R.E., Myers, R.H., 1985, *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. Editorial Interamericana, Segunda Edición, México, D.F.

VII. APÉNDICES

7.1 Cuadros completos

Cuadro 8. Coordenadas UTM (zona 14) de los pozos muestreados durante el periodo Junio 2007-Febrero 2008.

Número de identificación	Coordenadas		Altura (m)	Tipo de pozo
	UTM	14Q		
1	2284852	349811	1822	Testigo
2	2288069	345400	1895	Piloto
3	2273905	350555	1804	Piloto
4	2273789	348271	1811	Piloto
5	2274407	349915	1814	Piloto
6	2270729	351727	1838	Testigo
7	2277376	352451	1815	Testigo
8	2279094	352352	1817	Piloto
9	2273156	359388	2022	Testigo
10	2272294	353837	1910	Testigo
11	2275939	356678	1855	Piloto
12	2279828	362093	1863	Piloto
13	2278608	358076	1860	Piloto
14	2276712	353514	1826	Piloto
15	2278494	355611	1833	Piloto
16	2276180	350872	1822	Piloto
17	2280995	347465	1850	Testigo
18	2275359	346472	1809	Piloto
19	2276315	348892	1810	Piloto
20	2277130	346975	1808	Piloto
21	2278375	344779	1805	Piloto
22	2280852	345283	1816	Piloto
23	2271742	343484	1832	Piloto
24	2273648	345620	1829	Piloto
25	2291957	346980	1942	Piloto
26	2279588	344472	1810	Piloto
27	2281088	351489	1813	Piloto
28	2278855	352654	1827	Piloto
29	2279873	351254	1820	Piloto
30	2289043	345575	1949	Testigo
31	2289432	345774	65	Piloto
32	2280580	351772	1816	Testigo
33	2279044	346911	-	Testigo
34	2285232	355207	1941	Testigo
35	2283040	349148	1846	Testigo
36	2278358	352023	1814	Testigo
37	2274313	349427	1815	Piloto
38	2282995	351397	-	Piloto

Cuadro 9. Iones mayores de pozos testigos muestreados en Junio 2007 (A), Septiembre 2007 (B) y Diciembre 2007-Febrero 2008 (C).

	K	Mg	Ca	Na	Cl	Alcalinidad	SO ₄
Pozo	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
30-A	14,00	11,00	26,00	47,50	0,60	213,50	1,00
30-A	14,00	11,00	27,00	48,50	1,70	305,00	0,90
1-A	17,00	19,50	36,00	97,40	13,40	366,00	63,00
1-A	17,00	19,50	36,00	95,40	14,10	390,40	66,00
6-A	2,90	1,20	1,80	87,00	2,20	207,40	28,00
6-A	2,30	0,80	1,10	121,00	2,10	176,90	27,00
7-A	5,60	2,30	2,80	194,70	54,30	298,90	45,00
7-A	3,80	1,80	2,40	232,70	72,50	396,50	50,00
10-A	14,00	13,50	22,00	84,00	28,00	109,80	144,00
10-A	14,00	12,50	23,00	108,00	26,80	97,60	147,00
17-A	8,00	6,00	10,00	84,00	10,70	262,30	42,00
9-A	7,00	5,50	7,00	43,50	5,90	176,90	22,00
9-A	8,00	5,50	8,00	41,50	5,10	183,00	20,00
32-A	8,00	2,00	3,00	164,00	26,20	256,20	107,00
32-A	8,00	2,00	3,00	164,00	24,70	280,60	98,00
34-A	6,00	35,00	70,00	115,00	54,20	481,90	157,00
34-A	6,00	36,00	53,00	122,00	59,20	414,80	164,00
35-A	17,00	32,20	38,00	148,00	52,50	488,00	139,00
30-B	16,91	13,37	48,79	55,82	1,19	337,50	11,75
1-B	24,17	23,16	51,58	137,42	0,00	353,80	64,14
6-B	2,53	0,89	8,81	136,71	5,60	195,20	26,88
7-B	6,49	1,98	15,02	307,32	1,68	396,50	50,15
10-B	19,77	17,43	58,12	120,00	45,67	96,00	168,56
17-B	13,05	8,56	39,07	97,89	8,15	213,50	44,79
9-B	9,24	7,48	26,40	58,88	3,14	170,80	19,55
32-B	9,89	2,01	9,48	217,28	0,72	286,70	100,50
36-B	16,03	22,70	82,09	114,77	0,00	427,00	23,48
30-C	4,60	3,80	39,30	13,00	0,90	323,30	4,10
1-C	19,35	21,46	53,96	96,80	13,13	323,30	54,76
6-C	3,27	0,86	4,77	90,41	5,22	225,70	28,53
7-C	5,09	1,84	6,60	210,72	53,18	427,00	46,12
10-C	15,95	16,09	33,84	82,25	34,32	122,00	163,53
17-C	9,64	7,46	28,42	65,76	8,23	219,60	42,51
9-C	9,06	6,12	17,71	48,35	7,57	195,20	21,50
32-C	6,00	1,60	5,70	107,00	28,10	262,30	100,30
33-C	7,90	4,00	22,20	59,00	4,80	329,40	26,40
L. Permisibles	-	-	-	200,00	250,00	500,00	400,00

*Los pozos testigo están desequipados y se encuentran fuera de operación, por lo que ya no son usados para extraer agua, sirven para monitorear el acuífero.

*Valores en cero indican que el valor del parámetro esta por abajo del límite de cuantificación K= 0.5 ppm, Mg= 0.5 ppm, Ca= 0.5 ppm, Na= 5 ppm, Cl= 0.5 ppm SO₄= 0.5 ppm y Alcalinidad= 6.1 ppm.

Cuadro 10. Iones menores y propiedades físico-químicas de pozos testigos muestreados en Junio 2007 (A), Septiembre 2007 (B) y Diciembre 2007-Febrero 2008 (C).

Pozo	PO ₄ ppm	F ppm	Br ppm	NO ₃ ppm	O ₂ Dis. mg/l	Redox mV	pH	Cond. μS/cm	Temp. °C	Balance iónico	S. Dis. ppm
30-A	0,00	0,40	0,00	16,00	5,69	104,30	7,11	474,00	25,00	9,55	330,00
30-A	0,00	0,40	0,00	5,20	-	205,20	7,23	475,00		-4,59	413,70
1-A	0,00	2,20	0,00	37,50	3,16	217,60	7,15	900,00	23,00	-3,58	652,00
1-A	0,00	2,30	0,00	30,50	-	248,10	7,07	846,00		-6,29	671,20
6-A	0,00	0,90	0,00	7,60	-	108,00	8,69	466,00	38,50	-3,38	339,00
6-A	0,00	1,00	0,00	18,00	4,75	218,10	8,47	395,00		15,57	350,20
7-A	0,00	6,20	0,00	8,30	2,92	191,30	8,84	1069,00	24,70	5,46	618,10
7-A	0,00	9,30	0,00	0,40	3,86	-5,20	8,77	1217,00		0,79	769,40
10-A	0,00	0,40	0,00	34,20	5,02	204,90	7,81	750,00	34,50	-4,15	449,90
10-A	0,00	0,30	0,00	35,20	3,77	205,00	8,03	771,00		4,48	464,40
17-A	0,00	4,50	0,00	14,80	2,76	215,00	7,95	578,00	31,85	-11,61	442,30
9-A	0,00	0,50	0,00	0,90	5,02	204,90	7,81	750,00	23,00	-11,99	269,20
9-A	0,00	0,50	0,00	3,50	3,77	205,00	8,03	771,00		-13,12	275,10
32-A	0,00	3,30	0,00	11,00	-	245,50	8,75	888,00	33,00	-1,98	580,70
32-A	0,00	3,50	0,00	9,00	-	226,50	8,93	838,00		-2,67	592,80
34-A	0,00	2,20	0,00	15,00	-	215,50	7,72	635,00	-	-9,97	936,30
34-A	0,00	2,30	0,00	46,00	-	210,00	7,90	1234,00		-10,14	903,30
35-A	0,00	1,10	0,62	33,40	-	207,90	7,60	1438,00	27,80	-8,77	949,82
30-B	0,00	0,39	0,00	1,46	2,09	224,90	8,07	423,00	25,00	4,00	487,18
1-B	0,00	2,36	0,00	15,67	4,65	254,50	7,90	1757,00	23,00	17,07	672,30
6-B	0,00	0,82	0,00	10,17	5,06	202,60	9,39	500,00	38,50	15,57	387,61
7-B	0,00	7,92	0,00	0,00	2,09	224,90	9,55	1250,00	24,70	27,50	787,06
10-B	0,00	0,30	0,00	0,77	4,04	244,30	7,60	756,00	34,50	16,09	526,62
17-B	0,00	0,62	0,00	7,80	3,15	220,00	8,45	1275,00	31,85	21,70	433,43
9-B	0,00	0,57	0,00	35,00	2,28	203,60	8,50	458,00	23,00	15,58	331,06
32-B	0,00	3,10	0,00	53,67	3,09	205,60	8,72	1446,00	33,00	11,69	683,35
36-B	0,00	0,56	0,00	2,51	2,24	-71,10	7,31	1317,00	25,50	19,51	689,14
30-C	4,10	0,30	0,00	0,21	3,63	225,40	7,61	575,00	25,00	-31,66	393,61
1-C	0,00	2,23	0,14	43,79	3,83	24,10	6,98	828,00	23,00	-4,17	628,92
6-C	0,00	0,90	0,06	21,51	2,39	33,40	8,53	413,00	38,50	-6,78	381,21
7-C	0,00	7,82	0,18	10,86	2,50	29,70	8,27	968,00	24,70	-2,31	769,41
10-C	0,00	0,33	0,30	43,26	2,87	79,30	7,40	730,00	34,50	-5,24	511,86
17-C	0,00	0,68	0,00	26,15	2,65	155,40	7,81	580,00	31,85	-2,02	408,46
9-C	0,00	0,90	0,06	14,86	5,34	52,30	7,61	337,00	23,00	-6,48	321,33
32-C	0,00	3,80	0,00	0,25	3,43	226,30	8,11	855,00	34,00	-21,29	531,00
33-C	0,00	0,50	0,00	0,11	-	-	-	504,00	-	-20,18	454,31
L. Permisibles	-	1,50	0,00	10,00	-	-	7,5±1	-	-	-	1000,00

*Los pozos testigo están desequipados y se encuentran fuera de operación, por lo que ya no son usados para extraer agua, sirven para monitorear el acuífero.

*Valores en cero indican que el valor del parámetro esta por abajo del límite de cuantificación PO₄= 0.1 ppm, F= 0.1 ppm, Br= 0.1 ppm y NO₃= 0.5 ppm.

Cuadro 11. Elementos traza de pozos testigos muestreados en Junio 2007 (A), Septiembre 2007 (B) y Diciembre 2007-Febrero 2008 (C).

	Li	Mn	Fe	As	Pb
Pozo	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
30-A	22,37	362,51	114,94	3,73	0,33
30-A	22,84	369,11	115,54	4,03	0,87
1-A	233,16	15,95	157,18	15,34	2,43
1-A	240,96	2,53	154,68	17,26	0,06
6-A	18,11	10,78	15,15	9,44	0,17
6-A	16,59	10,77	48,15	9,43	0,25
7-A	237,87	7,31	92,15	28,39	15,17
7-A	319,97	13,79	58,35	33,38	0,80
10-A	31,01	1,36	128,09	2,12	0,97
10-A	28,76	2,02	131,89	1,67	1,22
17-A	91,27	0,89	88,73	3,23	1,18
9-A	34,32	25,57	453,14	3,48	3,34
9-A	27,58	27,50	483,74	3,24	0,35
32-A	431,44	0,63	25,71	19,78	2,56
32-A	435,94	0,85	25,49	19,58	0,40
34-A	53,21	412,52	336,38	1,08	0,14
34-A	54,15	250,22	327,58	6,01	0,20
35-A	306,11	46,90	276,65	2,82	0,19
30-B	16,13	321,44	124,33	3,68	17,01
1-B	225,16	3,85	114,37	17,34	2,40
6-B	21,01	4,96	23,38	9,72	0,16
7-B	278,73	4,95	63,67	29,63	2,69
10-B	28,32	0,52	110,25	1,79	0,51
17-B	90,48	3,80	84,29	4,10	4,59
9-B	22,98	25,07	658,21	3,03	0,54
32-B	400,93	0,27	20,64	21,39	0,61
36-B	32,38	704,82	178,84	1,02	0,79
30-C	12,37	175,83	254,30	2,26	0,27
1-C	250,30	51,61	1207,00	16,32	0,87
6-C	23,98	11,49	105,50	9,28	0,14
7-C	317,70	46,12	1298,00	26,36	0,77
10-C	31,55	78,43	786,40	1,75	2,06
17-C	109,70	82,80	778,20	4,01	0,39
9-C	38,45	37,64	1093,00	4,14	0,53
32-C	327,07	1,74	60,27	18,69	0,30
33-C	109,68	151,66	98,48	2,39	0,13
L. Permisibles	-	150,00	300,00	50,00	25,00

*Los pozos testigo están desequipados y se encuentran fuera de operación, por lo que ya no son usados para extraer agua, sirven para monitorear el acuífero.

*Valores en cero indican que el valor del parámetro esta por abajo del límite de cuantificación Li= 0.035 ppb, Mn= 0.025 ppb, Fe= 1.73 ppb, As= 0.28 ppb y Pb= 0.047 ppb.

Cuadro 12. Iones mayores de pozos piloto muestreados de Diciembre de 2007 - Febrero de 2008.

	K	Mg	Ca	Na	Cl	Alcalinidad	SO ₄
Pozo	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
2	10,68	8,66	31,66	56,50	2,24	311,10	10,05
3	14,72	18,47	49,59	65,61	23,56	298,90	28,07
4	13,58	14,54	38,87	55,48	9,27	256,20	21,97
5	13,17	14,65	43,50	60,94	17,91	268,40	25,10
8	7,66	4,85	13,36	187,00	53,97	317,20	99,58
11	16,98	20,31	57,60	64,59	24,92	250,10	139,23
12	11,73	6,82	23,06	48,94	7,42	195,20	27,14
13	10,80	7,45	24,49	54,44	10,07	219,60	25,14
14	15,59	28,89	67,33	77,51	30,03	353,80	69,00
15	12,17	34,94	79,35	90,63	43,79	353,80	72,16
16	13,65	17,34	40,51	62,42	21,07	280,60	28,65
18	15,94	19,60	76,72	50,96	20,06	366,00	29,45
19	15,72	16,72	69,26	93,01	28,25	353,80	40,90
20	11,46	18,46	56,30	101,34	26,05	305,00	50,45
21	11,37	11,25	24,94	61,55	6,93	262,30	30,46
22	12,82	12,99	27,24	52,31	4,33	244,00	24,33
23	16,53	20,72	39,70	81,39	27,03	244,00	59,72
24	12,92	13,56	33,98	52,57	12,16	219,60	29,97
25	10,49	11,53	22,88	42,77	2,58	225,70	10,87
26	11,80	10,89	25,09	49,94	4,82	231,80	25,14
27	17,24	9,07	38,53	129,00	25,51	329,40	98,04
28	23,48	27,91	84,66	116,78	84,60	378,20	80,12
29	13,94	9,49	28,54	119,65	24,68	262,30	103,99
31	0,50	0,00	1,40	43,00	8,40	176,90	32,20
L. Permisibles	-	-	-	200,00	250,00	500,00	400,00

* Valores en cero indican que el valor del parámetro esta por abajo del límite de cuantificación K= 0.5 ppm, Mg= 0.5 ppm, Ca= 0.5 ppm, Na= 5 ppm, Cl= 0.5 ppm SO₄= 0.5 ppm y Alcalinidad= 6.1 ppm.

Cuadro 13. Iones menores y propiedades físico-químicas de pozos piloto muestreados de Diciembre de 2007-Febrero de 2008.

	PO ₄	F	Br	NO ₃	O ₂ Dis.	Redox	pH	Conduc.	Temp.	Balance	S. Dis.
Pozo	ppm	ppm	ppm	ppm	mg/l	mV		μS/cm	°C	iónico	ppm
2	0,00	0,35	0,00	17,09	3,78	16,40	7,09	471,00	30,00	-6,38	448,34
3	0,00	0,58	0,12	39,71	4,02	18,90	7,20	687,00	29,50	2,03	539,32
4	0,00	0,58	0,08	29,33	3,79	62,40	7,22	541,00	30,00	3,36	439,90
5	0,00	0,60	0,11	40,76	3,40	58,20	7,13	600,00	30,00	1,13	485,14
8	0,00	2,40	0,21	31,16	2,90	79,60	7,69	940,00	16,00	-2,31	717,38
11	0,00	0,48	0,14	33,22	2,65	105,70	7,16	760,00	33,00	-6,34	607,56
12	0,00	0,85	0,00	14,11	2,80	92,30	7,62	403,00	30,00	-2,57	335,26
13	0,00	0,94	0,00	27,91	2,59	108,00	7,43	434,00	32,00	-5,60	380,84
14	0,00	1,24	0,09	90,72	2,84	122,00	7,43	542,00	-	-2,02	734,19
15	0,00	1,35	0,00	148,73	2,99	122,00	7,26	1063,00	-	-0,97	836,93
16	0,00	0,72	0,11	28,76	2,82	124,50	7,46	599,00	30,00	0,77	493,82
18	0,00	0,31	0,00	20,77	2,00	22,20	6,99	733,00	26,00	2,64	599,80
19	0,00	0,59	0,15	52,82	4,14	140,00	7,49	844,00	26,00	4,38	671,21
20	0,00	0,75	0,27	25,61	1,53	158,60	7,32	855,00	27,50	9,58	595,69
21	0,00	0,74	0,00	17,76	4,88	149,50	7,52	512,00	34,00	-4,13	427,29
22	0,00	0,50	0,00	24,09	3,20	155,00	7,61	462,00	32,00	-1,10	402,61
23	0,00	0,82	0,14	26,07	3,53	140,00	7,61	717,00	30,00	6,47	516,13
24	0,00	0,59	0,00	26,36	3,84	98,70	7,63	500,00	30,00	2,66	401,70
25	0,00	0,38	0,00	15,44	3,08	157,50	7,47	400,00	33,00	-1,09	342,64
26	0,00	0,49	0,00	28,46	4,73	136,60	7,81	452,00	32,00	-4,41	388,42
27	0,00	2,34	0,20	29,74	7,49	118,10	7,49	844,00	31,00	-2,52	679,07
28	0,00	0,54	0,22	43,27	3,80	122,70	7,36	1147,00	24,00	3,76	839,80
29	0,00	2,03	0,20	27,64	2,69	129,60	7,49	797,00	30,00	-2,40	592,45
31	0,00	2,80	0,00	0,01	1,55	-25,90	9,15	480,00	65,00	-33,11	257,61
36	-	-	-	-	3,27	32,90	7,36	509,00	30,50	-	-
37	-	-	-	-	4,89	106,10	9,80	690,00	48,00	-	-
L. Permisibles	-	1,50	0,00	10,00	-	-	7,5±1	-	-	-	1000,00

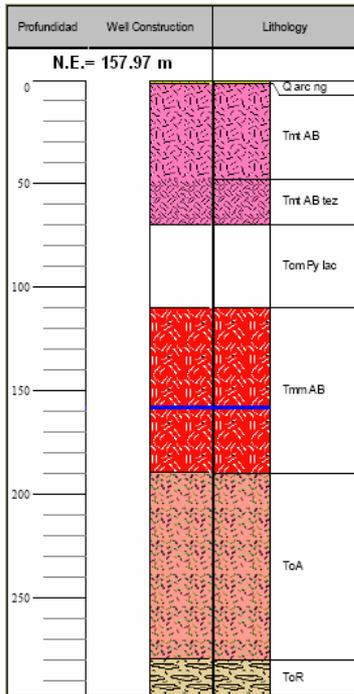
*Valores en cero indican que el valor del parámetro esta por abajo del límite de cuantificación PO₄= 0.1 ppm, F= 0.1 ppm, Br= 0.1 ppm y NO₃= 0.5 ppm.

Cuadro 14. Elementos traza de pozos piloto muestreados de Diciembre de 2007 - Febrero de 2008.

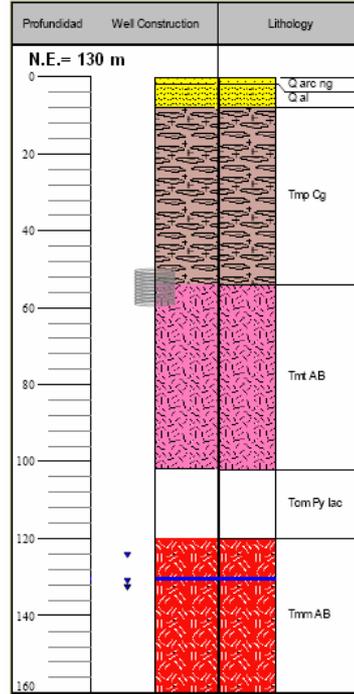
	Li	Mn	Fe	As	Pb
Pozo	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
2	38,91	0,29	98,35	6,18	0,23
3	59,64	0,12	144,10	3,26	0,08
4	54,52	0,71	118,80	3,30	0,09
5	54,95	0,13	127,60	3,35	0,09
8	416,50	30,29	76,57	18,93	2,89
11	63,41	0,33	167,30	2,86	0,22
12	47,63	0,15	66,64	6,97	0,20
13	60,05	0,14	72,69	7,63	0,30
14	146,20	0,11	193,00	4,27	0,09
15	156,10	0,59	242,50	4,45	0,49
16	80,85	0,19	116,00	3,21	0,13
18	26,65	74,23	1080,00	3,43	2,72
19	51,25	0,42	199,40	5,41	0,23
20	112,70	0,46	157,50	4,96	0,18
21	87,04	0,14	75,18	4,13	0,17
22	43,96	0,14	76,86	4,02	0,12
23	70,81	0,77	116,50	3,79	0,16
24	50,80	0,09	93,97	3,20	0,26
25	21,62	4,98	100,90	2,75	0,31
26	40,93	0,32	72,71	4,02	0,30
27	262,00	1,78	117,40	15,70	0,69
28	33,06	1,96	258,40	6,35	0,94
29	226,00	22,50	379,30	9,76	2,14
31	39,97	2,86	69,28	17,30	10,25
L. Permisibles	-	150,00	300,00	50,00	25,00

*Valores en cero indican que el valor del parámetro esta por abajo del límite de cuantificación Li= 0.035 ppb, Mn= 0.025 ppb, Fe= 1.73 ppb, As= 0.28 ppb y Pb= 0.047 ppb.

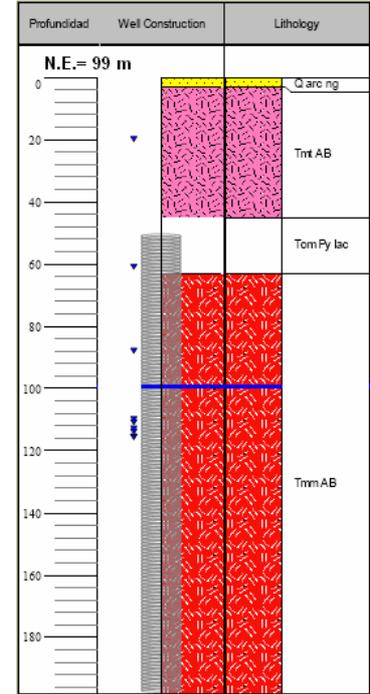
7.2 Litologías de pozos muestreados en el Valle de Querétaro



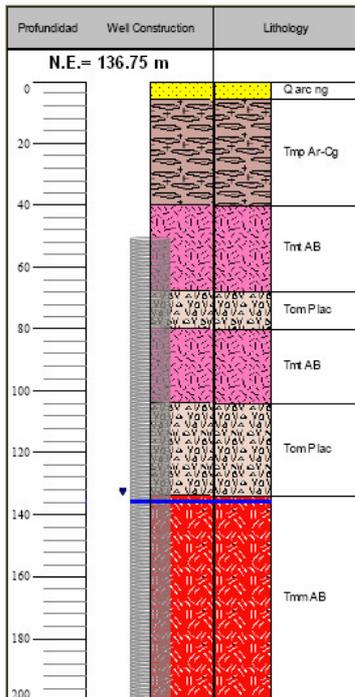
Pozo 11 (Grupo A)



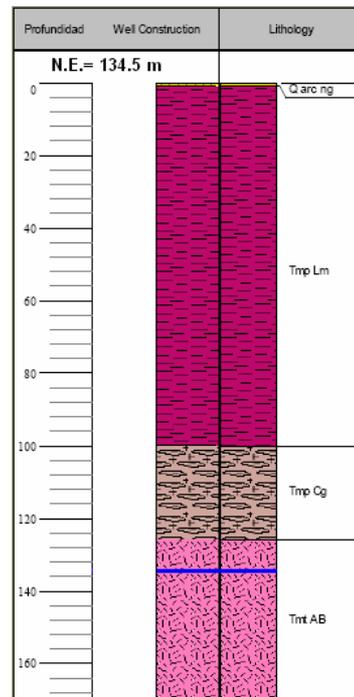
Pozo 22 (Grupo A)



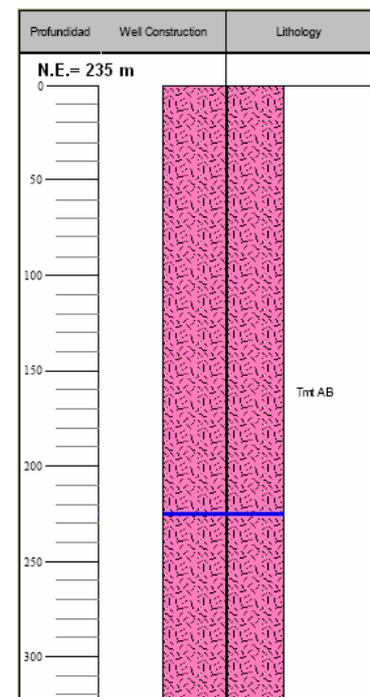
Pozo 21 (Grupo A)



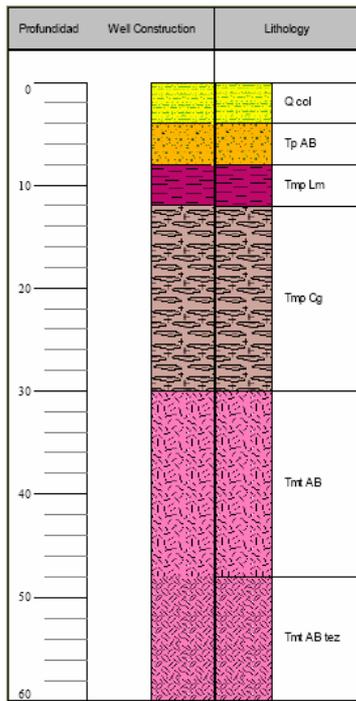
Pozo 36 (Grupo A)



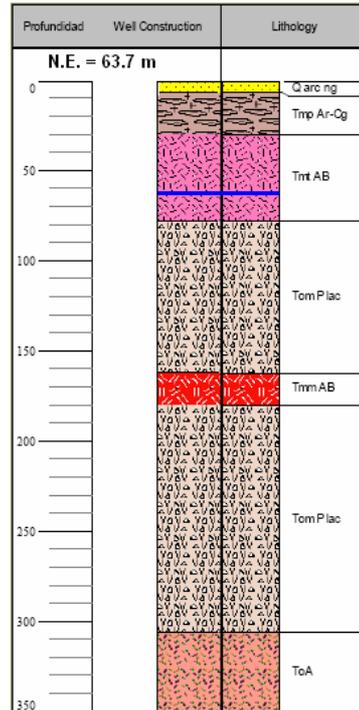
Pozo 3 (Grupo A)



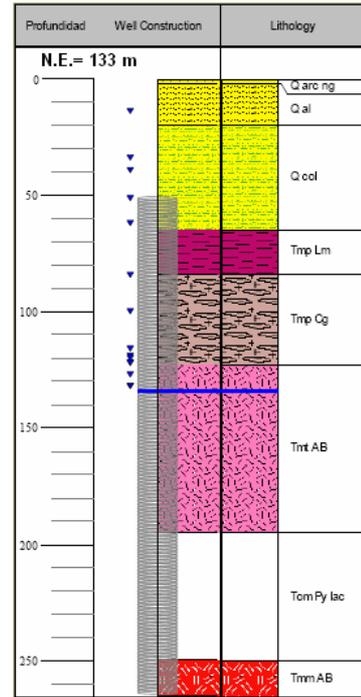
Pozo 9 (Grupo A)



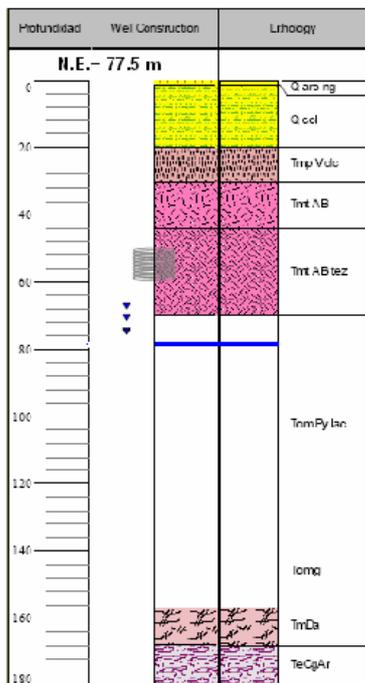
Pozo 12 (Grupo A)



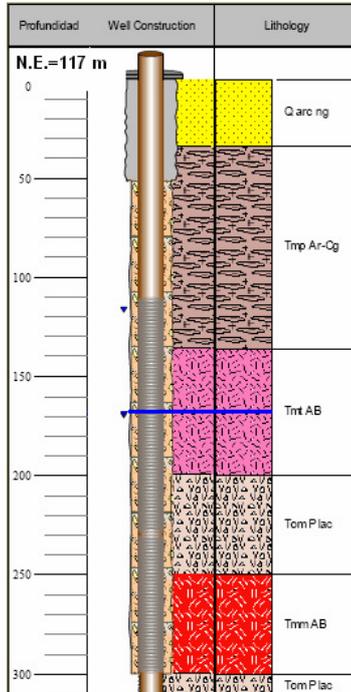
Pozo 1 (Grupo B)



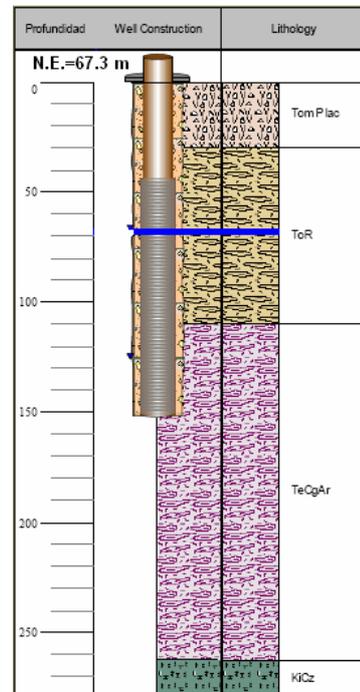
Pozo 26 (Grupo B)



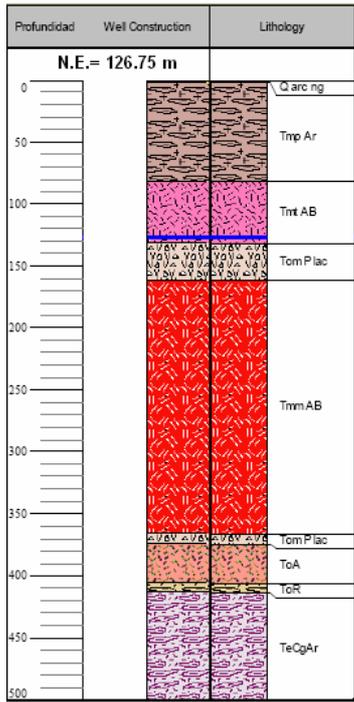
Pozo 25 (Grupo B)



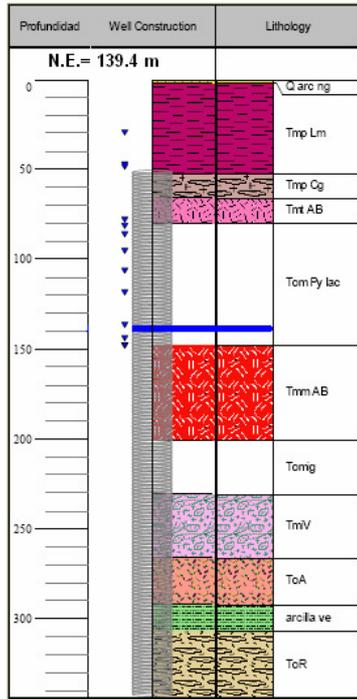
Pozo 32 (Grupo C)



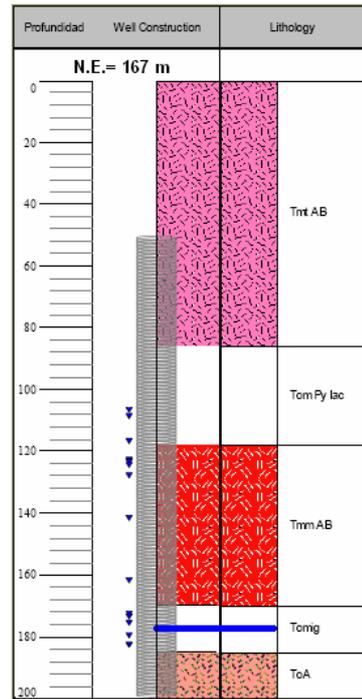
Pozo 30 (Grupo C)



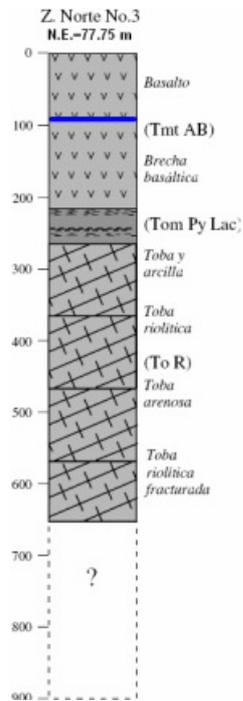
Pozo 33 (Grupo C)



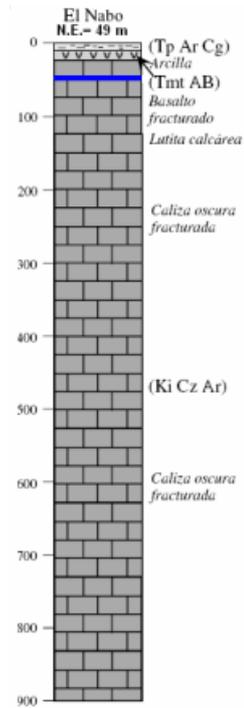
Pozo 35 (Grupo C)



Pozo 17 (Grupo C)

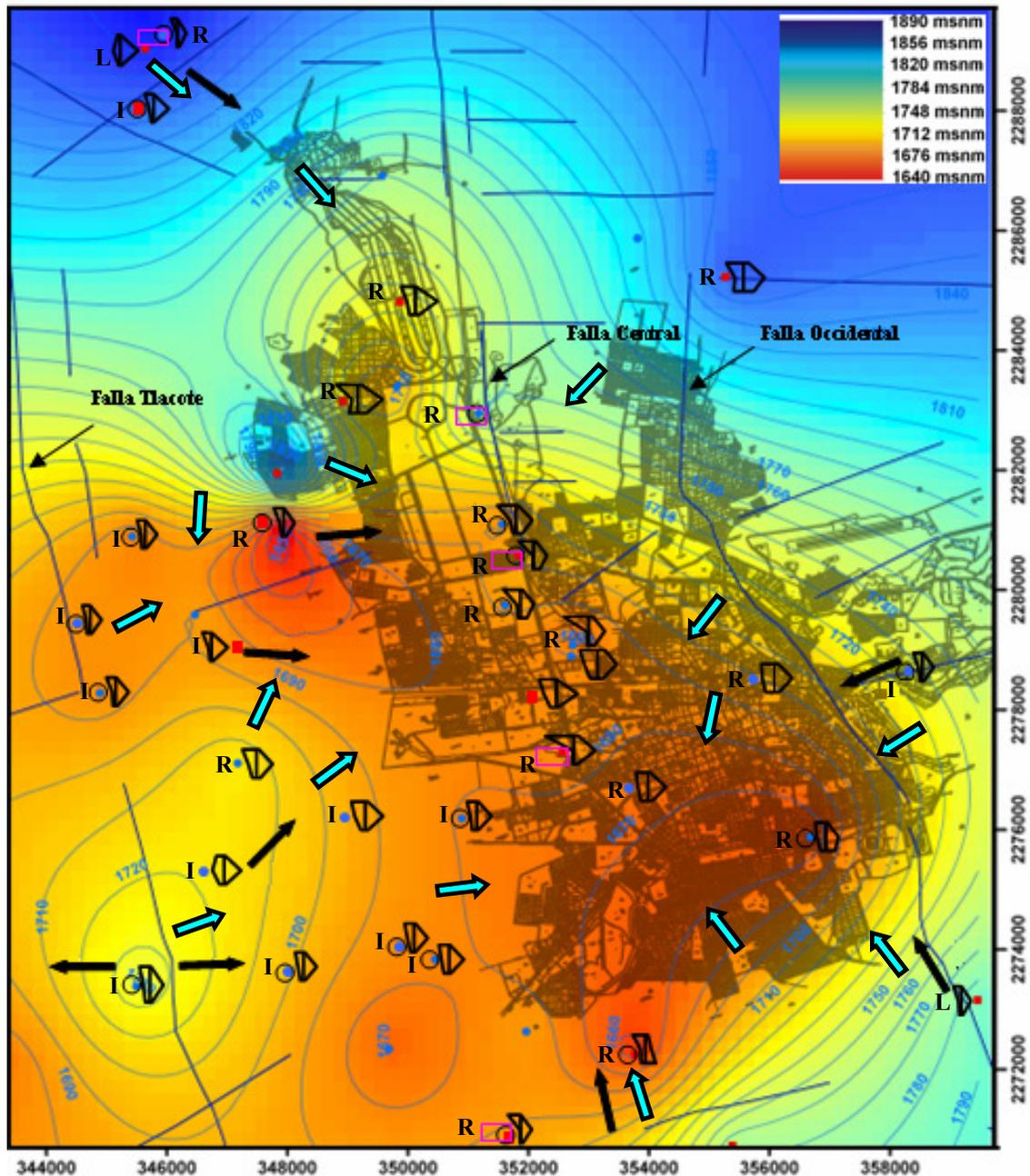


Pozo 34 (Grupo C)



Pozo 31 (Grupo D)

7.3 Niveles piezométricos del Valle de Querétaro del año 2007



- Pozo piloto
 - Pozo testigo
 - Fallas o fracturas
 - pH Mayor a 8.5
 - Temperaturas mayores a 30°C
 - ➔ Tendencia de aumento de conductividad eléctrica y (o) sólidos disueltos
 - ➡ Dirección de los flujos de agua subterránea en base a la piezometría.
- Flujo propuesto en base al Cuadro 7: L (Local), I (Intermedio), R (Regional).

Figura 22. Distribución de la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, pH, diagramas de Stiff y perfil piezométrico en el Valle de Querétaro (2007). Se muestran los diagramas de Stiff (en color negro). Los colores que adopta el mapa señalan la profundidad del nivel estático (msnm) en el acuífero acorde a la piezometría levantada en el año 2007 por CONAGUA.