

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



**DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA
CONTAMINACIÓN NATURAL EN EL ACUÍFERO DEL
VALLE DE PUEBLA MEDIANTE ANÁLISIS
GEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA**

**PRESENTA:
NORMA ARROYO DOMÍNGUEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. JAIME MAX GÁRFIAS SOLIZ**

AGRADECIMIENTOS

AL DR. JAIME MAX GARFIAS SOLIZ

Por todos los conocimientos aportados para la culminación de este trabajo, por su paciencia y preocupación infinita porque seamos cada día mejores. Gracias.

A las siguientes instituciones;

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Por la beca-crédito otorgada para la realización de mis estudios de maestría y la confianza depositada para la obtención del grado.

Centro Interamericano de Recursos del Agua. Por los apoyos otorgados durante la ejecución de las campañas de muestreo y la realización de análisis químicos.

Laboratorio de Isótopos Ambientales de la Universidad de Waterloo, Canadá. Por la realización de los análisis isotópicos requeridos en la presente investigación.

Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado de Puebla. Por todas las facilidades concedidas en la consecución de permisos y estudios realizados en el Valle de Puebla.

A todos los profesores y trabajadores del CIRA que estuvieron relacionados directa o indirectamente con la culminación de mis estudios, especialmente al M. C. José Luis Expósito Castillo por todos sus consejos y palabras de aliento.

DEDICATORIAS

A MI FAMILIA

MARI, MA; CONSTA, PA; YANET Y TOÑO, MIS HERMANITOS.

Con todo mi corazón, mi estómago y mis manos. Gracias por estar siempre conmigo, por su apoyo incondicional a todas mis decisiones, los amo infinitamente.

Y sobretodo, gracias al Ser Supremo, al Eterno, a Dios, por regalarme más días de vida y permitirme culminar esta meta para poder ofrecérsela a mi familia a quienes tanto les debo.

RESUMEN

En los últimos 20 años, el valle de Puebla ha experimentado un enorme crecimiento, particularmente la ciudad de Puebla, convirtiéndolo en un importante polo de desarrollo económico tanto para el estado de Puebla como para el país. Este crecimiento no sólo ha traído beneficios a la zona, sino también problemas, sobre todo de abastecimiento de agua potable, necesaria para realizar todas las actividades humanas, industriales y agrícolas; al satisfacer la demanda de agua se ha llevado al sistema acuífero en esta ciudad, a un estado de sobreexplotación, ya que el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento. El problema no radica únicamente en la sobreexplotación, sino en la calidad del agua extraída, que en varios sitios presenta altas concentraciones de sulfato y rebasa los límites establecidos por las normas ambientales y de salud. Esta situación se ha agudizado en los últimos años, siendo notable el aumento en la concentración de sulfatos y sulfuros en algunos pozos productores, llegando incluso a clausurarse. En este sentido, el objetivo principal del presente trabajo fue, identificar los mecanismos que rigen el origen de la contaminación natural en el sistema acuífero del valle de Puebla, la localización de la fuente, así como identificar su relación con la distribución del sistema de flujo subterráneo. El trabajo comprende la interpretación geológica de varios estudios realizados anteriormente para conocer la configuración espacial de los acuíferos y la distribución de sus propiedades hidráulicas. Se aplicaron análisis químicos e isotópicos que junto con la interpretación geológica permitieron identificar la posible fuente de contaminación y su localización, dentro del sistema acuífero. Se emplearon isótopos por la precisión que se logra al identificar el origen de fuentes de contaminación de las aguas subterráneas, así como en las áreas de identificación de zonas de recarga. El análisis de las evidencias y manifestaciones del flujo subterráneo en la parte Oeste de la ciudad indican que la fosa Atlxco es importante porque permite el movimiento del agua a través de los acuíferos del sistema. Los resultados muestran que las zonas de recarga para el valle son las partes altas de la cuenca, esto es obvio, lo relevante es que nada se sabía de la distribución de estas aguas en el subsuelo, fue la interpretación de los isótopos ^2H y ^{18}O lo que consintió la identificación del flujo regional y local. Estos resultados asociados a la interpretación de

los análisis químicos y análisis factorial, permitieron la separación de flujos en dos tipos, uno que caracteriza al flujo regional y el segundo, al flujo local, así como sitios que aportan aguas producto de la mezcla de ambos flujos. El uso del isótopo ^{34}S fue útil para identificar con certeza el origen del sulfato en el sistema acuífero, también condujo a un hallazgo importante, que fue la localización de la fuente del sulfato en el estrato de evaporitas a grandes profundidades dentro del sistema acuífero. La interpretación de todos los resultados confirma que la fosa Atlixco, localizada en la parte Oeste de la ciudad de Puebla, es el mecanismo preferencial de ascenso de agua del flujo regional a la superficie, efectuándose en el transcurso del ascenso la mezcla con las aguas del flujo local. Se concluye que la fuente de contaminación natural es el sulfato producto de la disolución de evaporitas que se encuentra a más de 400 m de profundidad, la reducción bacteriana llevada a cabo en capas inmediatas a la de evaporitas da origen a los sulfuros, la mayor concentración de sulfatos y sulfuros se presenta en la fosa Atlixco que es el mecanismo preferencial de ascenso del flujo regional.

ABSTRACT

In the last 20 years, the valley of Puebla has experienced an enormous growth, particularly the city of Puebla, becoming an important development area economic so much for the state of Puebla as for the country. This growth not alone there is trade benefits to the zone, but too problems, above all of provision of drinking water, necessary to carry out all the industrial, human activities and agrcolas; al to satisfy the demand of water has been carried al system aquifer in this city, to a state of sobreexplotatio, since the groundwater is the main source of provision. The problem does not situate only in the sobreexplotation, but in the quality of the water extradite, that in various places presents high concentrations of sulphate and surpasses the limites established by the environmental norms and of health. This situation has been intensified in the last years, being notable the increase in the concentration of sulphates and sulfurs in some producing wells, arriving even to be closed. In this sense, the main objective of the present work was, to identify the mechanisms that govern the origin of the contamination natural in the system aquifer of the valley of Puebla, the localization of the source, as to identify its relation with the distribution of the system of groundwater flow. The work understands the interpretation geolgy of various studies carried out previously to know the configuration spatial of the aquifer and the distribution of its properties hidraulycs. They applied chemistry anlisy and isotopyic that along with the interpretation geolgy permitted to identify the possible source of contamination and its localization, inside the system aquifer. They were employed isotopess by the precition that is achieved to identify the origin of sources of contamination of the groundwater, ace as in the defendants of identification of zones of refill. The anlysis of the evidences and demonstrations of the groundwater flow in the Western part of the city indicate that the grave Atlixco is important because permits the movement of the water to travs of the aquifers of the system. The results show that the zones of refill for the valley are the high parts of the basin, this is obvious, the prominent thing is that nothing be known about the distribution of these water in the subsoil, was the interpretacin of the isotopes ^2H and ^{18}O what consinti the identification of the local and regional flow. These associated results to the interpretation of the results chemistry and factorial, they permitted the separation of flows in two types, one that characterizes at the regional flow and the second, at the local

flow, the places that contribute water product of the mixture of both flows. The use of the isotope ^{34}S was important to identify with certainty the origin of the sulphate in the system aquifer, so conducted to an important find, that was the localizacin of the source of the sulphate in the stratum of evaporites to large depths inside the system aquifer. The interpretation of all the results confirms that the grave Atlixco, located in the Western part of the city of Puebla, is the preferential mechanism of ascent of water of the regional flow to the surface, being carrying out in the course of the ascent the mixture with the water of the local flow. It is concluded that the source of contamination natural is the sulphate product of the disolution of evaporites that is found to more of 400 m of depth, the reducton bacterial carried out in immediate layers to that of evaporites causes the sulfurs, the greater concentration of sulphates and sulfurs is presented in the grave Atlixco that is the preferential mechanism of ascent of the regional flow.

ÍNDICE

Capítulo I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Organización de la tesis	5
Capítulo II	
DESCRIPCIÓN DEL VALLE DE PUEBLA	6
2.1. Introducción	6
2.2. Ubicación, características geográficas y económicas del Estado de Puebla	7
2.3. Características hidrológicas del estado y valle de Puebla	9
2.4. Características geológicas del área de estudio	13
2.4.1. Formaciones geológicas en el valle de Puebla	15
2.4.2. Geohidrología de la zona mediante sondeos eléctricos	22
2.4.3. Consideraciones sobre el mecanismo de ascenso de las aguas subterráneas y términos empleados en investigación	32
2.5. Áreas de recarga y niveles estáticos	36
2.6. Otros estudios realizados en la zona del valle de Puebla	43
Capítulo III	
SISTEMA DE FLUJO EN ACUÍFEROS	49
3.1. Topografía y geología, factores que controlan el flujo subterráneo	49
3.2. Procesos químicos	53
3.3. Distribución del flujo del agua subterránea	54
3.4. Introducción a los isótopos ambientales	58
3.5. Isótopos del hidrógeno y oxígeno	58
3.5.1. Línea global de agua meteórica	59
3.5.2. Efectos locales sobre la temperatura y $\delta^{18}\text{O}$	61
3.5.3. Mezcla de aguas subterráneas	62
3.5.4. Sistemas de alta temperatura	62
3.6. Isótopos del azufre	65

Capítulo IV	
MÉTODOS Y MATERIALES	72
4.1. <i>Introducción</i>	72
4.2. <i>Método general</i>	73
4.3. <i>Área de estudio y sitios muestreados</i>	75
4.4. <i>Análisis fisicoquímicos e isotópicos</i>	79
4.4.1. <i>Parámetros medidos in situ</i>	81
4.4.2. <i>Análisis químicos</i>	82
4.4.3. <i>Análisis factorial</i>	83
4.4.4. <i>Análisis isotópicos</i>	84
4.5. <i>Equipo y material utilizado en campo y laboratorio</i>	85
Capítulo V	
RESULTADOS Y DISCUSION	86
5.1. <i>Análisis hidrogeológico</i>	86
5.2. <i>Análisis hidrogeoquímico</i>	94
5.2.1. <i>Análisis hidroquímico</i>	94
5.2.2. <i>Análisis factorial</i>	107
5.3. <i>Análisis isotópicos</i>	112
5.4. <i>Revisión general de los resultados obtenidos</i>	118
Capítulo VI	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
BIBLIOGRAFÍA	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Situación geográfica. Límites del estado de Puebla y ubicación de la subcuenca hidrológica del Alto Atoyac. Nótese que la ciudad de Puebla se encuentra situada en el exutorio de la cuenca, lo que significa que es un área de descarga _____	8
Figura 2.2. Regiones Hidrológicas que conforman el estado de Puebla de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua. El área sombreada muestra que el Valle de Puebla se ubica dentro de la RH18 (INEGI 2000a) _____	11
Figura 2.3. Los ríos principales de la subcuenca del Alto Atoyac son el río Frío y el río Zahuapan al unirse toman el nombre de Atoyac que, después de atravesar la ciudad de Puebla descarga en la presa Manuel Ávila Camacho (Modificado de INEGI 2000a) _____	12
Figura 2.4. Esquema que muestra los eventos representativos que dieron origen al valle de Puebla dentro del marco del tiempo geológico (Modificado de Geyh 2000) _____	14
Figura 2.5. Cortes geológicos dentro del área de estudio. La sección A-A', con dirección Sur-Norte, se extiende desde el río Atoyac hasta la ciudad de Temozontla en el estado de Puebla. Sección B-B', con dirección Oeste-Este se extiende desde la ciudad de Huejotzingo hasta las inmediaciones del volcán La Malinche. Sección C-C', con dirección Oeste-Sureste se encuentra entre las ciudades de Calpan y Puebla. Sección D-D', con dirección Oeste-Este abarca desde la ciudad de Nealtican hasta Puebla (Modificado de Jiménez 1999b) _____	17
Figura 2.6. Detalle de la Sección 1, corte geológico A-A'. Abarca parte de los estados de Puebla y Tlaxcala. En el estado de Puebla su composición es de depósitos aluviales recientes y antiguos. En el Estado de Tlaxcala se pueden observar depósitos aluviales y lacustres. (Modificado de Jiménez 1999b) _____	18
Figura 2.7. Detalle de la Sección 2, corte geológico B-B'. Ubicada entre el volcán Iztaccihuatl y el volcán La Malinche. Está formada a todo lo largo por un estrato de aluviones antiguos y algunos recientes, hacia el volcán La Malinche, están presentes vulcanitas y bajo el río Atoyac depósitos lacustres (Modificado de Jiménez 1999b) _____	19
Figura 2.8. Detalle de la Sección 3, corte geológico C-C'. Localizado entre las ciudades de Calpan y Puebla, con una dirección Oeste-Sureste. Está formado por aluviones, depósitos lacustres y tobas, esto en la región Calpan-cerro José Gpe. (Modificado de Jiménez 1999b) _____	20
Figura 2.9. Detalle de la Sección 4, corte geológico D-D'. Localizado entre las ciudades Nealtican y Puebla, con una dirección Oeste-Este. Está formado por aluviones y depósitos lacustres de origen volcánico (Modificado de Jiménez 1999b) _____	21
Figura 2.10. Mapa geológico. Se aprecia que los materiales en la superficie son mayoritariamente de tipo volcánico _____	23

- Figura 2.11.** Localización de los sondeos eléctricos en las áreas de Xoxtla-Barranca Honda y Amalucan. La primera abarca la porción Norte del estado de Puebla. La segunda cubre la porción Noreste de la ciudad de Puebla (Modificado de Jiménez 1999b) _____ 25
- Figura 2.12.** Sección A-A', área de Xoxtla – Barranca Honda. Se observa un acuífero superior cuyo espesor varía de 100 a 300 m aproximadamente, un estrato de arcillas lacustres que sirven de base al primer acuífero y de techo al segundo. Esta es la mayor sección del área y es interceptada por las otras secciones, los cruces muestran el lugar en el que se da la intersección (Modificado de Jiménez 1999b) _____ 26
- Figura 2.13.** Secciones B-B' y C-C' del área de Xoxtla – Barranca Honda. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres. La presencia de fallas supone cierto intercambio de flujos entre ambos acuíferos. Los cruces ilustran el lugar en el que se da la intersección con otras secciones (Modificado de Jiménez 1999b) _____ 27
- Figura 2.14.** Secciones D-D' y E-E' del área de Xoxtla – Barranca Honda. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres. La presencia de fallas supone cierto intercambio de flujos entre ambos acuíferos. Los cruces muestran el lugar en el que se da la intersección con otras secciones (Modificado de Jiménez 1999b) _____ 28
- Figura 2.15.** Secciones F-F' y G-G' del área de Xoxtla – Barranca Honda. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres. La presencia de fallas permite suponer cierto intercambio de flujos entre ambos acuíferos. Los cruces muestran el lugar en el que se da la intersección con otras secciones (Modificado de Jiménez 1999b) _____ 29
- Figura 2.16.** Secciones A-A' y C-C' del área Amalucan. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres, el espesor del primero en esta área es menor, va de los 50 hasta los 100 m; el estrato impermeable alcanza grandes espesores, hasta 200 m. La discontinuidad eléctrica hace suponer la existencia de fallas que permitiría el intercambio de flujos entre ambos acuíferos. Los cruces ilustran el lugar en el que se da la intersección con otras secciones (Modificado de Jiménez 1999b) _____ 30
- Figura 2.17.** Secciones B-B' del área Amalucan. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres, el espesor del primero en esta área es menor, en promedio es de 50 m; el estrato impermeable alcanza grandes espesores, hasta 200 m. El cruce ilustra el lugar en el que se da la intersección con la sección A-A' (Modificado de Jiménez 1999b) _____ 31
- Figura 2.18.** El ascenso del flujo puede ocurrir por medio de una fractura que atraviesa el acuitardo (a), esa misma fractura puede ser interceptada por otra que la cruce y que se encuentre abierta (b), permitiendo la mezcla entre ambos flujos (Modificado de Jiménez 1999b) _____ 33
- Figura 2.19.** Un pozo (a), que atraviesa el acuitardo, aporta agua del acuífero inferior. (b) durante la construcción del pozo se rompe la fractura obteniendo agua del segundo acuífero. En estos dos últimos casos se consideró al pozo como profundo _____ 34

Figura 2.20. <i>Un pozo somero es el que obtiene agua del acuífero libre o superior. Pueden estar en sitios en los que el espesor del estrato sea muy grande y también la perforación; mientras no atravesase el acuitardo y llegue al siguiente acuífero, se considerará como somero</i>	35
Figura 2.21. <i>Las principales áreas de recarga al acuífero son la Sierra Nevada, la Sierra de Tlaxco y el volcán La Malinche</i>	37
Figura 2.22. <i>Niveles estáticos del año 1973. Se puede observar que la dirección del flujo subterráneo es muy aproximada a la dirección del flujo superficial (Modificado de Jiménez 1999a)</i>	39
Figura 2.23. <i>Niveles estáticos para el año 1980. La dirección del flujo subterráneo, se mantiene y aún no se observan grandes abatimientos (Modificado de Jiménez 1999a)</i>	41
Figura 2.24. <i>Niveles estáticos para el año 1996. La dirección de flujo subterráneo es similar a la de los años 1973 y 1980; no así los niveles estáticos que presentan un notable abatimiento, sobre todo en la ciudad de Puebla (Modificado de Jiménez 1999a)</i>	42
Figura 2.25. <i>Curvas de isoconcentraciones de sulfuros para el año 1990. La máxima concentración se presentó en la parte norte de la ciudad, la tendencia del aumento de sulfuros es hacia la zona centro y el Este. (Modificado de CNA 1990-1993)</i>	47
Figura 2.26. <i>Curvas de isoconcentraciones de sulfuros para los años 1992-1993, la concentración ascendió hasta 11.0 mg/L, conservando la tendencia de crecimiento del Norte hacia el centro de la ciudad y cubriendo más territorio en la parte Este. (modificado de CNA 1990-1993)</i>	48
Figura 3.1. <i>Efecto de la topografía sobre los patrones de flujo regionales del agua subterránea (modificado de Freeze y Witherspoon, 1967)</i>	50
Figura 3.2. <i>Efecto de la geología sobre los patrones de flujo regional del agua subterránea para diferentes casos, (a) relieve suave con una capa 10 veces más permeable que la superior; (b) relieve suave con una capa dos órdenes de magnitud más permeable que la superior; (c) relieve sinuoso con una capa 100 veces más permeable que la superior; (d) relieve suave con una capa profunda más permeable que se distribuye solo en la primera mitad de la sección; (e) relieve suave con materiales permeables atravesados por un estrato inclinado de menor permeabilidad. K representa la permeabilidad de la capa (modificado de Freeze y Witherspoon, 1967)</i>	52
Figura 3.3. <i>Distribuciones de flujo controlado por gravedad en una cuenca regional no confinada (Tóth, 1999)</i>	57
Figura 3.4. <i>La Línea Meteorica Mundial Global es una línea de referencia útil para entender mejor el movimiento del agua en sus diferentes fases a través del Ciclo Hidrológico</i>	60
Figura 3.5. <i>Intervalos de valores para $\delta^{18}O$ en varios tipos de rocas y aguas. La condrita es un meteorito rocoso y las rocas ultramáficas son una subdivisión de las rocas ígneas, un ejemplo es la peridotita (Modificado de Fritz et al., 1997)</i>	63

Figura 3.6. Intervalos de valores para δ^2H en los principales reservorios de hidrógeno. El contenido de δ^2H en las rocas es muy pequeño, tanto que los feldespatos y basaltos tienen una cantidad insignificante de hidrógeno. (Modificado de Fritz et al., 1997)	64
Figura 3.7. Intervalos de contenido de $\delta^{34}S$ en azufre y compuestos de azufre en diferentes materiales y ambientes (Modificado de Fritz et al., 1997)	69
Figura 3.8. Variación de $\delta^{34}S$ del sulfato en las evaporitas marinas a través del tiempo geológico (Modificado de Geyh, 2000)	70
Figura 3.9. Ciclo del azufre(modificada de Schmitz, 1996)	71
Figura 4.1. Sitios muestreados en el área de estudio. Manantiales en la Sierra Nevada, considerados para análisis isotópicos de 2H y ^{18}O ; pozos y manantiales ubicados en la ciudad	77
Figura 4.2. Detalle de los manantiales y pozos muestreados en la ciudad de Puebla. Nótese que los manantiales ascendentes se localizan sobre la fosa Atlixco. La localización de la fosa se hizo en base a los cortes geológicos	78
Figura 4.3. Ciclo geoquímico del agua superficial y subterránea. El agua, durante cada etapa del ciclo hidrológico va adquiriendo iones y se realizan varios tipos de reacciones, dependiendo del ambiente en el que se encuentre (modificado de la USGS, 1964)	80
Figura 5.1. Un punto importante en las secciones geológicas y el sondeo geoelectrico del área de Xoxtla-Baranca Honda, es el Río Atoyac, ambos estudios coinciden, ya que el río descansa sobre un estrato superior que funciona como acuífero libre, un estrato intermedio de sedimentos lacustres, y un tercer estrato con material de alta permeabilidad. (Modificado de Jiménez 1999b)	88
Figura 5.2. Ocotlán es otro punto de intersección entre las secciones geológicas y el sondeo geoelectrico del área de Xoxtla-Barranca Honda; en ambos se aprecia la existencia de un estrato superior de aluviones (Qial), seguido por uno de arcillas lacustres que descansa sobre un segundo acuífero (Modificado de Jiménez 1999b)	89
Figura 5.3. En Amalucan, se observa el mismo comportamiento, dos acuíferos separados por un estrato de origen lacustre (Modificado de Jiménez 1999b)	90
Figura 5.4. Xoxtla es un punto común entre el corte geológico B-B' y el sondeo eléctrico vertical A-A' área de Xoxtla-Barranca Honda. En el sondeo geoelectrico se puede distinguir una falla que origina el desplazamiento y separación del estrato lacustre, permitiendo cierto contacto entre los estratos U3' Y U5, en los que se puede dar un intercambio de flujo (Modificado de Jiménez 1999b)	91
Figura 5.5. Esquema general del sistema acuífero, se observa la presencia de tres acuíferos separados por acuitardos e interconectados por la fosa Atlixco, además de existir fallas secundarias en las diferentes estructuras del sistema	93

- Figura 5.6.** Diagrama de Piper. Se observa un grupo compacto con características similares y otro disperso; en el primero se localizan los manantiales ascendentes, los pozos profundos y los pozos CNIC y Gabriel Pastor, su tipo de agua es $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$. En el segundo grupo el tipo de agua es $\text{HCO}_3^- - \text{Cl} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ en el se ubican pozos someros que en la gráfica aparecen dispersos. Las flechas indican la tendencia general de evolución en el acuífero _____ 99
- Figura 5.7.** Diagrama de Shoeller. Se observan dos grupos en el primero están los manantiales ascendentes, los pozos profundos y dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor); en el segundo, el resto de los pozos someros _____ 100
- Figura 5.8.** Relación $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Mg}^{2+}$ y $r\text{Ca}^{2+}/r\text{SO}_4^{2-}$. En ambas se agrupan varios registros, éstos son los manantiales ascendentes, los pozos profundos y dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor) que aparecen encerrados en un círculo, es la misma tendencia que se observó en el diagrama de Piper _____ 103
- Figura 5.9.** determinan la salinidad del agua, en todos los sitios el valor de $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl} > 0.105$, esto indicaría intrusión marina, sin embargo no hay, por lo que la salinidad del agua puede deberse a evaporitas marinas. Los sitios agrupados reciben agua del mismo flujo _____ 104
- Figura 5.10.** Relaciones $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Cl}$ y $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Cl}$, útiles para identificar el origen de cada uno de estos iones en el agua. El cloruro es resultado de la disolución de halita, el calcio de la calcita, anhidrita y dolomita; el magnesio de estratos de dolomita. Se observa en ambas gráficas un enriquecimiento de cloruros, a la vez que se enriquece en calcio y magnesio, sobre todo en los manantiales ascendentes, los pozos profundos y en dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor). Los sitios encerrados aportan agua del mismo flujo _____ 105
- Figura 5.11.** Debido a la fijación preferente de potasio en el terreno la relación $r\text{K}^+/r\text{Na}^+$ es menor en el agua que en la roca origen, y cuanto menor sea ésta más concentrada en sales está el agua. Los sitios encerrados en el círculo mantienen el mismo comportamiento que en las gráficas anteriores, se trata de aquellos que tienen mayores concentraciones de sólidos disueltos _____ 106
- Figura 5.12.** El flujo regional está influenciado por el factor 1 que incluye las variables Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , TDS y HCO_3^- , se reproduce el comportamiento observado en las relaciones químicas, corroborando la existencia de dos tipos diferentes de agua, uno asociado al flujo regional y otro al flujo local. Los sitios que no tienen influencia del factor 1 pero sí del 2 ó el 3, son producto de la mezcla de los dos flujos, tal es el caso de los pozos someros Gabriel Pastor, Castillotla y el Ángel _____ 111
- Figura 5.13.** Relación $^2\text{H}-^{18}\text{O}$, se tienen tres grupos: los más empobrecidos tienen una recarga a grandes altitudes; la recarga de los más enriquecidos es a menor altitud y en la parte central a una altitud intermedia entre los inferiores y superiores. La Línea Meteorica Mundial se utilizó como referencia para situar los lugares muestreados _____ 114

- Figura 5.14.** Relación entre los valores de $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del ión sulfato. Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ varían de +8.55 a +17.46, para $\delta^{18}\text{O}$ de +7.58 a +13.055. De acuerdo a los rangos de Balderer (1991), el origen del sulfato son las evaporitas marinas del Triásico. Los valores $\delta^{34}\text{S} < +20$ indican que no existe proceso reductor anaerobio en la capa donde se lleva a cabo la disolución de las evaporitas _____ 116
- Figura 5.15.** Relación entre los valores de SO_4 y $\delta^{34}\text{S}$. Se observan dos tipos de agua, el que formado por los sitios encerrados que tienen sulfato de origen evaporítico y el resto cuyo origen es la disolución de materiales del acuífero superior _____ 117
- Figura 5.16.** Se muestran los flujos subterráneos generados por la recarga en la Sierra Nevada y el volcán La Malinche, así como los sitios muestreados y la fosa Atlixco _____ 119
- Figura 5.17.** Esquema que muestra como sería el sistema de flujo en el valle de Puebla si no existiera la fosa Atlixco, no se considera la influencia de los acuitardos _____ 120
- Figura 5.18.** Esquema que muestra como se comporta en la actualidad el flujo subterráneo del sistema acuífero; la fosa Atlixco permite el ascenso y mezcla del agua del flujo regional, que es el que disuelve las evaporitas, con el flujo intermedio y el flujo local _____ 121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. <i>Concentración de Sulfatos para varios pozos y diferentes años</i>	45
Tabla 2.2. <i>Concentración de Sulfuros para varios pozos y diferentes años</i>	46
Tabla 4.1. <i>Clasificación de sitios muestreados, símbolos usados en las figuras así como sus nombres</i>	76
Tabla 5.1. <i>Parámetros medidos in situ. Nótese que la mayoría de las aguas muestreadas son ácidas y con bajos valores de oxígeno disuelto (O₂), además de tener alta conductividad eléctrica</i>	95
Tabla 5.2. <i>Iones y Sólidos Totales Disueltos (STD) de las muestras recolectadas. Llama la atención la cantidad de sólidos disueltos que en la mayoría de las muestras rebasa el límite de 1000 mg/L establecido en la NOM-127-SSA1-1994 de Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano</i>	96
Tabla 5.3. <i>Iones mayoritarios y balance iónico (BI). De acuerdo a los valores del balance iónico, los análisis químicos realizados son aceptables, ya que BI < 10</i>	97
Tabla 5.4. <i>Matriz de correlación con las variables para la aplicación del análisis factorial</i>	107
Tabla 5.5. <i>Eigenvalores, varianzas, factores extraídos y variables que afectan a cada factor</i>	108
Tabla 5.6. <i>Valor de los factores para cada sitio muestreado. Se observan 3 grupos, el primero en el factor 1 con valores positivos, el segundo con valores negativos en los tres factores y el tercero con un valor positivo en el factor 2 o 3</i>	110
Tabla 5.7. <i>Valores de $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del ión sulfato así como $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ (SMOW) para cada uno de los sitios muestreados</i>	113

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En los últimos años, el aumento desmedido de la población, ha originado un incremento en el uso y aprovechamiento de los recursos hidráulicos, así como también una gran actividad y profusión de los conocimientos científicos y tecnológicos acerca del agua.

Aunque en términos globales los recursos hídricos exceden ampliamente la demanda previsible, están distribuidos muy desigualmente. Algunas regiones ya experimentan una aguda escasez de agua con el peligro de que la situación se agrave en el futuro. Casos de insuficiente oferta de agua en relación con la demanda se complican periódicamente y en algunos casos en forma endémica por las grandes fluctuaciones en la disponibilidad.

Se puede afirmar que todo lo que vive sobre la faz de la tierra depende del agua. La explotación por el hombre de los recursos hídricos ha traído consigo grandes beneficios económicos, sociales y el mejoramiento de las condiciones de vida. El hombre la requiere para sus necesidades básicas, usos recreativos, la generación de energía eléctrica, los procesos de manufactura, la agricultura; sin embargo, cuando el plan de explotación del recurso hídrico no está cuidadosamente concebido, puede surtir también efectos nocivos.

Estos efectos ya son visibles, ya que con el incremento de la población mundial y del mejoramiento de sus condiciones de vida, aunado al crecimiento industrial y tecnológico, han originado un crecimiento extraordinario en la demanda de agua; trayendo consigo el aumento de aguas residuales y la sobreexplotación de acuíferos. Todas estas actividades han llevado sin remedio a la contaminación de las aguas subterráneas.

Las fuentes de contaminación de las aguas subterráneas pueden ser de dos tipos: naturales o antropogénicas, esto es, provocada por las actividades del hombre. La contaminación natural puede consistir en la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea, la intrusión marina, y en la lixiviación natural de rocas y minerales del subsuelo. Los minerales disueltos, de algunas fuentes naturales de contaminación, presentes en las aguas subterráneas, pueden alcanzar grandes concentraciones, convirtiéndola en agua de mala calidad e inadecuada para diversos usos, principalmente para el consumo humano.

Uno de los minerales que se ve sometido a la lixiviación natural es el azufre que se encuentra de manera natural en depósitos subterráneos. Las principales fuentes de azufre en las aguas subterráneas son el sulfato de evaporitas, el sulfato disuelto en las aguas oceánicas y los sulfuros sedimentarios (Fritz et al, 1997). El origen y comportamiento del sulfato disuelto en el agua subterránea ha sido objeto de interés desde hace más de treinta años debido, principalmente, a su capacidad para acidificar el agua (Kehew, 2001).

Desde el punto de vista de la Hidrogeología, el aspecto de mayor interés es diferenciar el sulfato de origen natural del de origen antrópico y cuantificar su aporte relativo a ríos y acuíferos, y especialmente a las fuentes de abastecimiento humano.

Uno de los métodos utilizados en la Hidrogeología, para resolver la problemática del párrafo anterior, es la geoquímica isotópica del azufre. La potencialidad del uso de la geoquímica isotópica del azufre en ecosistemas acuosos radica en dos hechos fundamentales: primero, que la composición isotópica del azufre de los compuestos más comunes de este elemento (SO_4^{-2} , H_2S , etc.) puede ser utilizada como trazador de la fuente generadora de éstos, lo que permite conocer el grado de impacto de la actividad humana sobre el ciclo geoquímico del azufre.

Segundo, al presentar el azufre distintos estados de oxidación en la naturaleza, los cambios en su estado de oxidación afectan su composición isotópica, permitiendo cuantificar los posibles procesos de oxidación-reducción acaecidos en el sistema (Fritz et al, 1997). La aplicación de la geoquímica isotópica del azufre, es de relevante interés en la vigilancia de aguas como una nueva herramienta de control del origen de los contaminantes.

Los isótopos del oxígeno y el azufre del sulfato disuelto, han sido usados de manera efectiva para examinar las fuentes del azufre y los procesos que afectan el contenido de sulfato en las aguas subterráneas (Krouse, 1980; Taylor y Wheeler, 1994; Van Stempvoort y Krouse, 1994). La concentración y composición isotópica del sulfato disuelto en las aguas subterráneas, varía en función de la fuente y el mecanismo que lo forman. Bajo ciertas condiciones la composición isotópica del sulfato es conservativa, de modo que puede ser usado como un trazador natural en la delimitación de mezcla de aguas subterráneas de diferente origen (Zsolt et al., 2002). Además, el fraccionamiento isotópico inducido por procesos microbiológicos y físico-químicos puede alterar la composición isotópica original del sulfato. Consecuentemente, en los estudios hidrogeoquímicos que involucran isótopos del sulfato, es primordial identificar la existencia de los procesos principales de fraccionamiento isotópico así como documentar las principales fuentes y depósitos de sulfato.

Para entender la problemática del lugar, es importante saber que durante los últimos años, la ciudad de Puebla ha presentado un gran desarrollo industrial, y por consecuencia, un crecimiento poblacional importante. Esto ha repercutido en la demanda y suministro de agua por un gran número de pozos en la zona, sin embargo; la extracción necesaria para satisfacer la demanda, ha rebasado la recarga al acuífero, situación que se refleja en el descenso de los niveles estáticos.

La sobreexplotación ha traído consigo no sólo la disminución de los niveles estáticos, sino la obtención de agua con elevadas concentraciones de sulfato en varios pozos que se ubican dentro de la ciudad. Los contenidos de sulfatos y sulfuros, en algunos pozos, sobrepasan los valores establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, lo que deja al agua fuera del uso para consumo humano.

1.2. Objetivos

Dados los antecedentes previos, y reconociendo el impacto potencial que tiene la contaminación natural sobre la calidad del agua en el acuífero de Puebla, la presente investigación tiene como finalidad principal analizar la naturaleza de los mecanismos que rigen el origen de la contaminación natural en el acuífero de Puebla, identificando, así mismo, el sistema de flujo regional para conocer la reacción del acuífero frente a determinadas leyes, tanto de recarga como de descarga.

Para lograr este objetivo, fue necesario conocer el funcionamiento hidráulico del sistema acuífero del valle de Puebla, esto se logró a partir de la recopilación de información bibliográfica, de datos hidrogeológicos y parámetros físico-químicos de la zona de estudio; esto permitió identificar las propiedades de interés del sistema acuífero, consecuentemente permitió el conocimiento de sus características hidrogeoquímicas. Esta etapa fue importante para seleccionar los probables sitios a muestrear; se escogieron los que aproximadamente coinciden con las líneas de flujo subterráneo, algunos sitios que produjeran agua con altas concentraciones de sulfato, pozos productores de agua con buena calidad así como varios manantiales ascendentes que han funcionado como áreas de descarga natural en el sistema.

El estudio geológico permitió conocer la existencia de al menos dos acuíferos separados por un acuitardo, ambos afectados por la falla Atlixco y que presumiblemente permite la interacción de fluido entre los dos acuíferos. La interpretación de los análisis físico-químicos a la par del conocimiento geológico, permitió hacer una primera aproximación acerca de la distribución de los flujos del agua subterránea así como del origen del azufre.

La relación isotópica entre ^{18}O y ^2H , definió la existencia de dos flujos subterráneos: regional y local; apoyándose en la caracterización química de cada lugar muestreado, se pudo inferir que algunos pozos son aportadores de agua producto de la mezcla del flujo regional y local.

La utilización de técnicas isotópicas del azufre y la aplicación de análisis fisicoquímicos vinculados a la geología de la zona, permitieron estimar el origen de la contaminación

natural en las aguas subterráneas, partiendo de la base que el flujo es el vehículo de transporte de las características físico-químicas e isotópicas ambientales.

1.3. Organización de la tesis

Esta tesis está integrada por 6 capítulos, el presente y 5 subsecuentes.

El Capítulo 2 está enfocado a las características geográficas, geológicas, hidrológicas y de flujo del Valle de Puebla. Presenta el esquema general del sistema acuífero así como la disminución de los niveles estáticos entre los años 1973 a 1996.

El Capítulo 3 presenta las bases teóricas para comprender el funcionamiento de los sistemas de flujo en acuíferos, qué factores lo controlan, los procesos físicos y químicos que ocurren durante el movimiento del flujo así como su distribución y manifestación tanto en el subsuelo como en la superficie. También hace referencia al uso de isótopos ambientales, como herramientas de estudio para determinar edades, orígenes, áreas de recarga, mezclas, entre otras, de las aguas subterráneas. Se hace énfasis en el uso de isótopos Deuterio (^2H) del Hidrógeno, ^{18}O del oxígeno; las relaciones entre ellos, cómo son afectados por la temperatura dependiendo de la altitud y los períodos estacionales, así como su interacción con los materiales por los que circula el agua subterránea. También se presenta el isótopo del Azufre ^{34}S , que permite identificar el origen del azufre en las aguas subterráneas. Estos tres isótopos se aplican en el desarrollo de la presente investigación.

El Capítulo 4 comprende la selección de los lugares muestreados, toma de muestras, realización de análisis fisicoquímicos e isotópicos así como las técnicas y materiales empleados.

En el capítulo 5 se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos e isotópicos y la discusión de cada uno de ellos.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas en la presente investigación, así como algunas recomendaciones.

Capítulo II

DESCRIPCIÓN DEL VALLE DE PUEBLA

2.1 Introducción

En las últimas dos décadas, la ciudad de Puebla, capital del estado del mismo nombre, se ha convertido en un importante centro de desarrollo económico tanto para dicho estado como para el país; sin embargo, este logro no ha sido satisfactorio en todos los sentidos, ya que la creación de nuevas industrias modifican el entorno y provocan la migración de personas hacia esta localidad. Tanto las nuevas industrias como la población tienen necesidades que satisfacer. Una de ellas, quizá la más importante, es el abastecimiento de agua potable; las industrias la necesitan para llevar a cabo sus operaciones de producción y las personas para uso doméstico y continuar su ciclo vital.

De manera que es el Estado quien debe proveerlos de agua, y así ha sido, aunque para ello ha tenido que aumentar los volúmenes de extracción de los pozos de agua subterránea que los abastece, lo que ha originado el abatimiento de niveles estáticos en el acuífero, teniendo como consecuencia la clausura de algunos pozos cuya profundidad ya no alcanza los niveles actuales del acuífero, o bien producen agua con altas concentraciones de sulfato.

2.2 Ubicación, características geográficas y económicas del estado de Puebla

El Estado de Puebla está ubicado en la parte Centro-Este del país, sus coordenadas geográficas externas son: al Norte 20°50', al Sur 17°52' de latitud Norte; al Este 96°43' y al Oeste 99°04' de longitud Oeste. Colinda al Norte con los estados de Hidalgo y Veracruz, al Este con Veracruz y Oaxaca, al Sur con Oaxaca y Guerrero y al Oeste con Guerrero, Morelos, México, Tlaxcala e Hidalgo, tal como se aprecia en la figura 2.1 (INEGI, 2000a).

Comprende una superficie de 33,995 km², que representa 1.7 % del espacio total del país, se sitúa en el vigésimo primer lugar en cuanto a extensión y está integrado por 217 municipios. Con base en los resultados preliminares del Censo General de Población y Vivienda del año 2000, tiene una población de 5,070,346 habitantes y el 26.54% de ellos se encuentra en el municipio de Puebla (INEGI, 2000b).

Actualmente, la ciudad de Puebla es un importante centro urbano, industrial y comercial que presenta un crecimiento acelerado; en el cual se concentran diversas industrias, principalmente en el área metropolitana y en la zona conurbada, entre las que destacan la textil, metalúrgica y automotriz.

El Valle de Puebla se localiza en los estados de Tlaxcala y Puebla, ocupa una superficie aproximada de 4,280 km², de los cuales el 53% corresponde al estado de Puebla y el restante al estado de Tlaxcala.

Se ubica dentro de la subcuenca hidrológica del Alto Atoyac, se extiende entre las elevaciones de los volcanes La Malinche, la Sierra Nevada que comprende los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl; hacia el Norte abarca hasta la ciudad de Apizaco en el estado de Tlaxcala, y al Sur, llega aproximadamente hasta la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo), tal como se puede apreciar en la figura 2.1. Cuenta con importantes vías de comunicación terrestre que le permiten a la ciudad de Puebla interactuar con la zona del Golfo de México y la ciudad de México.

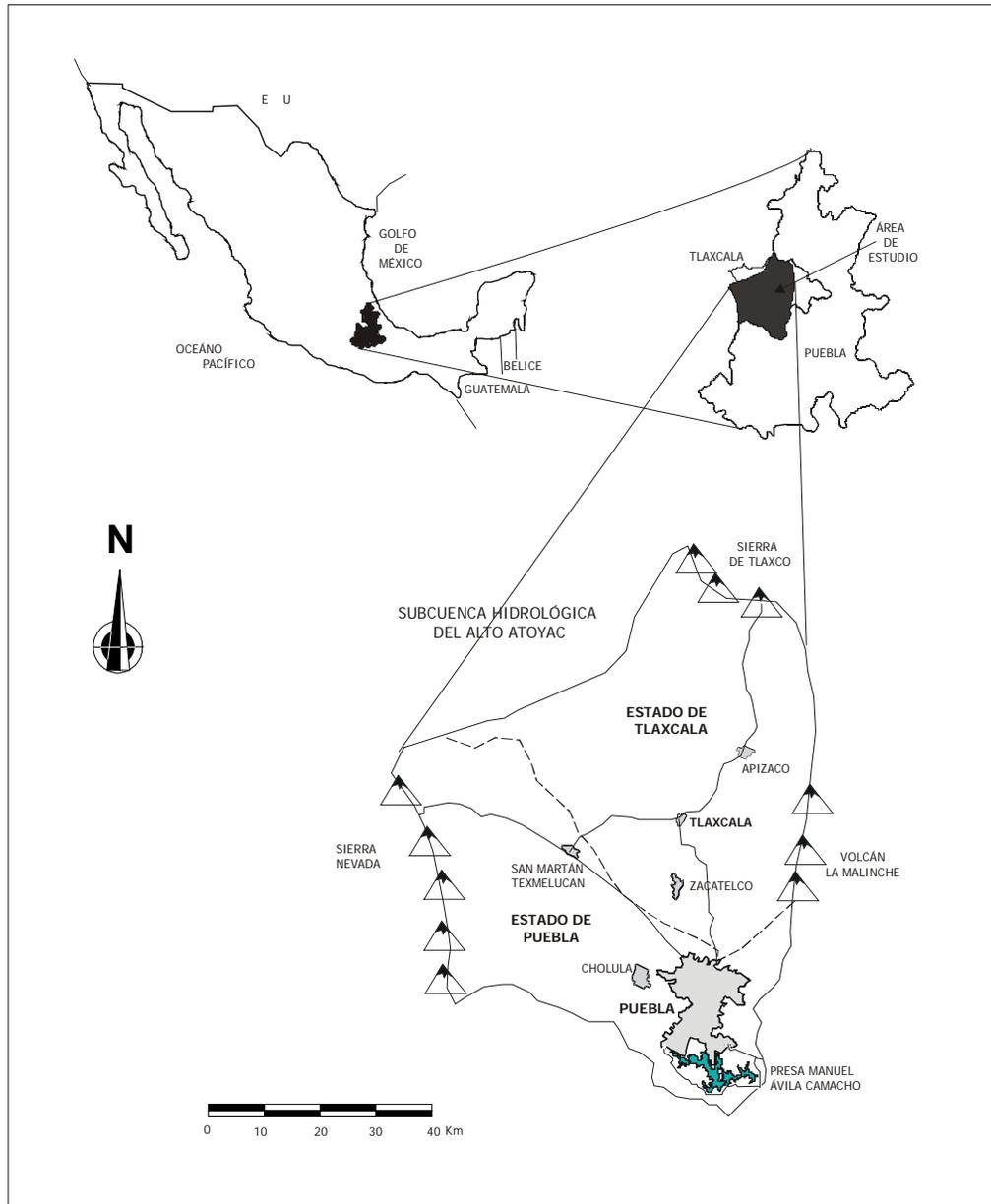


Figura 2.1. Situación geográfica. Límites del estado de Puebla y ubicación de la subcuenca hidrológica del Alto Atoyac. Nótese que la ciudad de Puebla se encuentra situada en el exutorio de la cuenca, lo que significa que es un área de descarga.

2.3 Características hidrológicas del estado y Valle de Puebla

Los recursos hidrológicos con que cuenta el estado de Puebla, incluyen fuentes de agua superficial y subterránea. Entre las primeras se cuentan los ríos, arroyos y cuerpos de agua, como son lagos y presas. Las fuentes de agua subterránea comprenden el agua que se infiltra y se almacenan en los materiales porosos y permeables del subsuelo. El agua subterránea puede circular lentamente a través de estos materiales y, eventualmente, aflorar a la superficie en forma de manantiales.

El balance hidrológico global para el estado, en el que se estima la cantidad total de agua que ingresa en éste (en forma de lluvia y de flujo, tanto superficiales como subterráneos provenientes de otras entidades), así como el volumen que sale de él o se pierde a través de corrientes, evapotranspiración, extracción y flujos subterráneos hacia otros estados, revela, según estimaciones de la Comisión Nacional del Agua (CNA), un excedente disponible de agua superior a 5,000 Mm³ anuales. Este volumen, sin embargo, no se encuentra uniformemente distribuido, pues mientras algunas zonas, como la sierra Norte, cuentan con abundantes corrientes superficiales, en la porción sur, y área de la mixteca, éstas son escasas. Además, cabe señalar, que debido a lo accidentado del terreno, los escurrimientos de la región norte no pueden ser aprovechados extensivamente para la agricultura y en su mayor parte escapan hacia el estado de Veracruz, por lo que en gran parte el desarrollo futuro de la entidad dependerá de las fuentes subterráneas.

De esta manera, la disponibilidad de agua en la entidad, es apenas suficiente para satisfacer las necesidades a futuro. Esta situación, exige mejorar el conocimiento de los recursos hidráulicos, particularmente de las fuentes subterráneas, así como la aplicación de medidas que permitan un mejor manejo de estos recursos.

La totalidad del territorio de Puebla, se encuentra comprendido dentro de cuatro grandes Regiones Hidrológicas (RH), de las 37 en que está dividido el territorio mexicano. Estas regiones son, en orden de extensión dentro de la entidad: RH18 río Balsas; RH27 ríos Tuxpan-Nautla; RH28 Río Papaloapan y la RH26 río Pánuco (INEGI, 2000a). Las tres primeras abarcan casi la totalidad del estado, mientras que la última ocupa sólo algunos km². Solamente la región del Balsas pertenece a la vertiente del Pacífico; las restantes

descargan sus captaciones hacia el Golfo de México. Como se puede ver en la figura 2.2, el Valle de Puebla se encuentra localizado dentro de la Región Hidrológica 18 del río Balsas, una de las más importantes del país.

El rasgo hidrográfico más sobresaliente de esta zona es el río Atoyac, como se puede observar en la figura 2.3, se forma a partir de la unión de los ríos San Martín o Frío, de Puebla y Zahuapan de Tlaxcala. El primero, baja de la Sierra Nevada, el segundo, de la Sierra de Tlaxco. Después de la unión de estos ríos, el Atoyac atraviesa la ciudad de Puebla y sirve de dren a las aguas residuales que se originan en este importante centro urbano y poblaciones vecinas como Cholula, para finalmente descargar en la presa Manuel Ávila Camacho.

El agua subterránea reviste gran importancia dentro del contexto económico del estado de Puebla, ya que en la entidad las corrientes superficiales son escasas y de volumen reducido, especialmente hacia la parte Centro y Sur de la entidad, o bien, su aprovechamiento es casi total, o presentan problemas de contaminación.

El Valle comprende dos zonas de explotación de aguas subterráneas: la de Atoyac-San Martín Texmelucan, que ocupa casi la totalidad del valle, e incluso se extiende hasta las ciudades de Tlaxcala y Apizaco. La segunda, es la Atoyac, que incluye el área conurbada de la ciudad de Puebla y se extiende hacia el oriente hasta la localidad de Amozoc (INEGI, 2000a).

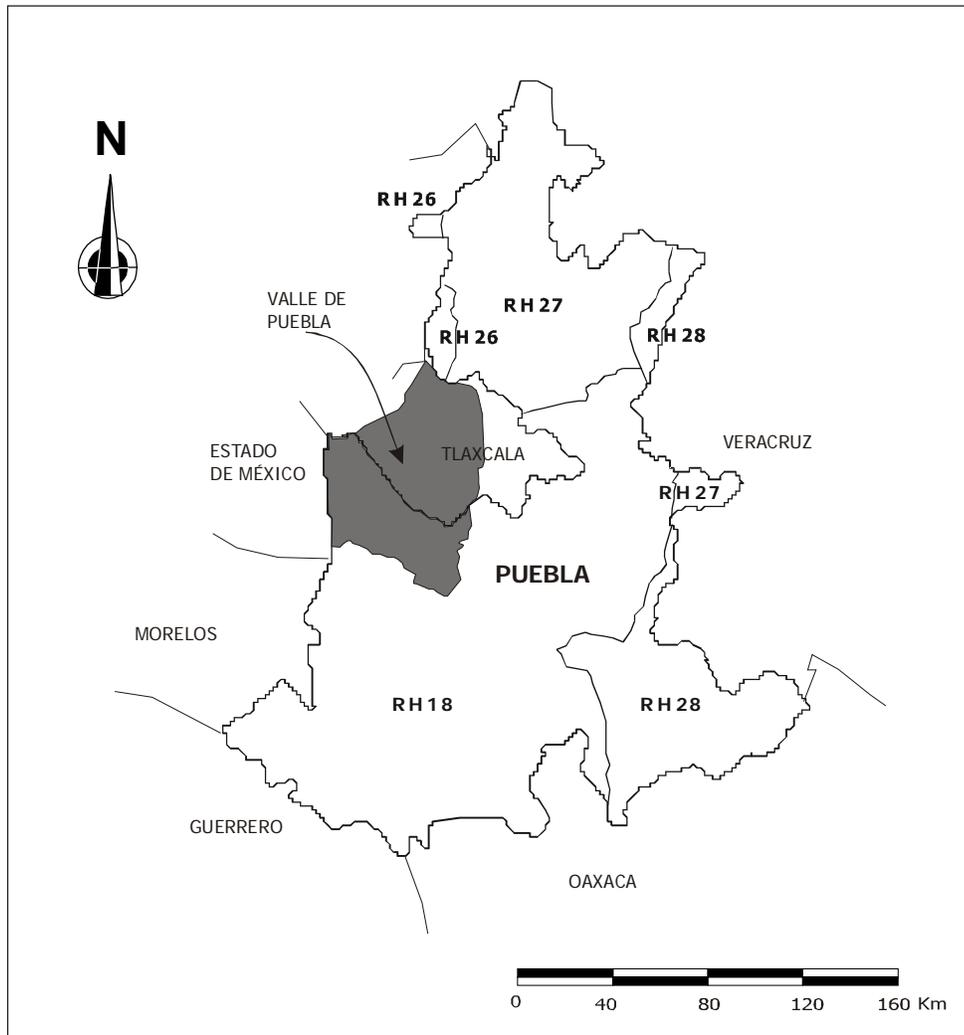


Figura 2.2. *Regiones Hidrológicas que conforman el estado de Puebla de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua. El área sombreada muestra que el Valle de Puebla se ubica dentro de la RH18 (INEGI 2000a).*

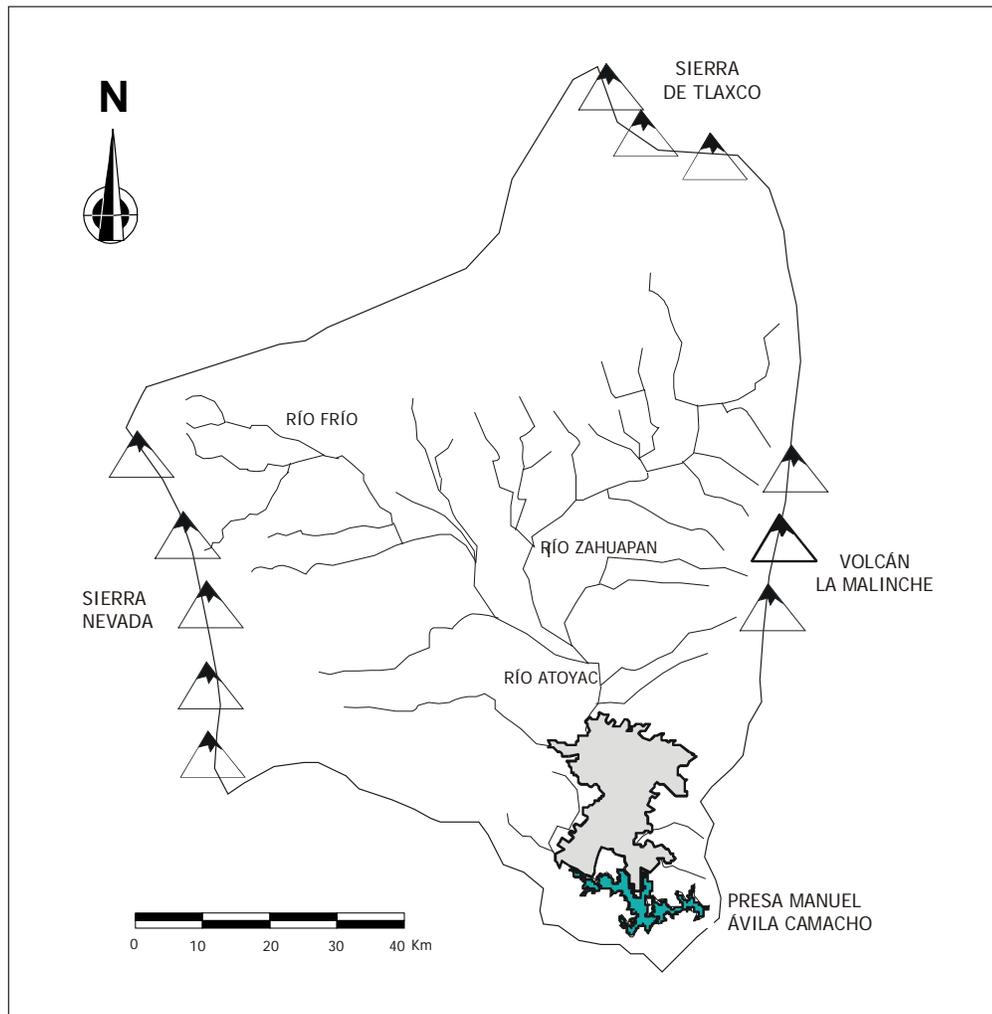


Figura 2.3. Los ríos principales de la subcuenca del Alto Atoyac son el río Frío y el río Zahuapan al unirse toman el nombre de Atoyac que, después de atravesar la ciudad de Puebla descarga en la presa Manuel Ávila Camacho (Modificado de INEGI 2000a).

2.4 Características geológicas del área de estudio

El área de estudio se encuentra en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transmexicano. El Eje es una franja volcánica formada por grandes sierras volcánicas, su formación se inició en el Cenozoico Superior (38 millones de años) y su actividad continúa hasta nuestros días.

La naturaleza geológica del territorio poblano es variada y bastante compleja, se pueden encontrar terrenos metamórficos con edades del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico, los cuales se hallan yuxtapuestos y limitados por grandes zonas de falla. Las rocas que los forman han sido afectadas por varias fases de metamorfismo y deformación a lo largo del tiempo geológico, y aún no existe la información suficiente para establecer un modelo evolutivo totalmente satisfactorio que explique las peculiaridades de esta parte de México. El más difundido de estos terrenos, dentro del estado, pertenece al Paleozoico Inferior, y se conoce con el nombre de Complejo Acatlán; aflora ampliamente en toda el área de la Mixteca Poblana. Sobre este basamento metamórfico, descansa una potente secuencia sedimentaria marina detrítica y carbonatada de edad mesozoica, que atestiguan la invasión oceánica en varios sectores de la entidad, la cual se extendió a gran parte del país; a finales de esta era y durante los inicios de la era cenozoica, las rocas sedimentarias formadas en los fondos marinos fueron elevadas, plegadas y fracturadas. Después de la etapa compresiva, se produce la emisión de materiales volcánicos a través de las fracturas corticales.

El más reciente de este volcanismo está representado por enormes volúmenes de lavas y piroclastos de composición basáltico-andesítica, que constituyen la provincia del Eje Neovolcánico (INEGI, 2000a). Un esquema general que muestra los tiempos geológicos y los principales eventos que marcaron la formación del Valle de Puebla se aprecia en la figura 2.4. La tectónica del área de estudio es importante desde el punto de vista hidrogeológico porque los hundimientos generados por las fallas tectónicas crean importantes estructuras de almacenamiento de agua subterránea, en dichos hundimientos los espesores del relleno aluvial y volcánico de permeabilidad media a alta son los máximos de la región. Además los fracturamientos y fallas constituyen vías de circulación preferencial del agua.

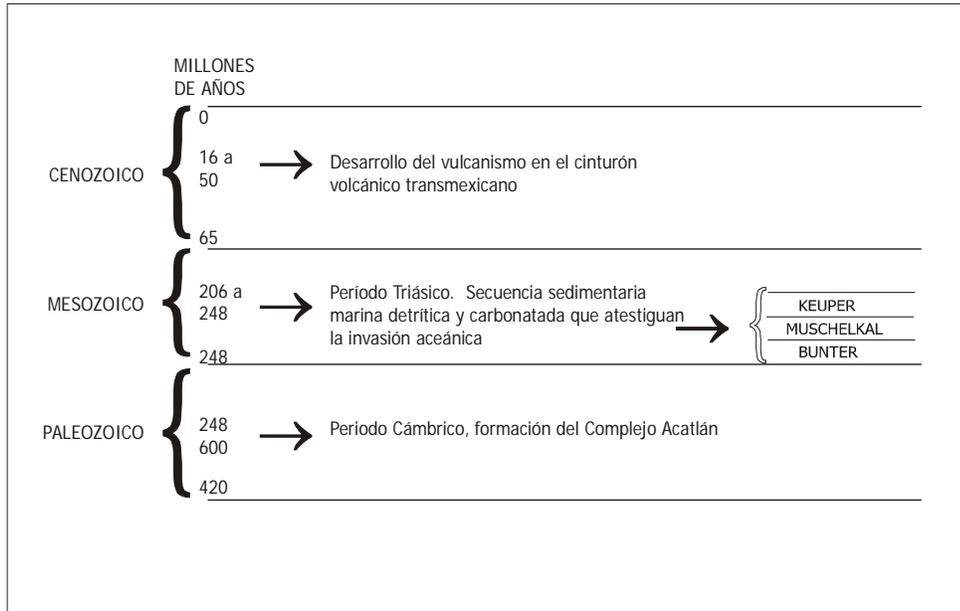


Figura 2.4. Esquema que muestra los eventos representativos que dieron origen al valle de Puebla dentro del marco del tiempo geológico (Modificado de Geyh 2000).

2.4.1 Formaciones geológicas en el Valle de Puebla

Las formaciones dentro del área de estudio son:

Depósitos aluviales cuaternarios, Qal Qial, que rellenan valles fluviales y conforman planicies, con espesores que pueden variar desde decenas de centímetros, hasta 200 ó 300 m. Estos depósitos están constituidos por partículas del tamaño de arcilla, limo, arena y grava cuyo origen comprende fragmentos de cuarzo, feldespatos, micas, arcillas y fragmentos de rocas circundantes.

La unidad de travertino, Qtr, es una formación de depósitos calcáreos que tienen su origen en el proceso de evaporación de antiguos manantiales. El material es poroso, con tubificaciones y cavidades de disolución.

Vulcanitas básicas e intermedias de tipo fenobasalto *Qv*. Tobas del grupo Balsas *Teob*, tobas Caulapan *TmCa* y vulcanitas Ixcalo *Tlx*, todos de origen volcánico, contienen además lavas, cenizas y pómez.

Los depósitos lacustres Tpl, están integrados por limolitas y areniscas pertenecientes a diversas formaciones del Terciario. Los constituyen clásticos continentales que comprenden conglomerados calcáreos, areniscas tobáceas y arcillas; derrames de rocas volcánicas andesíticas y basálticas; y lutitas, limolitas, areniscas, calizas lacustres con pedernal y algunas capas de evaporitas intercaladas entre las tobas.

La unidad T, está formada por arenisca y conglomerado. Consiste de una mezcla de depósitos clásticos y volcanoclásticos continentales; así como de conglomerados originados por abanicos aluviales. Incluye depósitos margosos, diatomíticos, de yesos y travertinos.

El Cretácico Superior Ks, está representado principalmente por rocas sedimentarias calcáreo-arcillosas de origen marino (INEGI, 2000a).

En la figura 2.5, se muestra la localización de cuatro cortes geológicos dentro del área de estudio. El corte A-A' que atraviesa de Norte a Sur y corta a los tres restantes; el B-B', al Norte de la ciudad de Puebla; C-C' y D-D' que atraviesan la ciudad de Puebla. En las figuras 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9 se presenta el detalle geológico de cada corte, esto con el objeto

de relacionar los materiales por los que circula el agua subterránea con el comportamiento y composición de la misma. Los cortes fueron obtenidos del trabajo de investigación Estudio Geofísico del Acuífero del Valle de Puebla (Jiménez, 1999b); la localización de cada uno se hizo en base a su descripción. En los cortes se puede observar la presencia de la fosa Atlixco. La fosa Atlixco es una depresión limitada por fallas estructurales; su hundimiento inicia en la ciudad de Atlixco, se prolonga con dirección Nor-Noreste por debajo de la ciudad de Puebla y continúa hacia el Norte al centro del volcán La Malinche.

Sección 1, corte A-A'. Se extiende de Sur a Norte, desde el río Atoyac hasta el cerro Temezontla, en el estado de Tlaxcala; en su porción Sur intercepta a la fosa de Atlixco. Básicamente está formado de un estrato superior de aluvión, enseguida uno de depósitos lacustres, le sigue uno de vulcanitas y el más profundo es un estrato de tobas del grupo Balsas.

Sección 2, corte B-B'. Se extiende de Oeste a Este, al Norte de la ciudad de Puebla, aproximadamente comienza en Huejotzingo, en las faldas del volcán Iztaccihuatl hasta las del volcán La Malinche. Su estratigrafía básicamente está formada de aluviones y depósitos lacustres y hacia el volcán la Malinche, por vulcanitas. Intercepta a la fosa Atlixco en las inmediaciones de La Malinche.

Sección 3, corte C-C'. Localizado entre las ciudades de Calpan y Puebla, con una dirección Oeste-Sureste. Está formado por aluviones, depósitos lacustres y tobas, esto en la región Calpan-cerro José Gpe. La ciudad de Puebla se localiza desde el cerro José Gpe. hasta el pozo Amalucan, el pozo CAPU se localiza en su parte norte. La geología de la ciudad de Puebla es muy variada, ya que además de depósitos aluviales y lacustres, cuenta con varios estratos de origen volcánico. También intercepta a la fosa Atlixco en su porción central.

Sección 4, corte D-D'. Se extiende en dirección Oeste-Este, aproximadamente inicia en la ciudad de Nealtican y termina en Puebla. Está formada por estratos de aluviones, depósitos lacustres, vulcanitas, tobas y formaciones marinas. A la altura de la ciudad de Puebla, la composición mayoritaria es de origen volcánico. El manantial Agua Azul aporta agua con altas concentraciones de sulfato, al igual que las anteriores intercepta a la fosa Atlixco.

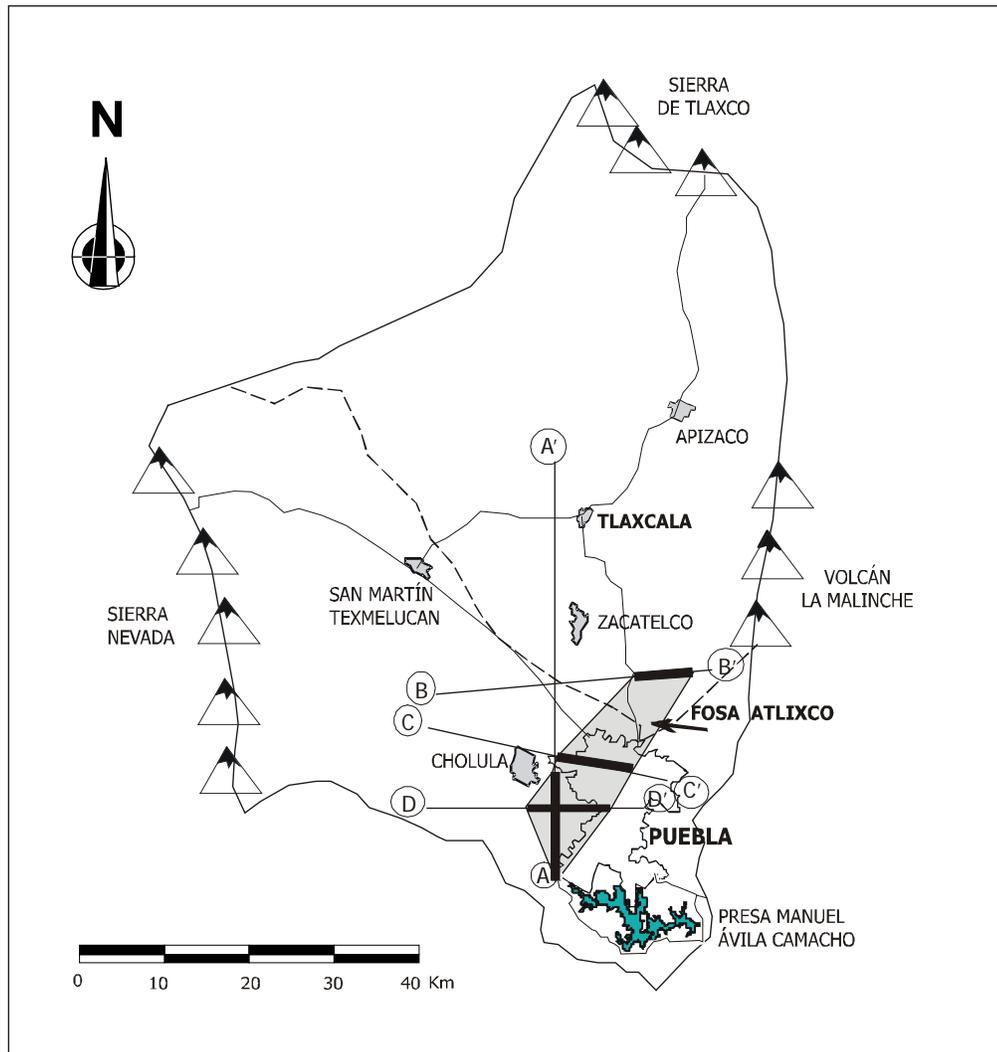


Figura 2.5. Cortes geológicos dentro del área de estudio. La sección A-A', con dirección Sur-Norte, se extiende desde el río Atoyac hasta la ciudad de Temozontla en el estado de Puebla. Sección B-B', con dirección Oeste-Este se extiende desde la ciudad de Huejotzingo hasta las inmediaciones del volcán La Malinche. Sección C-C', con dirección Oeste-Sureste se encuentra entre las ciudades de Calpan y Puebla. Sección D-D', con dirección Oeste-Este abarca desde la ciudad de Nealtican hasta Puebla (Modificado de Jiménez 1999b).

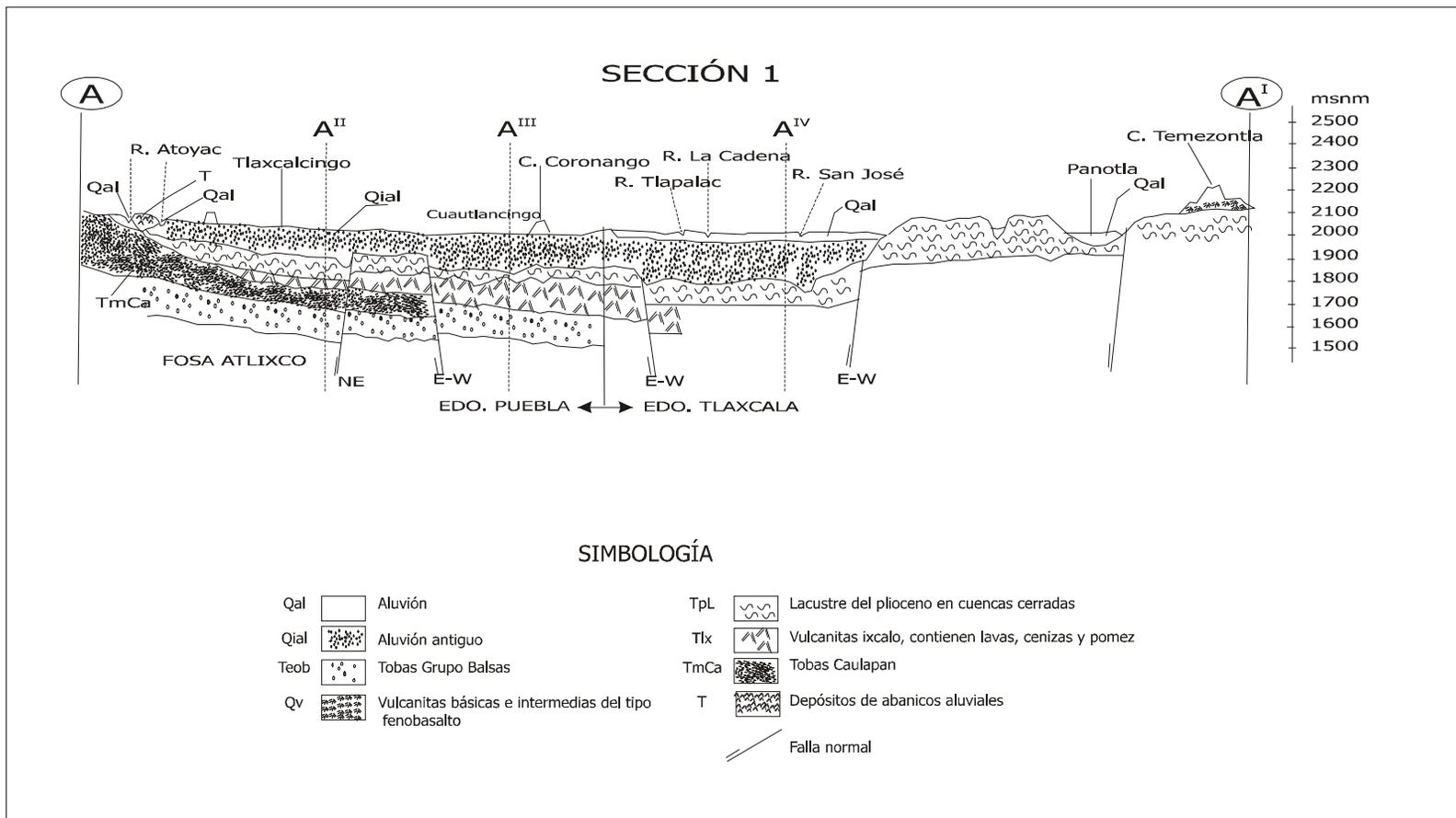


Figura 2.6. Detalle de la Secci3n 1, corte geol3gico A-A'. Abarca parte de los estados de Puebla y Tlaxcala. En el estado de Puebla su composici3n es de dep3sitos aluviales recientes y antiguos. En el Estado de Tlaxcala se pueden observar dep3sitos aluviales y lacustres. (Modificado de Jim3nez 1999b).

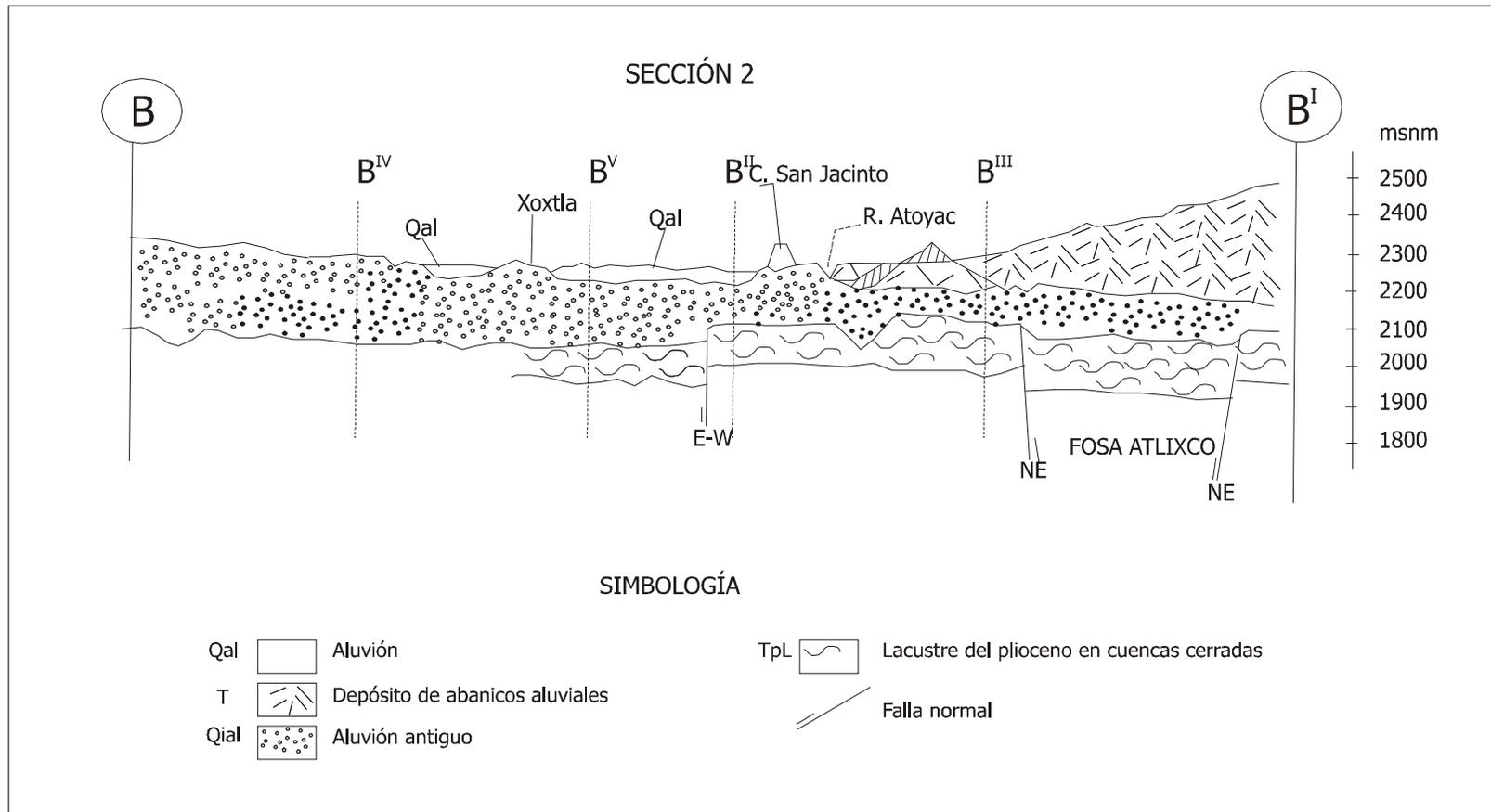


Figura 2.7. Detalle de la Sección 2, corte geológico B-B'. Ubicada entre el volcán Iztaccihuatl y el volcán La Malinche. Está formada a todo lo largo por un estrato de aluviones antiguos y algunos recientes, hacia el volcán La Malinche, están presentes vulcanitas y bajo el río Atoyac depósitos lacustres (Modificado de Jiménez 1999b).

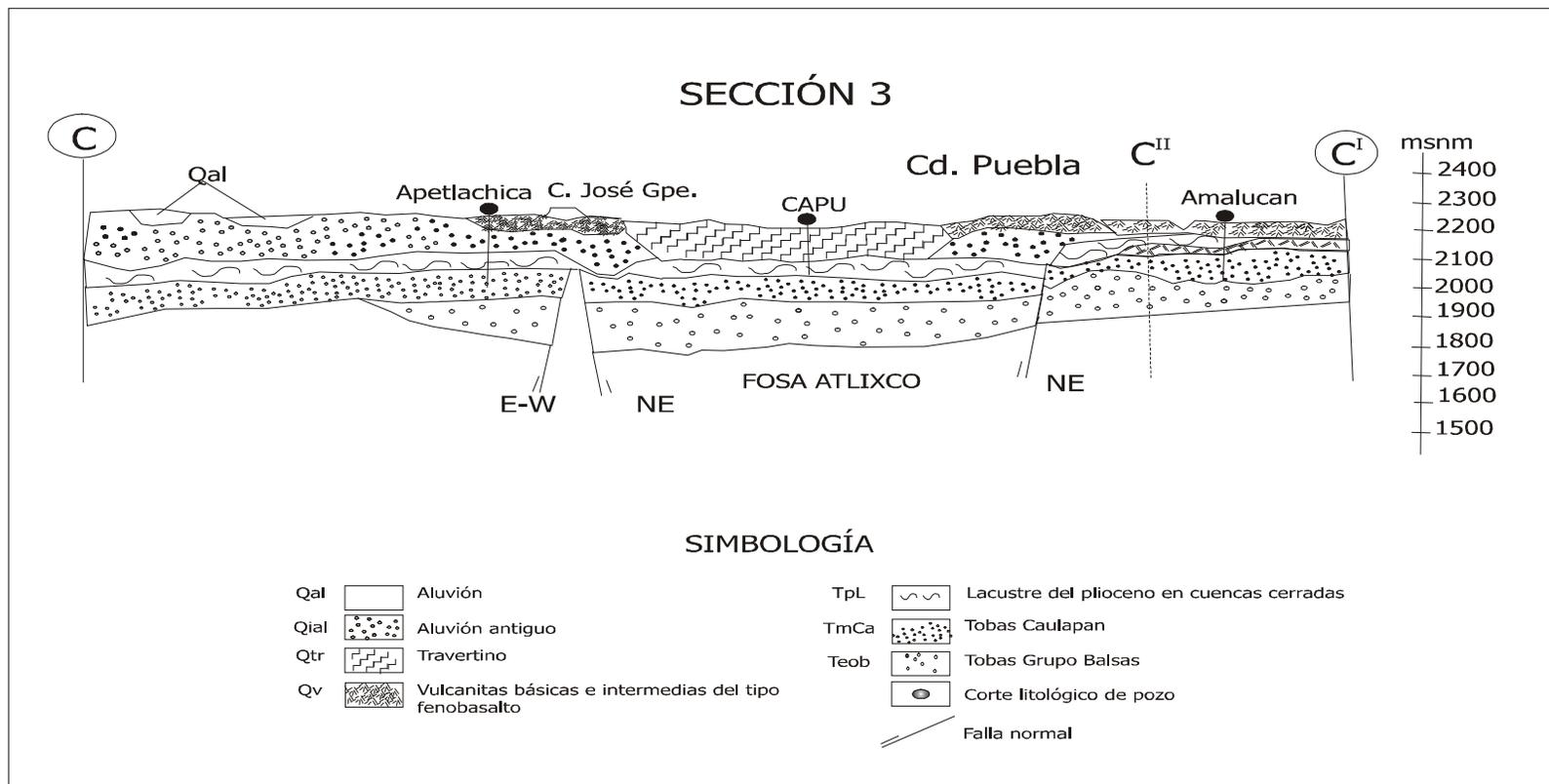


Figura 2.8. Detalle de la Sección 3, corte geológico C-C'. Localizado entre las ciudades de Calpan y Puebla, con una dirección Oeste-Sureste. Está formado por aluviones, depósitos lacustres y tobas, esto en la región Calpan-cerro José Gpe. (Modificado de Jiménez 1999b).

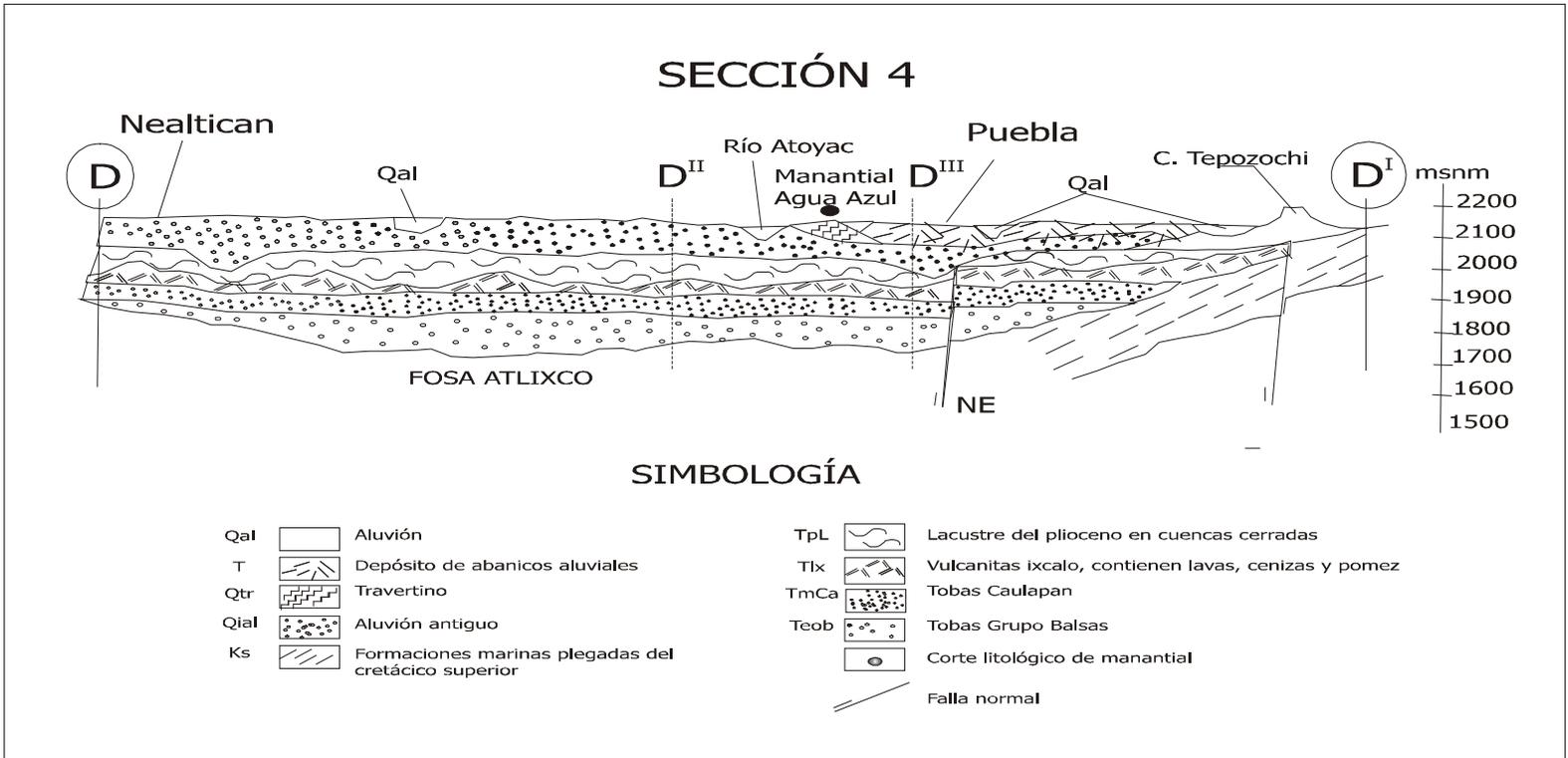


Figura 2.9. Detalle de la Sección 4, corte geológico D-D'. Localizado entre las ciudades Nealtican y Puebla, con una dirección Oeste-Este. Está formado por aluviones y depósitos lacustres de origen volcánico (Modificado de Jiménez 1999b).

Es importante señalar que en los cortes C-C' y D-D', se puede observar la localización de los sitios CAPU, Amalucan y Agua Azul, muestreados durante el desarrollo de la presente investigación.

Existen manantiales que, se localizan sobre estratos de travertinos, aluviones y depósitos lacustres; la presencia de fallas en el Valle es importante porque presume un intercambio de flujo entre los diferentes estratos que integran su geología. Además, se sabe que el sulfato presente en las aguas subterráneas puede estar asociado con, la disolución yeso-anhidrita, al agua de mar, aguas fósiles, oxidación de sulfuros, entre otros (Romero, 1996).

Otro dato a considerar es que en los cortes geológicos presentados, la profundidad promedio es de 400 m, y sólo muestran al acuífero superior, un primer acuitardo y parte del segundo acuífero; los materiales predominantes son de origen volcánico y sólo en el corte D-D' aparece una pequeña sección con formaciones marinas del Cretácico. La figura 2.10 muestra un mapa geológico de la superficie elaborado en base a los cortes descritos anteriormente.

2.4.2 Geohidrología de la zona mediante sondeos eléctricos

También se han realizado estudios geohidrológicos mediante prospección geoelectrica en las zonas de Xoxtla y Barranca Honda (límite Norte entre el estado de Puebla y Tlaxcala), y en la porción Noreste de la ciudad de Puebla, en el área de Amalucan desarrollados en 1997 por la compañía Geotecnología, S. A., por encargo del organismo regulador de agua potable, SOAPAP.

En ambas áreas se emplearon arreglos tetraelectródicos de Schlumberger con una abertura máxima entre electrodos de corriente de 1000 m, con lo que se alcanzó una profundidad real de investigación de 300 m para Amalucan y 400 m en Xoxtla–Barranca Honda (Jiménez, 1999b).

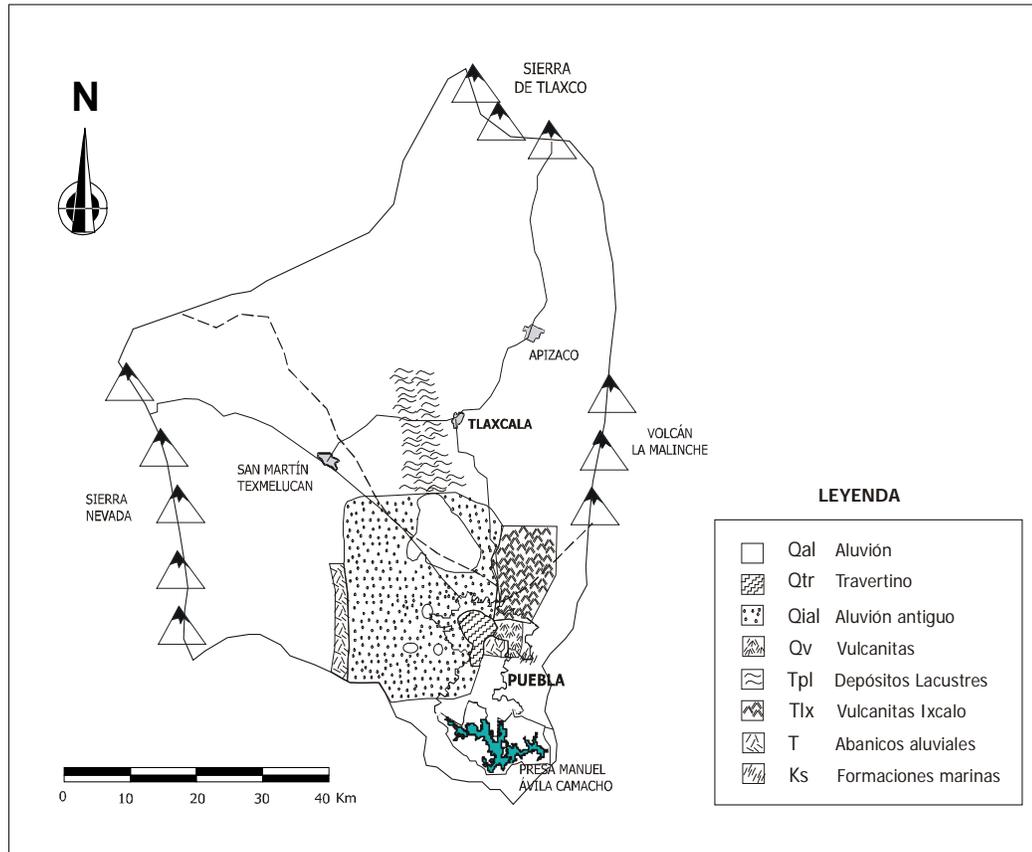


Figura 2.10. Mapa geológico. Se aprecia que los materiales en la superficie son mayoritariamente de tipo volcánico.

La figura 2.11 muestra la localización de las áreas de Xoxtla – Barranca Honda así como la de Amalucan. El área de Xoxtla–Barranca Honda está integrada por siete secciones, Amalucan por tres. Los resultados obtenidos para la primera campaña de sondeos eléctricos verticales se muestran en las figuras 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, los resultados de la segunda campaña se ilustran en las figuras 2.16, 2.17.

En la figura 2.12 se aprecia la geología del corte A-A' del área Xoxtla–Barranca Honda. Se observa un acuífero superior cuyo espesor varía entre los 100 m y 300 m, le subyace una capa impermeable y a ésta un segundo acuífero. Se sabe que el pozo de la planta VW es productor de agua con altos contenidos de sulfato, aunque no se cuenta con datos puntuales, su perforación alcanzó el estrato de arcilla. La discontinuidad de los estratos permite inferir la existencia de fallas en el área.

Las secciones B-B' y C-C' del área de Xoxtla–Barranca Honda, aparecen en la figura 2.13. Se aprecian los dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres; la existencia de discontinuidades eléctricas puede ser causada por la presencia de pequeñas fallas locales; también se infieren fallas por cambios en la posición que presenta cada estrato.

En la figura 2.14, se observan las secciones D-D' y E-E'. Al igual que en las anteriores, se observa la existencia de dos acuíferos y fallas geológicas. Lo mismo ocurre en las secciones F-F' y G-G', de la figura 2.15.

En las figuras 2.16 y 2.17, secciones del área de Amalucan, se observa el mismo comportamiento, un acuífero superior separado de un inferior por un estrato de arcillas lacustres.

Resumiendo, el estudio geoelectrico muestra la misma secuencia que los cortes geológicos: un acuífero superior formado por materiales volcánicos sobre un primer acuitardo de arcillas lacustres y parte del segundo acuífero en donde aparecen calizas del Cretácico.

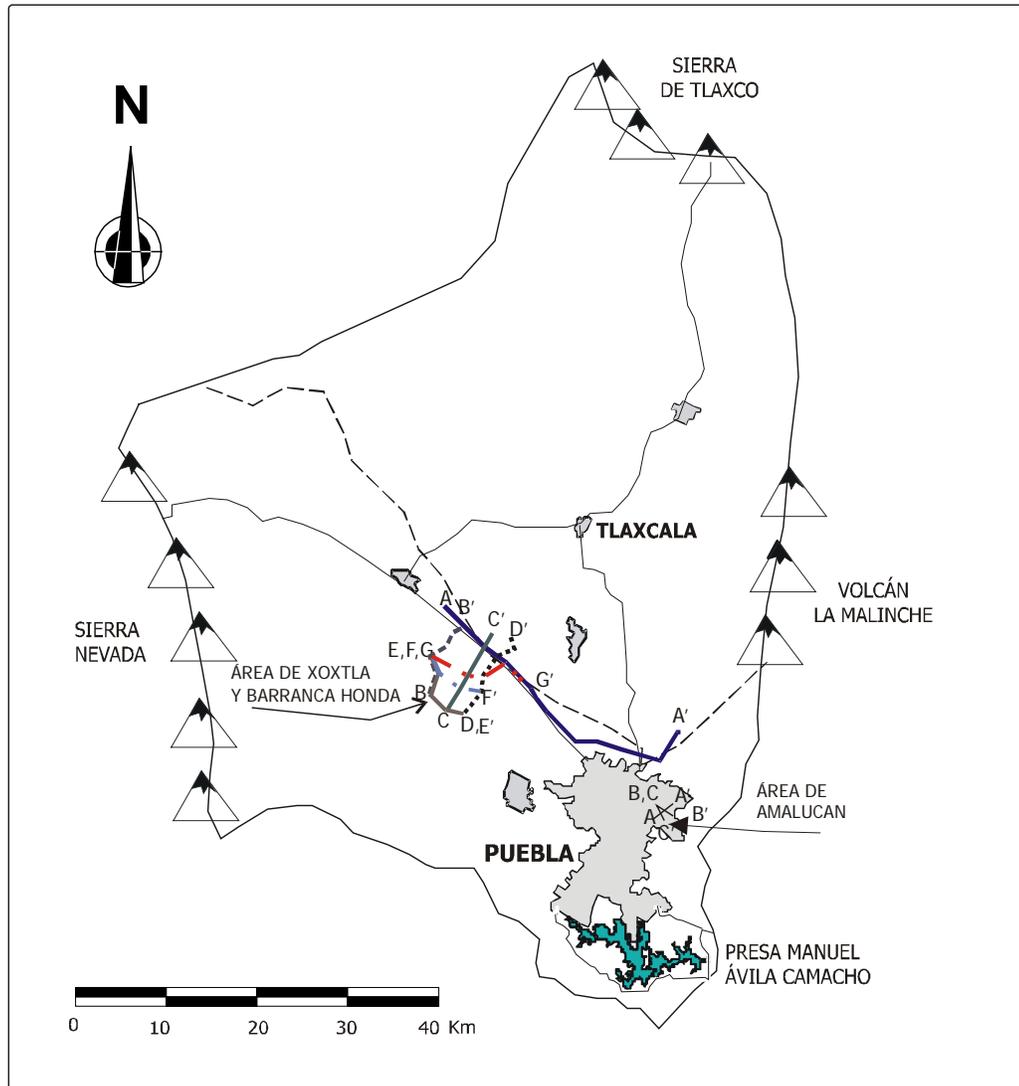


Figura 2.11. Localización de los sondeos eléctricos en las áreas de Xoxtla-Barranca Honda y Amalucan. La primera abarca la porción Norte del estado de Puebla. La segunda cubre la porción Noreste de la ciudad de Puebla (Modificado de Jiménez 1999b).

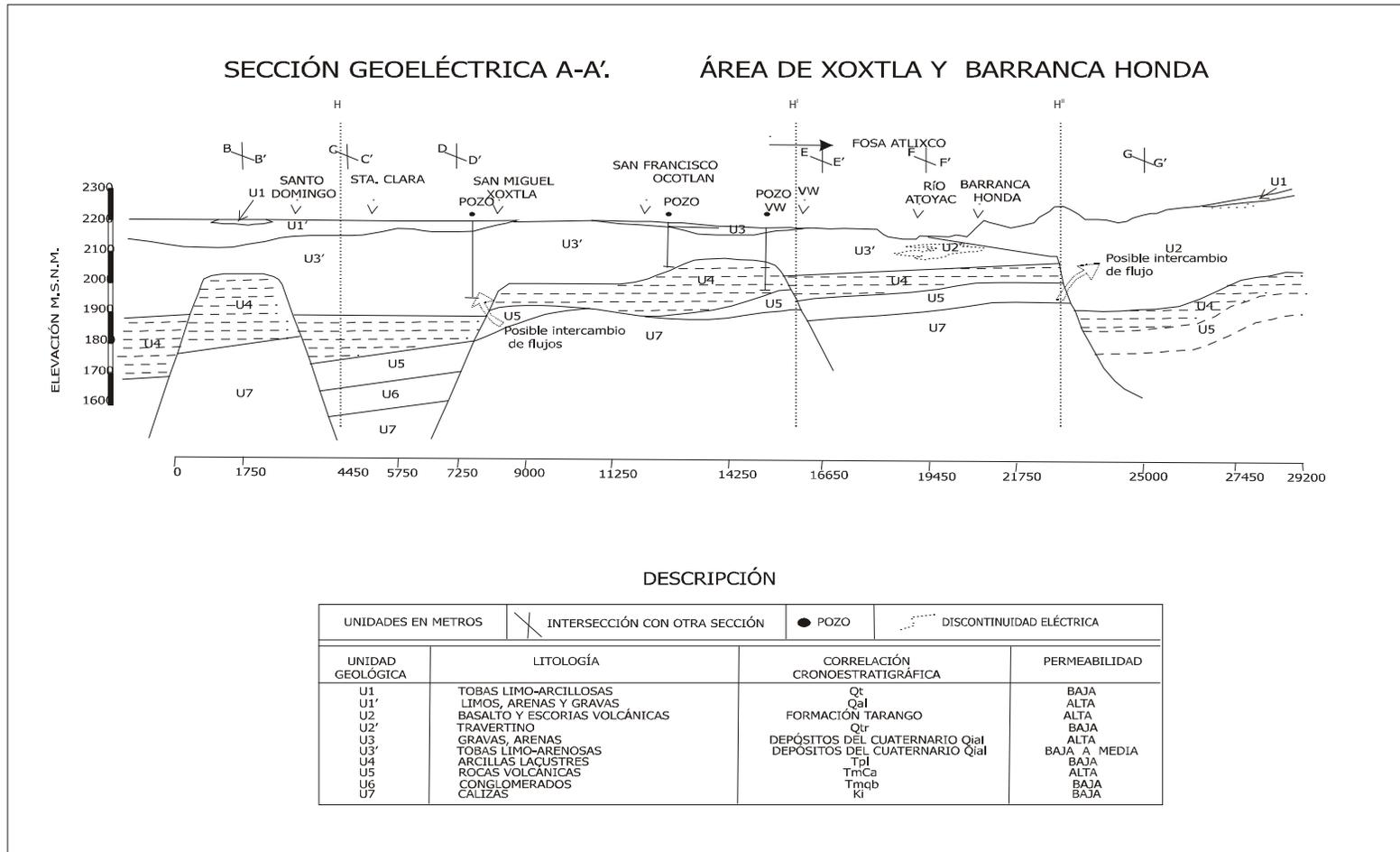


Figura 2.12. Sección A-A', área de Xoxtla – Barranca Honda. Se observa un acuífero superior cuyo espesor varía de 100 a 300 m aproximadamente, un estrato de arcillas lacustres que sirve de base al primer acuífero y de techo al segundo. Esta es la mayor sección del área y es interceptada por las otras secciones, los cruces muestran el lugar en el que se da la intersección (Modificado de Jiménez 1999b).

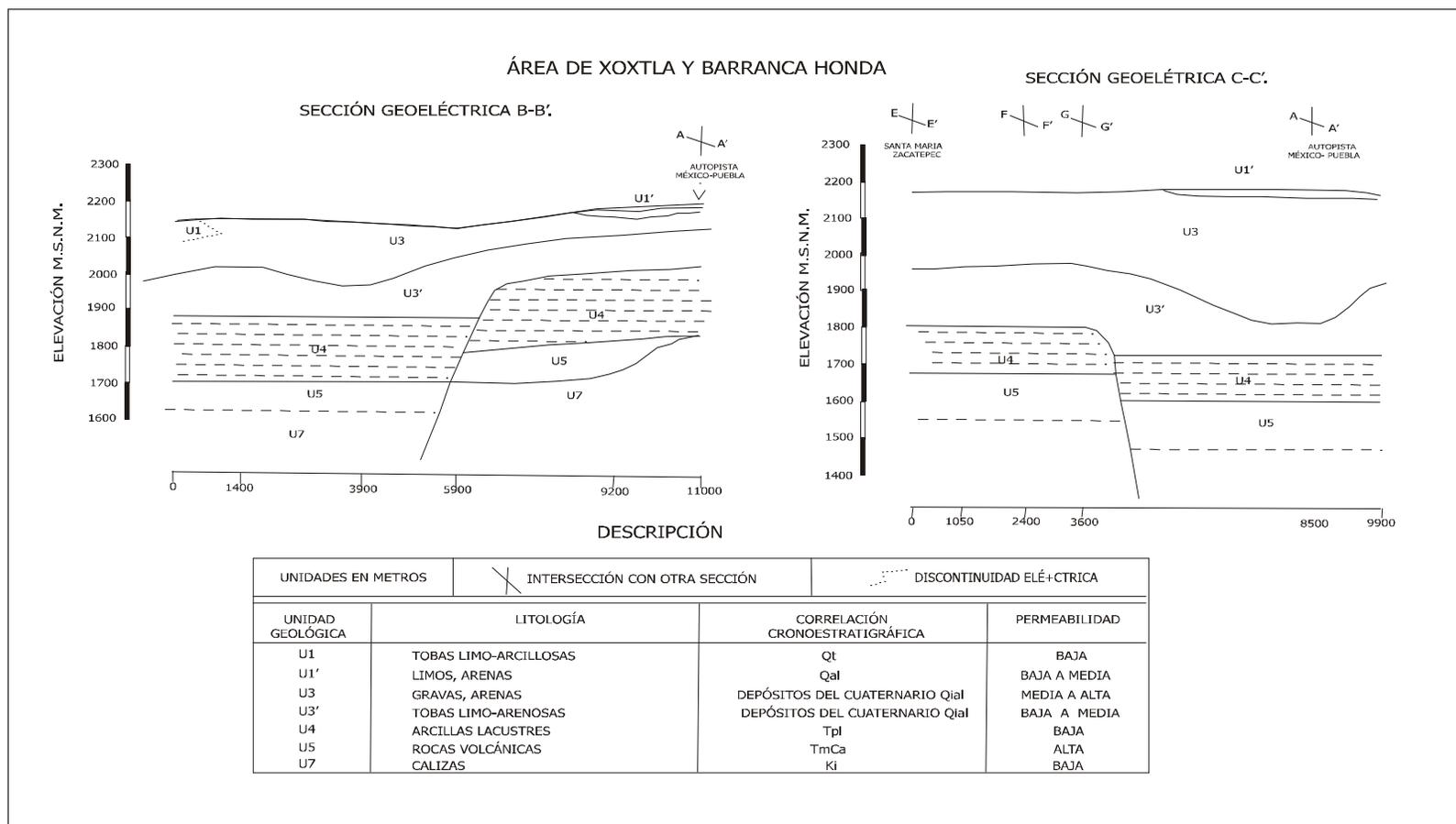


Figura 2.13. Secciones B-B' y C-C' del área de Xoxtla – Barranca Honda. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres. La presencia de fallas supone cierto intercambio de flujos entre ambos acuíferos. Los cruces ilustran el lugar en el que se da la intersección con otras secciones (Modificado de Jiménez 1999b).

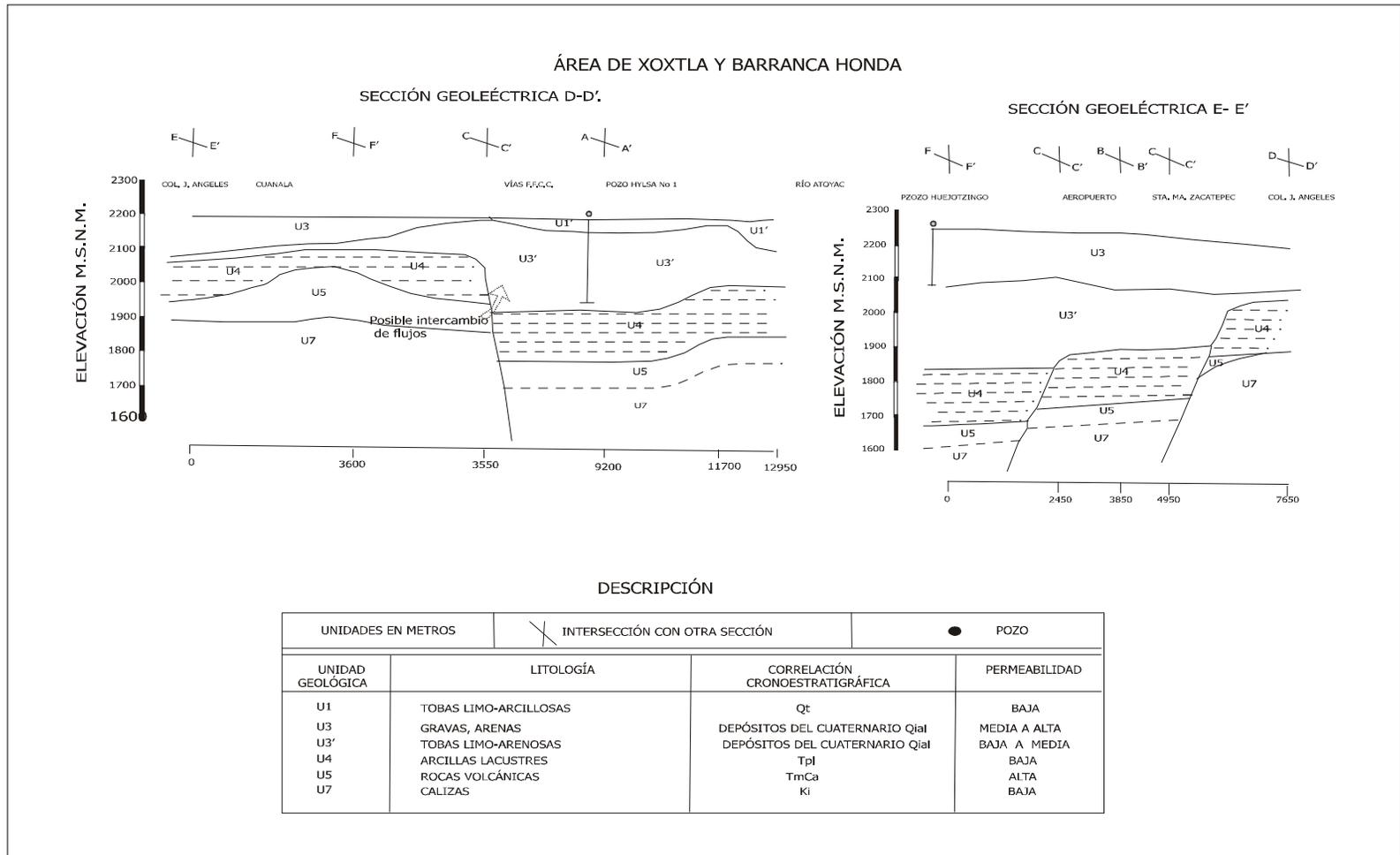


Figura 2.14. Secciones D-D' y E-E' del área de Xoxtla – Barranca Honda. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres. La presencia de fallas supone cierto intercambio de flujos entre ambos acuíferos. Los cruces muestran el lugar en el que se da la intersección con otras secciones (Modificado de Jiménez 1999b).

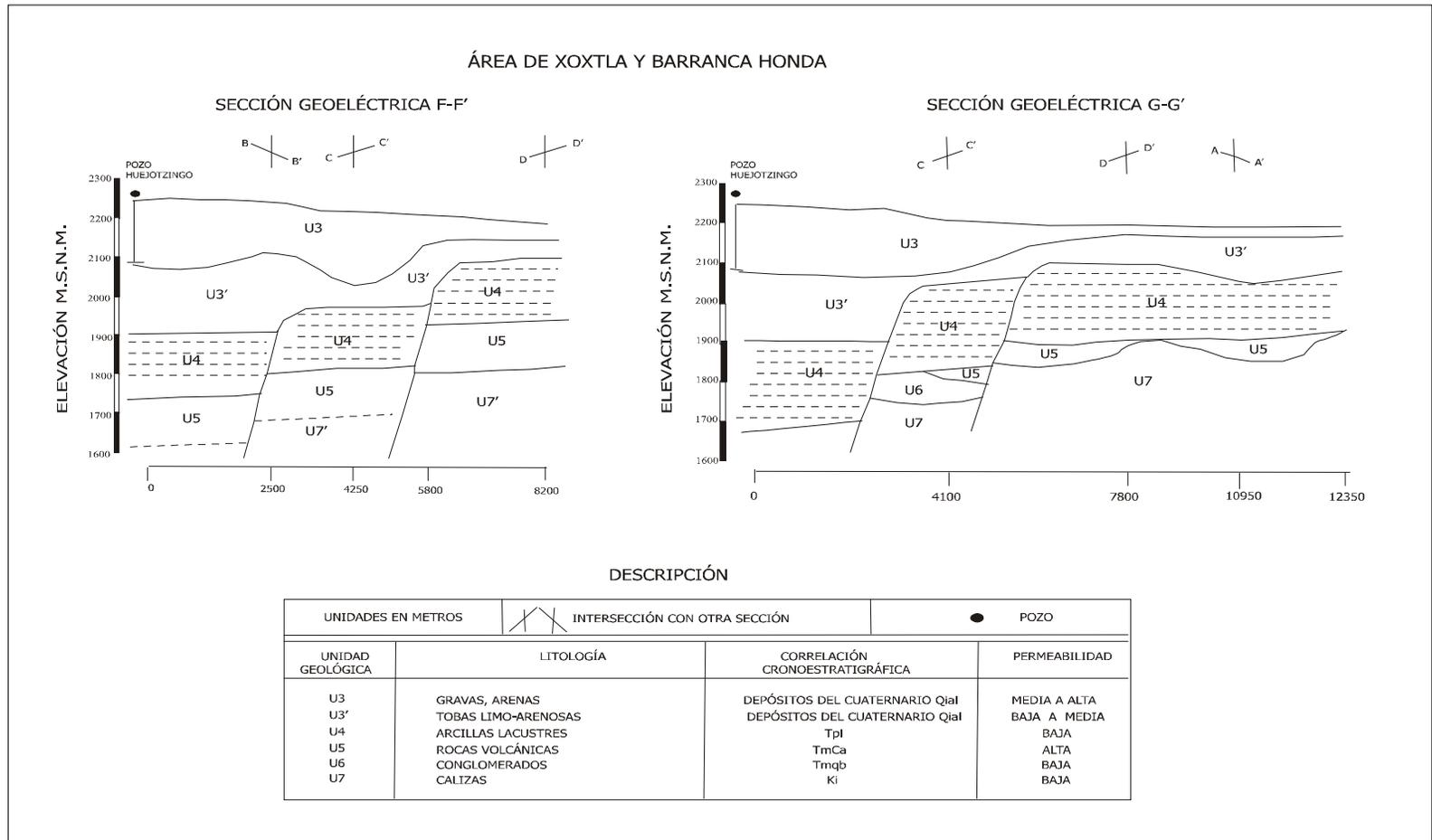


Figura 2.15. Secciones F-F' y G-G' del área de Xoxtla – Barranca Honda. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres. La presencia de fallas permite suponer cierto intercambio de flujos entre ambos acuíferos. Los cruces muestran el lugar en el que se da la intersección con otras secciones (Modificado de Jiménez, 1999b).

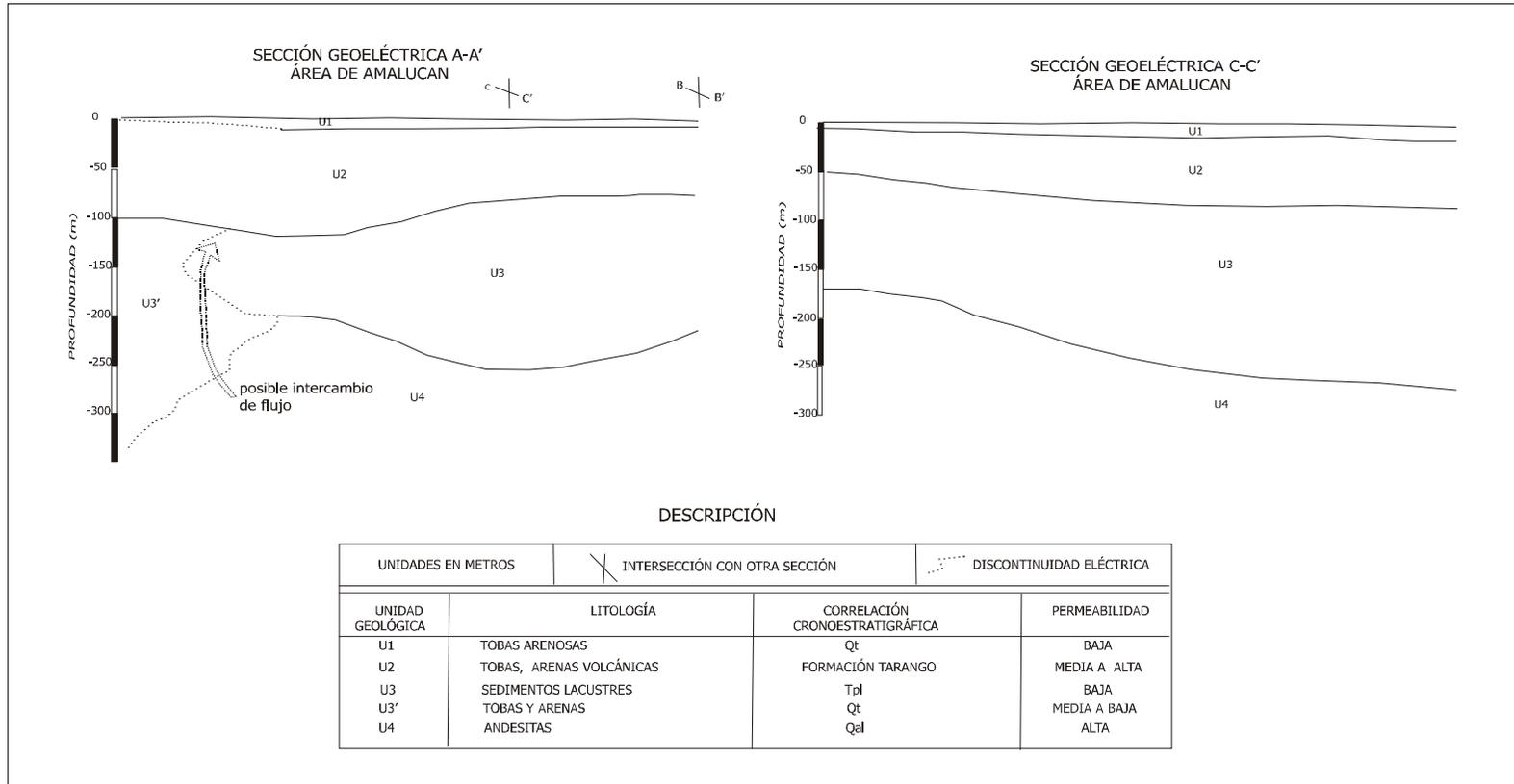


Figura 2.16. Secciones A-A' y C-C' del área Amalucan. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres, el espesor del primero en esta área es menor, va de los 50 hasta los 100 m; el estrato impermeable alcanza grandes espesores, hasta 200 m. La discontinuidad eléctrica hace suponer la existencia de fallas que permitiría el intercambio de flujos entre ambos acuíferos. Los cruces ilustran el lugar en el que se da la intersección con otras secciones (Modificado de Jiménez 1999b).

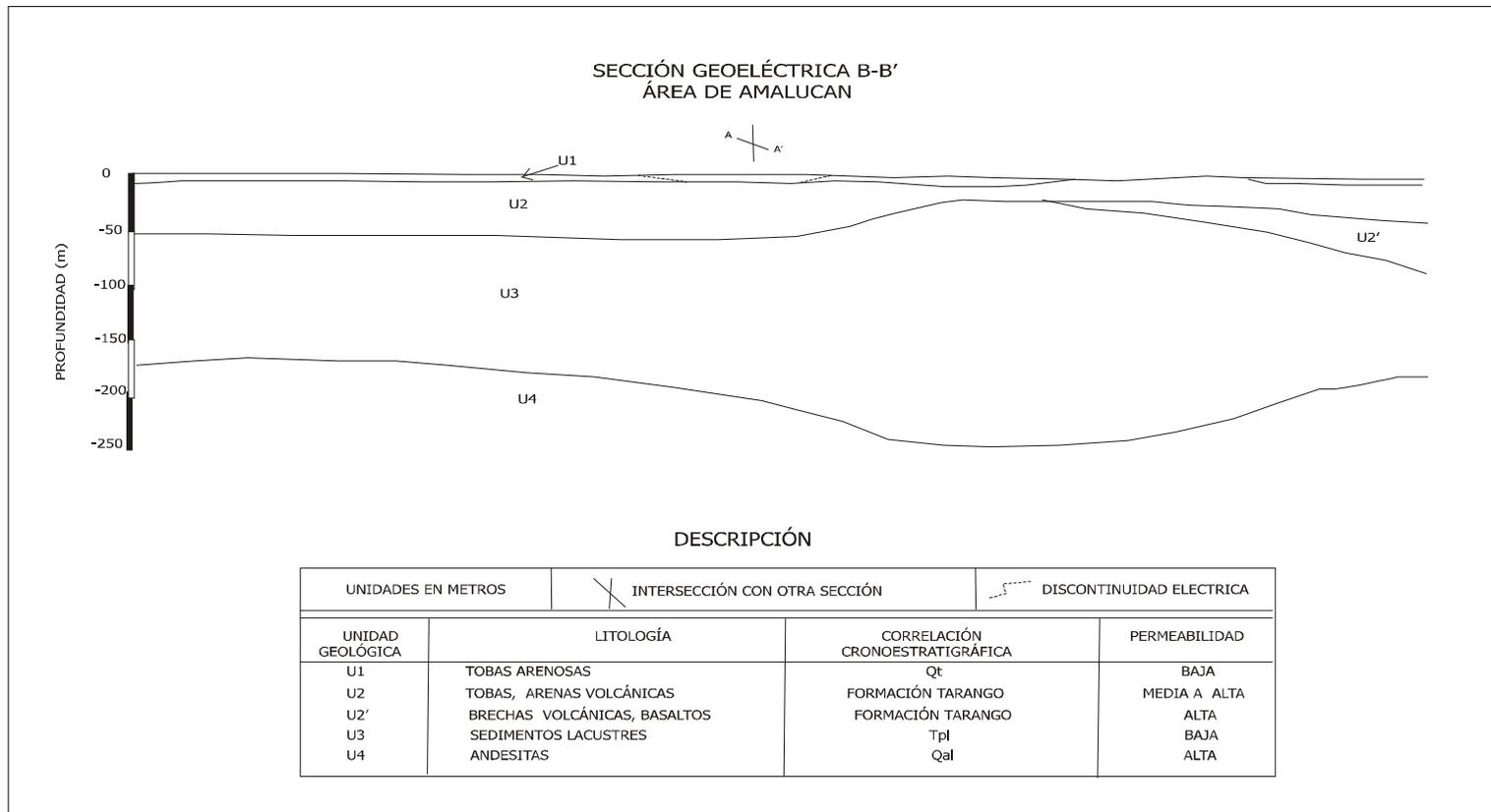


Figura 2.17. Secciones B-B' del área Amalucan. Se observan dos acuíferos separados por un estrato de arcillas lacustres, el espesor del primero en esta área es menor, en promedio es de 50 m; el estrato impermeable alcanza grandes espesores, hasta 200 m. El cruce ilustra el lugar en el que se da la intersección con la sección A-A' (Modificado de Jiménez, 1999b).

2.4.3 Consideraciones sobre el mecanismo de ascenso de las aguas subterráneas y términos empleados en la investigación.

En la figura 2.18 se presenta el esquema de como puede ocurrir el ascenso del flujo del acuífero inferior al superior, en (a) se trata de una falla que atraviesa el acuitardo, permitiendo el ascenso del flujo hasta la superficie en forma de manantiales, para distinguir los manantiales que afloran en la Sierra Nevada de los que surgen en la ciudad de Puebla, a los primeros se les llamó “manantiales de montaña” y a los segundos “manantiales ascendentes”. Esa misma fractura, a su vez puede ser interceptada por otra que la cruce y que se encuentre abierta (b), este mecanismo permite el ascenso de flujo del acuífero inferior al superior por diferencia de presiones, originando una mezcla entre ambos flujos.

En la figura 2.19, se presenta un pozo (a), que durante su construcción e instalación atravesó el acuitardo, permitiendo que el agua salga a presión hasta alcanzar una altura en la que se equilibra, a este tipo de pozo se le llamó artesiano y se consideró que sus características permiten obtener agua sólo del segundo acuífero. También puede ocurrir que durante la construcción del pozo se haya interceptado la fractura (b), obteniendo como resultado agua del segundo acuífero. En estos dos últimos casos se consideró al pozo como profundo por aportar agua del acuífero confinado, sin importar la profundidad a la que éste se encuentre. Se le llama pozo somero al que obtiene agua del acuífero libre o superior, como se muestra en la figura 2.20, no importa la profundidad del acuífero, mientras se trate del acuífero libre, los pozos instalados en el se consideran someros.

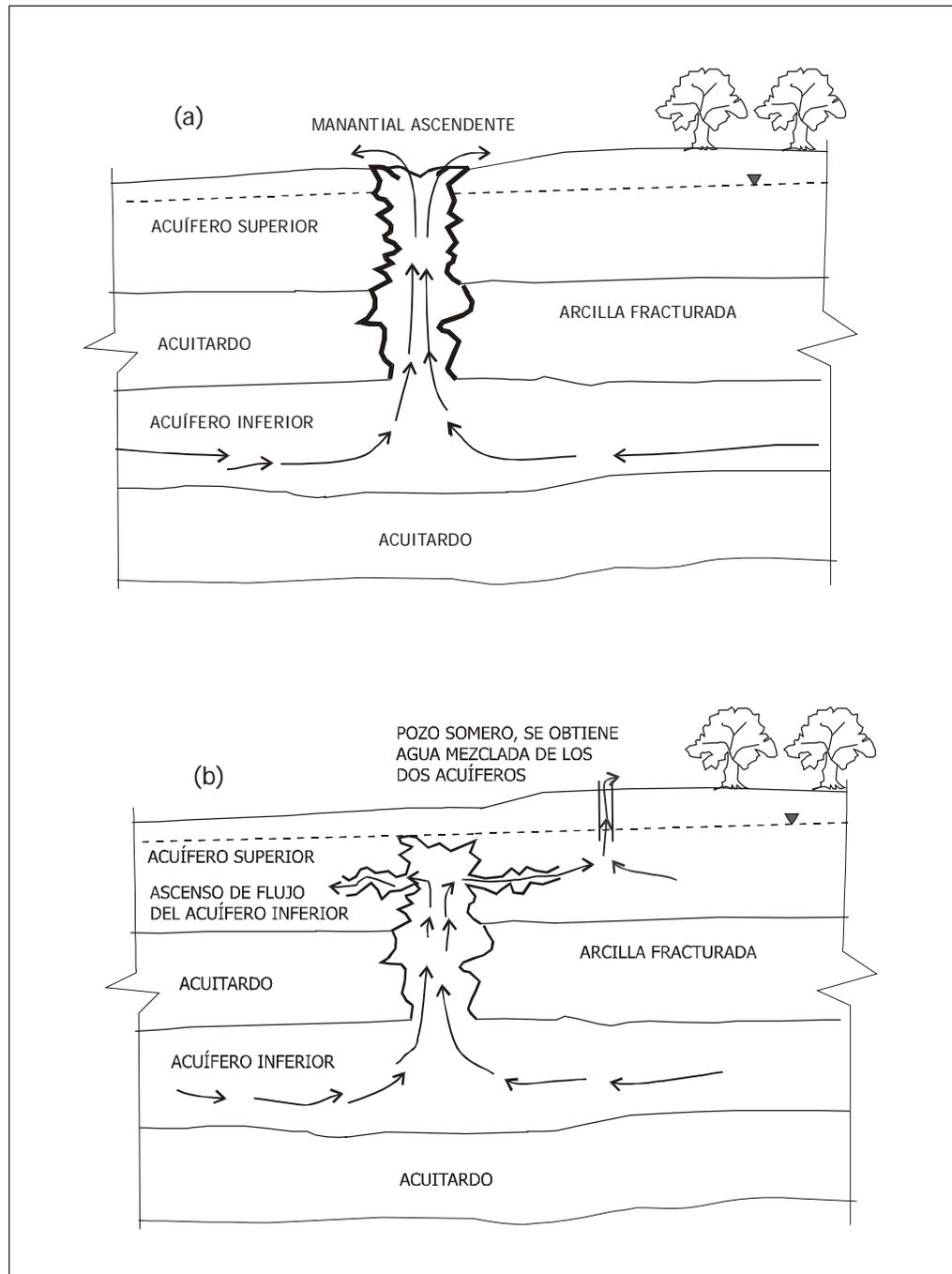


Figura 2.18. El ascenso del flujo puede ocurrir por medio de una fractura que atraviesa el acuitardo (a), esa misma fractura puede ser interceptada por otra que la cruce y que se encuentre abierta (b), permitiendo la mezcla entre ambos flujos.

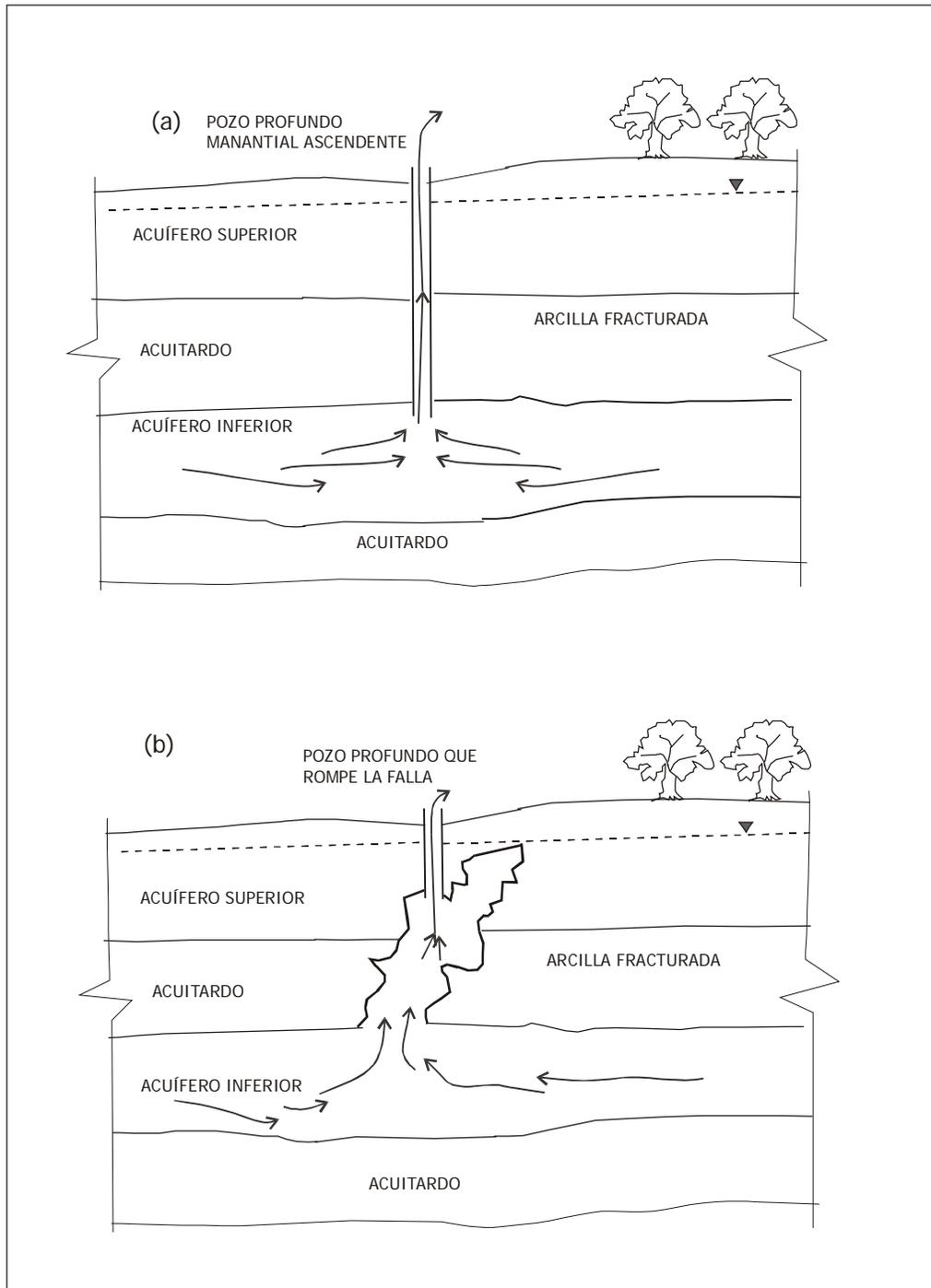


Figura 2.19. Un pozo (a), que atraviesa el acuitardo aporta agua del acuífero inferior. (b) durante la construcción del pozo se rompe la fractura obteniendo agua del segundo acuífero. En estos dos últimos casos se consideró al pozo como profundo.

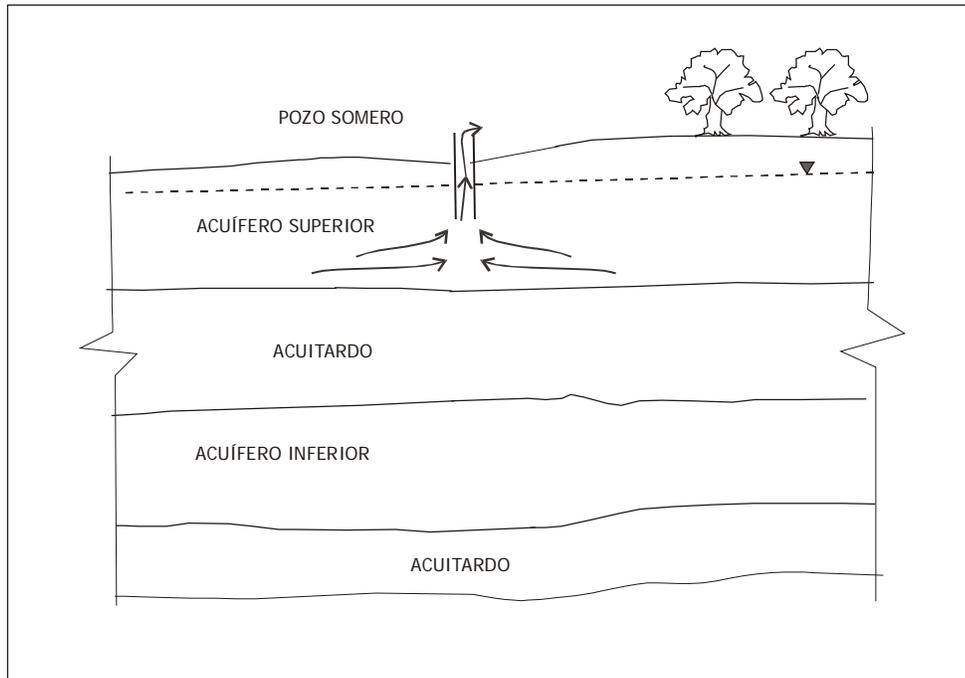


Figura 2.20. Un pozo somero es el que obtiene agua del acuífero libre o superior. Pueden estar en sitios en los que el espesor del estrato sea muy grande y también la perforación; mientras no atravesase el acuitardo y llegue al siguiente acuífero, se considerará como somero.

2.5 Áreas de recarga y niveles estáticos

El acuífero superior está constituido en la secuencia aluvial y volcánica del Cuaternario, que recibe una recarga subterránea proveniente de las partes altas de la cuenca, donde tiene lugar una importante infiltración del agua de lluvia; principalmente de la Formación Tarango que ocupa estribaciones de La Malinche y de la Sierra Nevada. La figura 2.21 muestra las principales zonas de recarga para el acuífero, la presencia de manantiales en la ciudad de Puebla, es un rasgo importante, ya que indica que se trata de un área de descarga natural del sistema acuífero.

Como la formación Tarango tiene estratificaciones de material con baja permeabilidad, afloran en las estribaciones de la Sierra Nevada un número importante de pequeños manantiales; estos manantiales se observan desde Río Frío hasta las faldas del Popocatepetl.

Este es el acuífero que tradicionalmente se ha explotado por medio de pozos, y que desde aproximadamente 1980, empezó a mostrar síntomas claros de sobreexplotación, por lo menos en la zona de la ciudad de Puebla.

El espesor del acuífero superior varía de unos cuantos metros en sus bordes a más de 200 m en su porción central, más o menos correspondiente con el área circundante a la ciudad de Puebla con un valor medio de 130 m. Su permeabilidad va de media a alta y contiene agua de buena calidad. Como respuesta a la creciente demanda de volúmenes extraídos se tienen abatimientos de niveles estáticos a través del tiempo, con valores que fluctúan entre 2 y 3 m anuales y que acumulados rebasa los 20 m en algunos sitios a partir de 1973.

La secuencia aluvial y volcánica correspondiente al acuífero superior descansa sobre depósitos lacustres del Plioceno, que por su contenido arcilloso funcionan como acuitardo dificultando el flujo del agua a niveles más profundos, así como el flujo que se desarrolla en la secuencia de vulcanitas miocénicas y oligocénicas que constituyen el acuífero intermedio que contiene agua sulfatada, sujeta a presiones mayores que las del acuífero superior que funciona como libre.

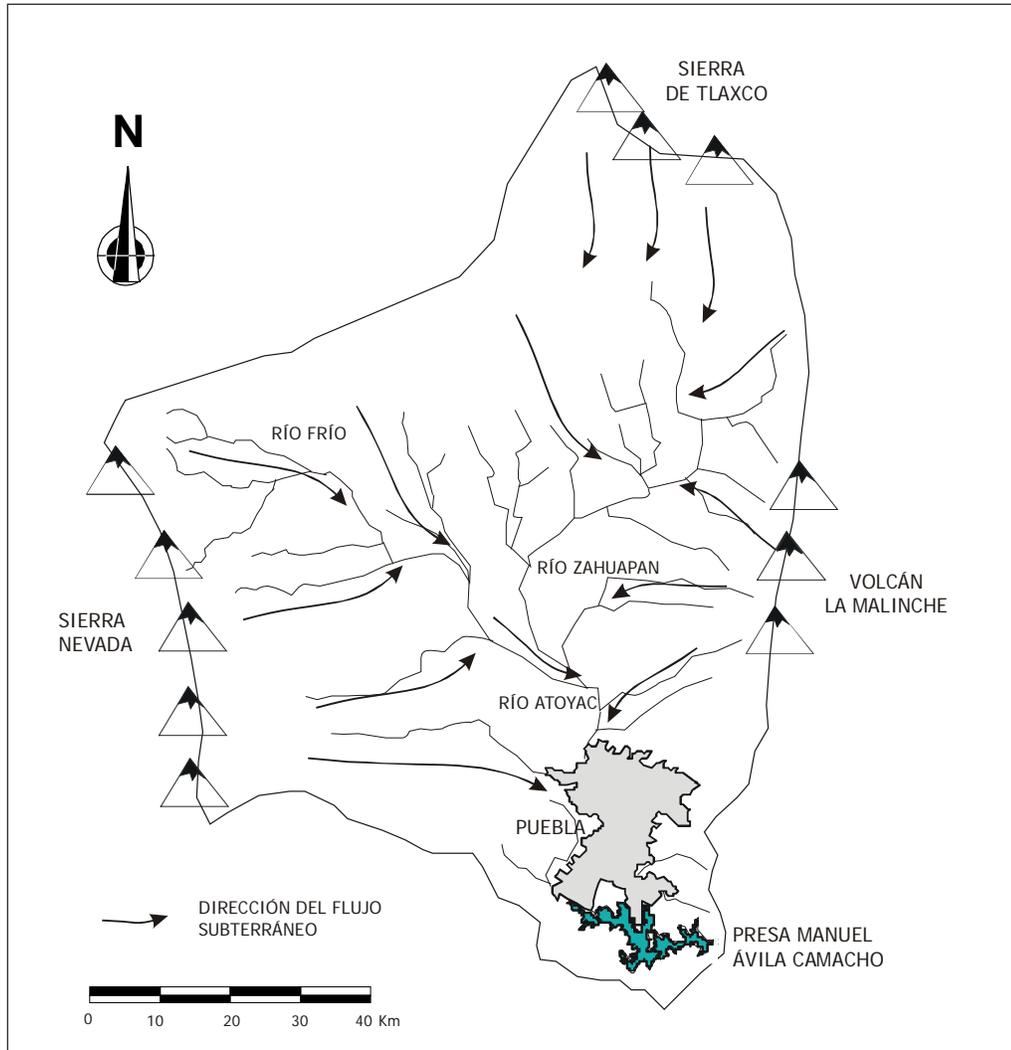


Figura 2.21. Las principales áreas de recarga al acuífero son la Sierra Nevada, la Sierra de Tlaxco y el volcán La Malinche.

Hasta hace poco tiempo, casi nada se sabía del acuífero intermedio llamado profundo, precisamente las deducciones hechas acerca de las manifestaciones naturales como el manantial del balneario Agua Azul, a las que se sumaron las derivadas de perforaciones de pozos, como en 1992 el Atlixcayotl No. 1 en el área de Cacalotepec, que alcanzó los 300 m y más recientemente el pozo Sulfuroso No. 2 o CAPU que a 160 m de profundidad manifestó artesianismo y es fuente de agua sulfatada.

El acuífero superior en la ciudad de Puebla ha sido sobreexplotado gradual e intensivamente a partir de 1980, alcanzando niveles que se consideran como un severo impacto ambiental, pues entre los efectos perjudiciales más relevantes se pueden citar el descenso de los niveles del agua subterránea, incrementando en forma significativa los costos de bombeo e inhabilitando norias y pozos someros, otros efectos notables son el agrietamiento del terreno y el deterioro de la calidad del agua por migración de agua sulfatada desde el acuífero subyacente sujeto a presiones mayores (Geotecnología, 1997).

En 1973 se realizó el primer estudio para conocer el funcionamiento del acuífero superior obteniéndose una configuración con las curvas de igual elevación de los niveles estáticos. Al analizar dicha configuración se pueden apreciar dos zonas principales de recarga a los acuíferos del valle de Puebla, una se localiza en las estribaciones de los volcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl, la otra en las estribaciones de La Malinche.

La citada en primer lugar origina un flujo subterráneo que adopta una dirección general SE, marcado en sus inicios por la curva con valor 2400 metros sobre el nivel del mar (msnm), coincidiendo sensiblemente con el cauce del río Atoyac, dren superficial y subterráneo de las aguas regionales; se junta con el flujo proveniente del poniente, de las estribaciones del Popocatepetl, que parte de la curva 2230 msnm. La segunda recarga origina un flujo subterráneo con dirección Suroeste iniciando en la curva 2300 msnm, coincidiendo aproximadamente con el cauce del río Zahuapan. A la altura de la curva 2180 se juntan ambos flujos y siguen una trayectoria hacia el sur, siguiendo el rumbo del río Atoyac antes de su desembocadura en el embalse de la presa Manuel Ávila Camacho. Tanto las curvas de niveles estáticos como las líneas de flujo para el estudio realizado en 1973, se pueden apreciar en la figura 2.22.

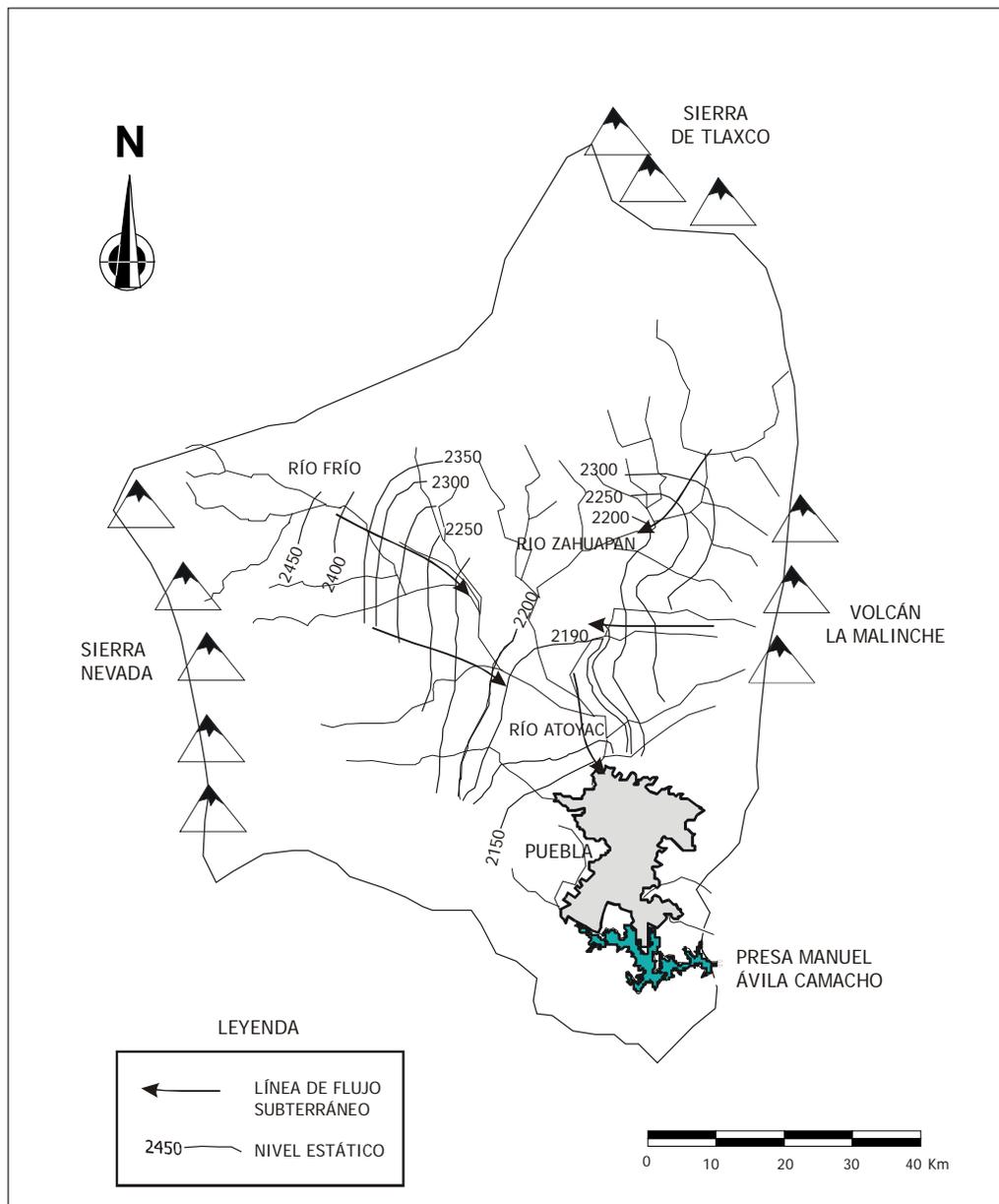


Figura 2.22. Niveles estáticos del año 1973. Se puede observar que la dirección del flujo subterráneo es muy aproximada a la dirección del flujo superficial (Modificado de Jiménez 1999a).

La configuración de niveles estáticos para el año 1980, que se observa en la figura 2.23; al compararla con las curvas de 1973, no se notan grandes cambios, las áreas de recarga son las mismas y aún no se aprecian variaciones significantes en los niveles estáticos.

Los niveles estáticos del año 1996, figura 2.24, muestran las mismas zonas de recarga y direcciones de flujo similar a las anteriores; sin embargo, es muy notable el descenso de niveles en la zona urbana de Puebla, que presenta abatimientos entre 20 y 40 m, y un poco más hacia el sur, alcanzan los valores máximos con 60 m y hasta 80 m.

Por lo tanto, las zonas de recarga para los tres estudios mencionados son las mismas, estas se pueden apreciar en la figura 2.21 descrita anteriormente.

Como consecuencia de este descenso de niveles, se ha presentado en la ciudad de Puebla y lugares cercanos a ella, la presencia de agua con altos contenidos de sulfato, que proviene de un acuífero que subyace al acuífero de agua de buena calidad; el uso que se da a esta agua, en algunos casos, es el recreativo; sin embargo, algunos de los pozos que abastecían a la población, han sido clausurados por aportar agua de mala calidad, con concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) de hasta 2500 mg/L (CNA 1990-1993). Cabe hacer mención que la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano, establece como límite máximo permisible concentraciones de 1000 mg/L para STD y 400 mg/L para sulfatos, valores idénticos a los que aparecen en las Normas de la Organización Mundial de Salud, para la calidad de agua potable.

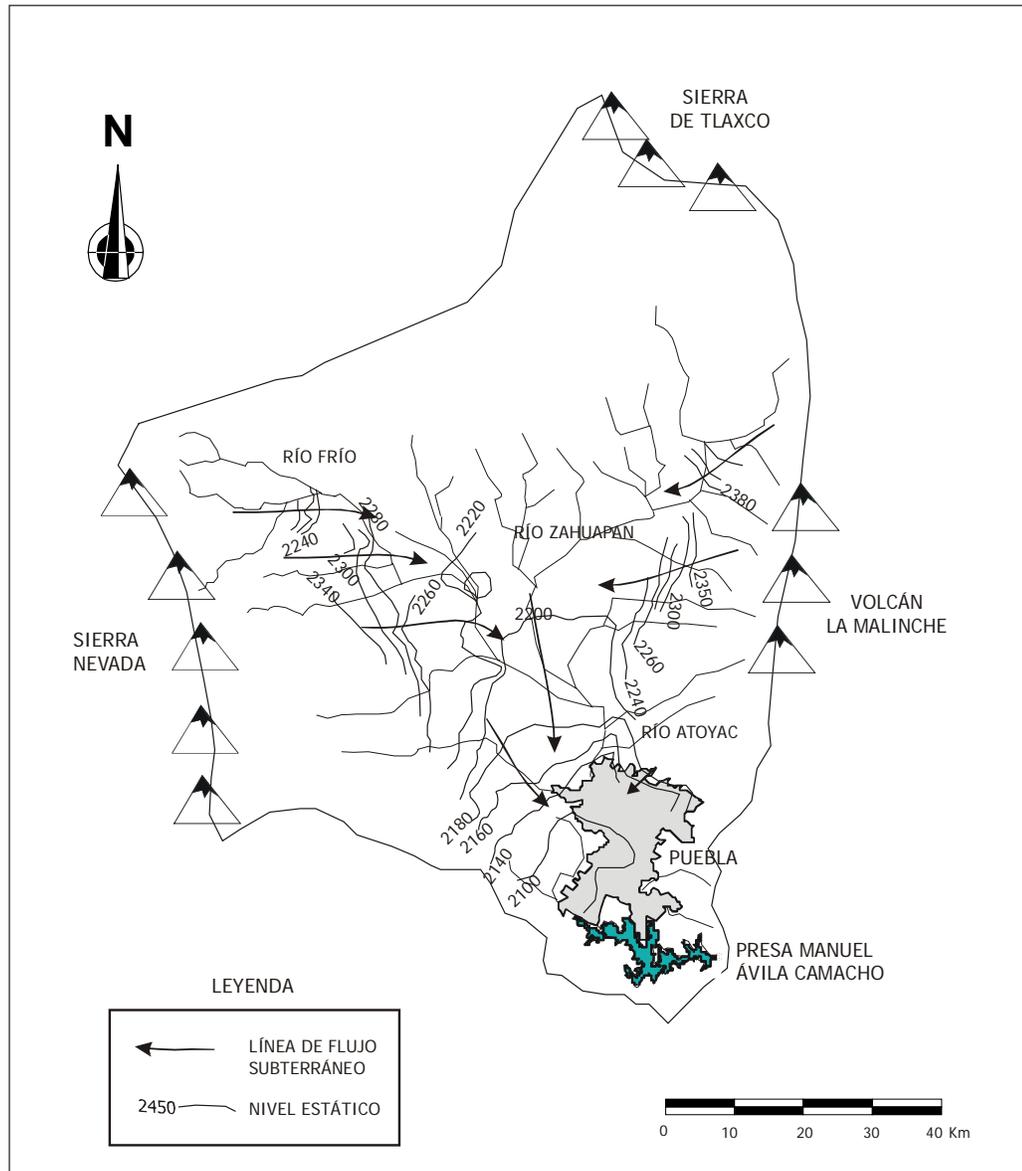


Figura 2.23. Niveles estáticos para el año 1980. La dirección del flujo subterráneo, se mantiene y aún no se observan grandes abatimientos (Modificado de Jiménez 1999a).

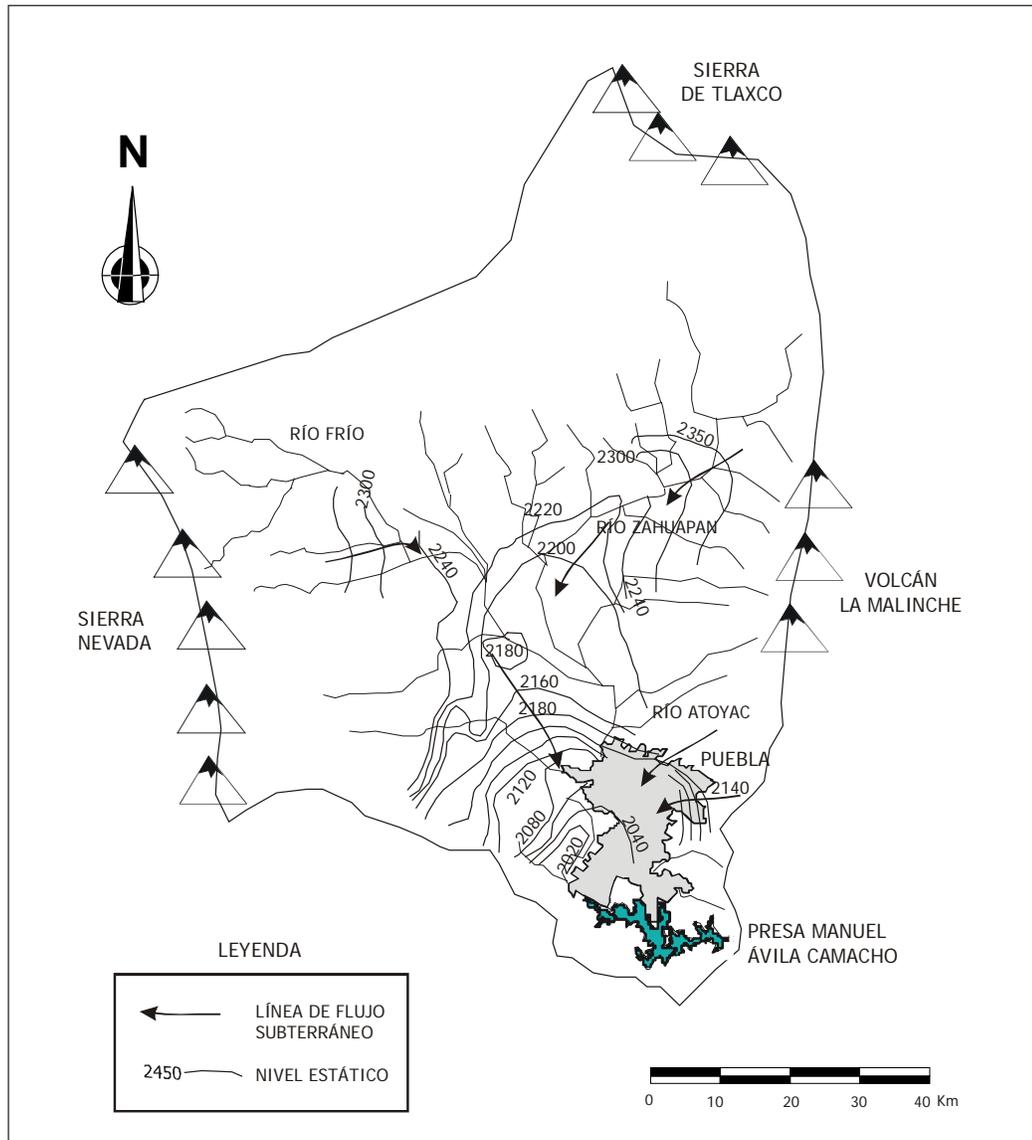


Figura 2.24. Niveles estáticos para el año 1996. La dirección de flujo subterráneo es similar a la de los años 1973 y 1980; no así los niveles estáticos que presentan un notable abatimiento, sobre todo en la ciudad de Puebla (Modificado de Jiménez, 1999a).

2.6 Otros estudios realizados en la zona del Valle de Puebla

Es a raíz del aumento de obtención de agua con elevadas concentraciones de sulfato en algunos pozos de la ciudad de Puebla, y los primeros síntomas de abatimiento de los niveles estáticos, que se comienzan a realizar estudios en la zona.

Aunque la información es escasa y en la mayoría de los casos incompleta, se mencionan algunos estudios que la compañía Geotecnología, S. A. recopila en un informe realizado en 1997 para el Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del estado de Puebla.

- En 1981 por primera vez se hace un estudio que consideró los aspectos hidrogeoquímicos regionales. No se reportaron las conclusiones alcanzadas, sólo que el agua del acuífero superior no era de tan buena calidad como se suponía.
- En el estudio realizado en 1982, se menciona la presencia de un acuífero de aguas sulfatadas, detectado principalmente en la porción occidental de la ciudad de Puebla.
- En 1989, la compañía Lesser y Asociados realiza un estudio que hace la distinción entre dos acuíferos dentro del valle, el primero con aguas de relativa buena calidad, el segundo, con agua sulfatada.
- En un estudio realizado en 1990, se reportan las características de los diferentes tipos de agua en el valle, encontrándose las siguientes.

Zona 1 (Sierra Nevada), define un dominio cálcico-magnésico.

Zona 2 (La Malinche), presenta agua de reciente infiltración con un incremento de calcio.

Zona 3 (valle Norte), se presentan dos tipos ligeramente diferentes, uno del tipo cálcico con bajos porcentajes de sodio y un contenido menor de

bicarbonatos, todo esto asociado con materiales lacustres. El otro, más al sur, con un mayor contenido de sodio.

Zona 4 (valle Sur), presenta una caracterización similar a la de Sierra Nevada, por ser esta la que aporta el mayor volumen de agua.

Concluyen que las aguas subterráneas del valle de Puebla son de tipo bicarbonatada-cálcica-magnésica, producto de un dominio lacustre, rico en materiales arcillosos, calcáreos y volcánicos.

El informe de Geotecnología, S. A., confirma que la degradación de la calidad del acuífero superior, obedece a un proceso evolutivo que se manifiesta lenta y gradualmente, especialmente en los contenidos de dureza total y sólidos totales disueltos.

Otros estudios son los efectuados por:

La Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal de Puebla, realizó durante los años 1990, 1992 y 1993 estudios de calidad del agua en varios pozos de la ciudad de Puebla. Los resultados de sulfuros, los graficó, obteniendo dos representaciones de curvas de isoconcentraciones para el año 1990 y 1992-1993 respectivamente. En la figura 2.25 se aprecia que en 1990 el sulfuro se distribuye en la zona Noroeste de la ciudad, las máximas concentraciones se localizan en la parte Norte de ahí se extiende hacia el Sur, se observa también una ligera tendencia de crecimiento hacia el Este con menor concentración; la máxima concentración obtenida durante ese año fue de 9.0 mg/L de sulfuro. En los años de 1992-1993, la máxima concentración promedio de sulfuro fue de 11.0 mg/L, como se aprecia en la figura 2.26, el área correspondiente creció de manera significativa desde el Noroeste hasta la parte central de la ciudad, la tendencia de crecimiento en el sentido Este abarcó más territorio, lo que hace evidente el aumento de la contaminación en las aguas subterráneas del sistema acuífero.

El organismo regulador de agua potable en la ciudad SOAPAP, realizó durante los años 1998 y 1999 el monitoreo de sulfatos y sulfuros de algunos sitios dentro de la ciudad de Puebla.

Los datos obtenidos para sulfatos y sulfuros en los dos estudios anteriores, se resumen en las tablas 2.1 y 2.2 respectivamente, son sólo informativos ya que no se ve claramente la tendencia hacia el aumento en las concentraciones como en las gráficas para sulfuros.

Tabla 2.1. *Concentración de sulfatos para varios pozos y diferentes años.*

NOMBRE DEL SITIO	CONCENTRACIÓN DE SULFATOS (SO ₄ ²⁻) mg/L			
	AÑOS			
	1990 ¹	1997 ²	1998 ²	1999 ²
AGUA AZUL		614.30	584.49	588.01
ANTIGUO BALNEARIO LA PAZ	593.42			
AMALUCAN				
C A P U	628.60	820.70	806.22	774.18
H. CROWN PLAZA			675.76	
BAÑOS PASEO BRAVO	433.35		559.32	
STANLEY	611.01			
C N I C	67.16			
RANCHO COLORADO	865.90	843.20	810.55	798.69

FUENTE:

1. Comisión Nacional de Agua, Gerencia Estatal de Puebla, Subgerencia de Administración del Agua. Laboratorio del Departamento de Calidad y Reutilización del Agua, 1990-1993.
2. Sistema de Agua Potable de Puebla (SOAPAP)

Tabla 2.2. Concentración de sulfuros para varios pozos y diferentes años.

NOMBRE DEL SITIO	CONCENTRACIÓN DE SULFUROS (S ²⁻) mg/L					
	AÑOS					
	1990 ¹	1992 ¹	1993 ¹	1997 ²	1998 ²	1999 ²
AGUA AZUL	6.80	9.22	12.80	6.34	6.93	
ANTIGUO BALNEARIO LA PAZ	1.20	8.83	11.60			
C A P U	2.60	8.45	10.80	11.10	10.00	
H. CROWN PLAZA					6.54	
BAÑOS PASEO BRAVO	5.00	1.15	8.00		4.62	
STANLEY	4.00	1.92	6.00			
RANCHO COLORADO	5.40	6.14	2.40	7.14	7.70	7.70
HOTEL DEL ALBA	2.6	6.8	8.4			

FUENTE:

1. Comisión Nacional de Agua, Gerencia Estatal de Puebla, Subgerencia de Administración del Agua. Laboratorio del Departamento de Calidad y Reutilización del Agua, 1990-1993.
2. Sistema de Agua Potable de Puebla (SOAPAP)

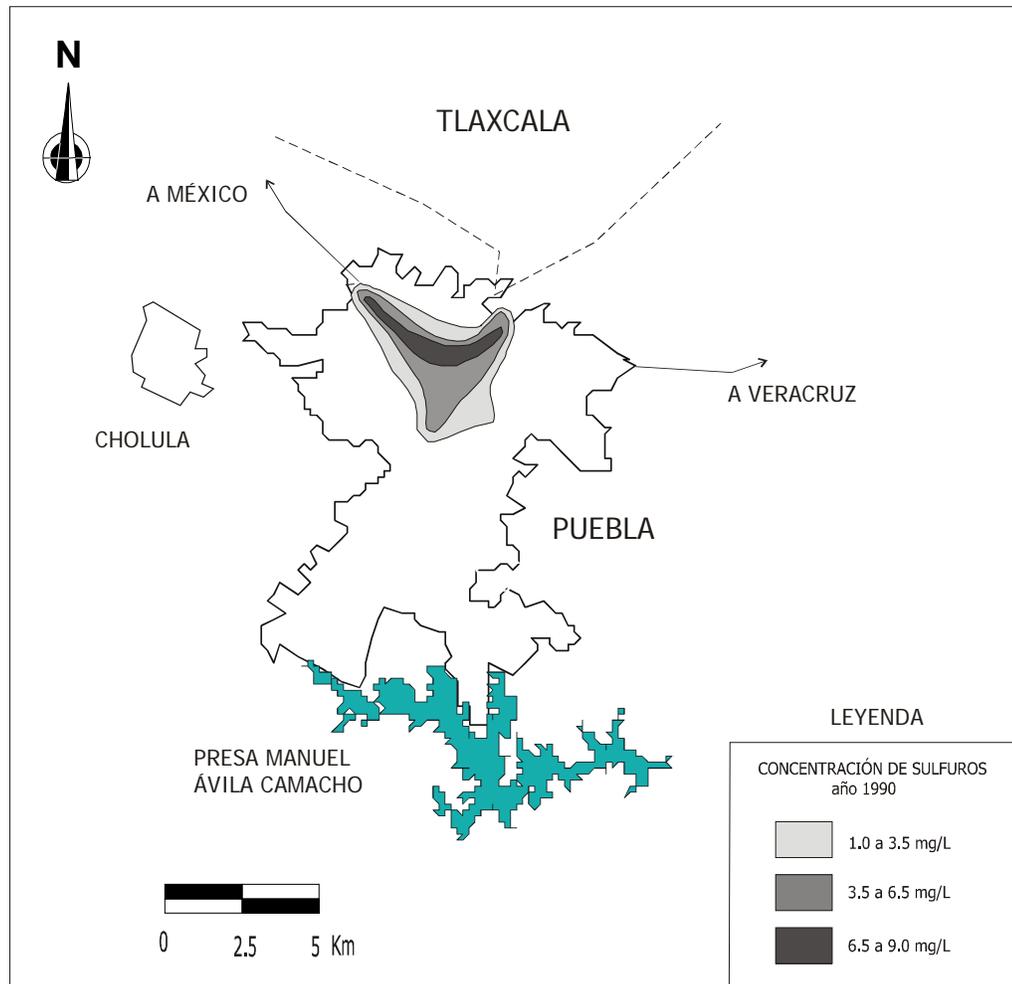


Figura 2.25. *Curvas de isoconcentraciones de sulfuros para el año 1990. La máxima concentración se presentó en la parte norte de la ciudad, la tendencia del aumento de sulfuros es hacia la zona centro y el Este. (Modificado de CNA 1990-1993)*

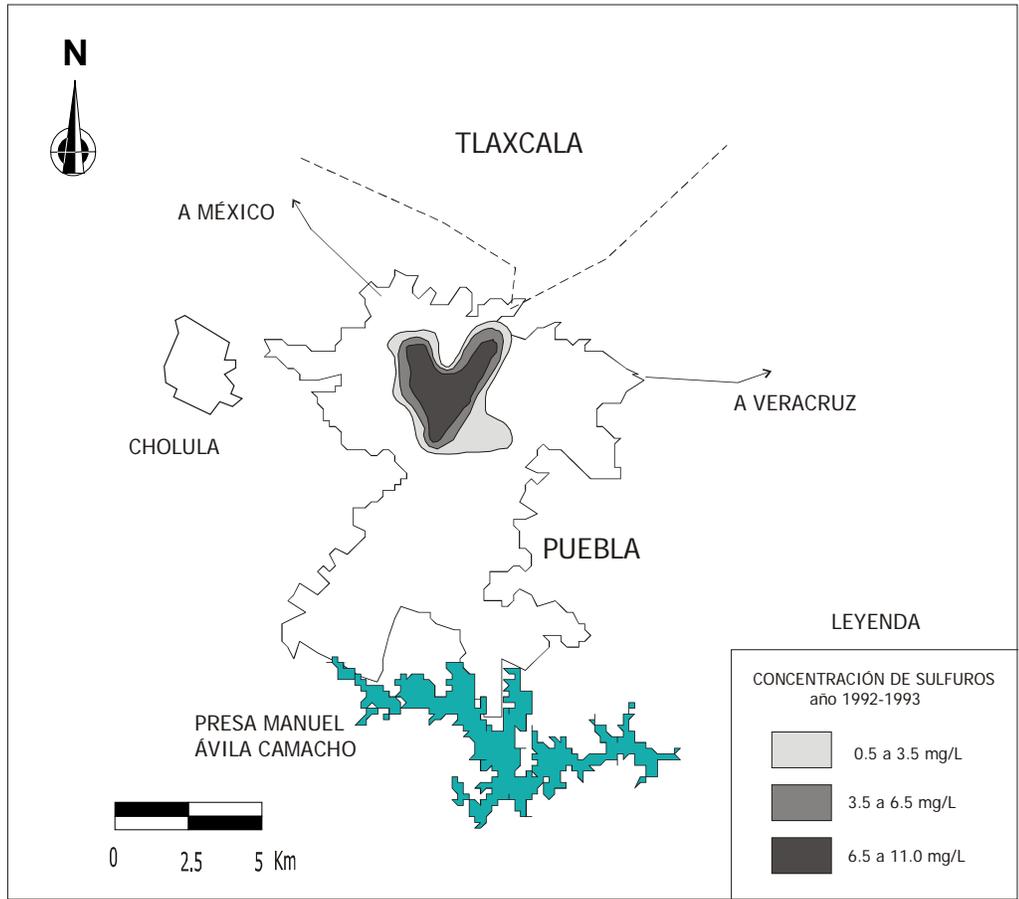


Figura 2.26. Curvas de isoconcentraciones de sulfuros para los años 1992-1993, la concentración ascendió hasta 11.0 mg/L, conservando la tendencia de crecimiento del Norte hacia el centro de la ciudad y cubriendo más territorio en la parte Este. (Modificado de CNA 1990-1993)

Capítulo III

SISTEMAS DE FLUJO EN ACUÍFEROS

3.1 Topografía y geología, factores que controlan el flujo subterráneo

Entender el movimiento del agua subterránea en una cuenca hidrogeológica es esencial para el tratamiento y solución de problemas hidrogeológicos. Sin embargo, este entendimiento sólo es posible cuando se conocen algunos aspectos fundamentales como: localización y extensión de las áreas de recarga y descarga, dirección y velocidad del flujo en cualquier punto dado de la cuenca, así como la profundidad de penetración de los sistemas de flujo involucrados. El movimiento de fluidos a través de medios porosos puede ser considerado como un fenómeno en estado estable o transitorio. Para el caso de flujo de agua subterránea a través de extensas cuencas, se asumen condiciones en estado estable, debido a que la cantidad de recarga es mucho menor que el volumen de fluido existente en el sistema.

En la figura 3.2 se observan las redes de flujo para dos secciones verticales idénticas en profundidad y extensión, en medios homogéneos e isótropos. En ambos casos se muestra la mitad de un valle con una ligera pendiente descendente hacia la izquierda y una planicie hacia la derecha.

En la figura 3.2 (a), la configuración del nivel del agua sigue la topografía y es el caso que uno encontraría en una planicie lacustre, por ejemplo. Mientras que para el caso de la figura 3.2 (b), la configuración sería un tanto sinuosa propia de terrenos glaciales o periglaciales.

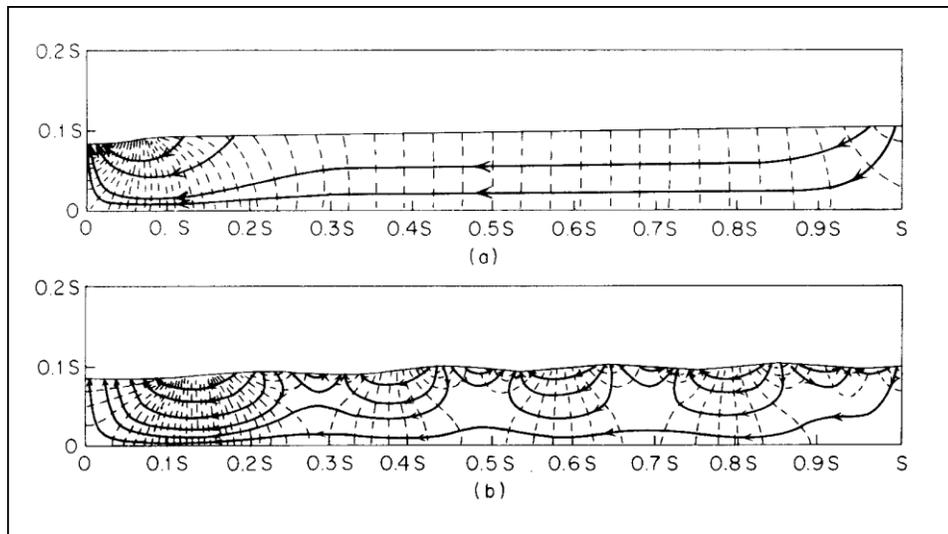


Figura 3.1. Efecto de la topografía sobre los patrones de flujo regionales del agua subterránea (Freeze y Witherspoon, 1967).

Tóth (1963), demostró que una pendiente suave del nivel del agua a través de un medio homogéneo permite la formación de flujo principalmente horizontal. La recarga está concentrada en las partes más altas de la cuenca y la descarga en el nivel del río o arroyo, como se aprecia en la figura 3.2.a. La existencia de una configuración ondulada del nivel del agua trae como resultado la formación de numerosas subcuencas, las cuales conforman una cuenca subterránea principal (figura 3.2.b). El agua que entra al sistema de flujo en un área de recarga dada puede ser descargada en el nivel topográfico más cercano o bien, puede ser transmitida a un área de descarga regional en el fondo del valle principal.

La geología es otro aspecto importante que afecta los sistemas de flujo subterráneo, como se muestra en la figura 3.3. La comparación de la figura 3.3.a y 3.3.b, muestra el efecto que

tiene sobre el flujo, la introducción de una capa a profundidad con una permeabilidad 10 veces mayor que las capas sobreyacentes. La formación inferior es una capa con flujo principalmente horizontal y que está siendo recargada por la capa superior. En ambientes sedimentarios es común encontrar cuerpos con forma lenticular con alta conductividad hidráulica (lentes arenosos, por ejemplo); la presencia de estos cuerpos, figura 3.3.d, provoca que se forme un área de descarga en la superficie superior adyacente al cuerpo conductivo.

En un sistema topográfico y geológico complejo como el de la figura 3.3.e, las dos líneas de flujo muestran cómo la diferencia de tan solo unos metros es suficiente para permitir la recarga en un sistema local y un sistema regional. Si es incrementado el contraste en la conductividad hidráulica, figura 3.3.b, se incrementan los gradientes verticales en la capa superior y disminuyen considerablemente los gradientes en la capa inferior. Para un terreno irregular, figura 3.3c, la presencia de una capa altamente conductora permite que el flujo del sistema local se transforme en flujo de sistema regional. Condiciones de este tipo abren la posibilidad que existan sistemas regionales plenamente desarrollados bajo condiciones de una alta disección de relieve.

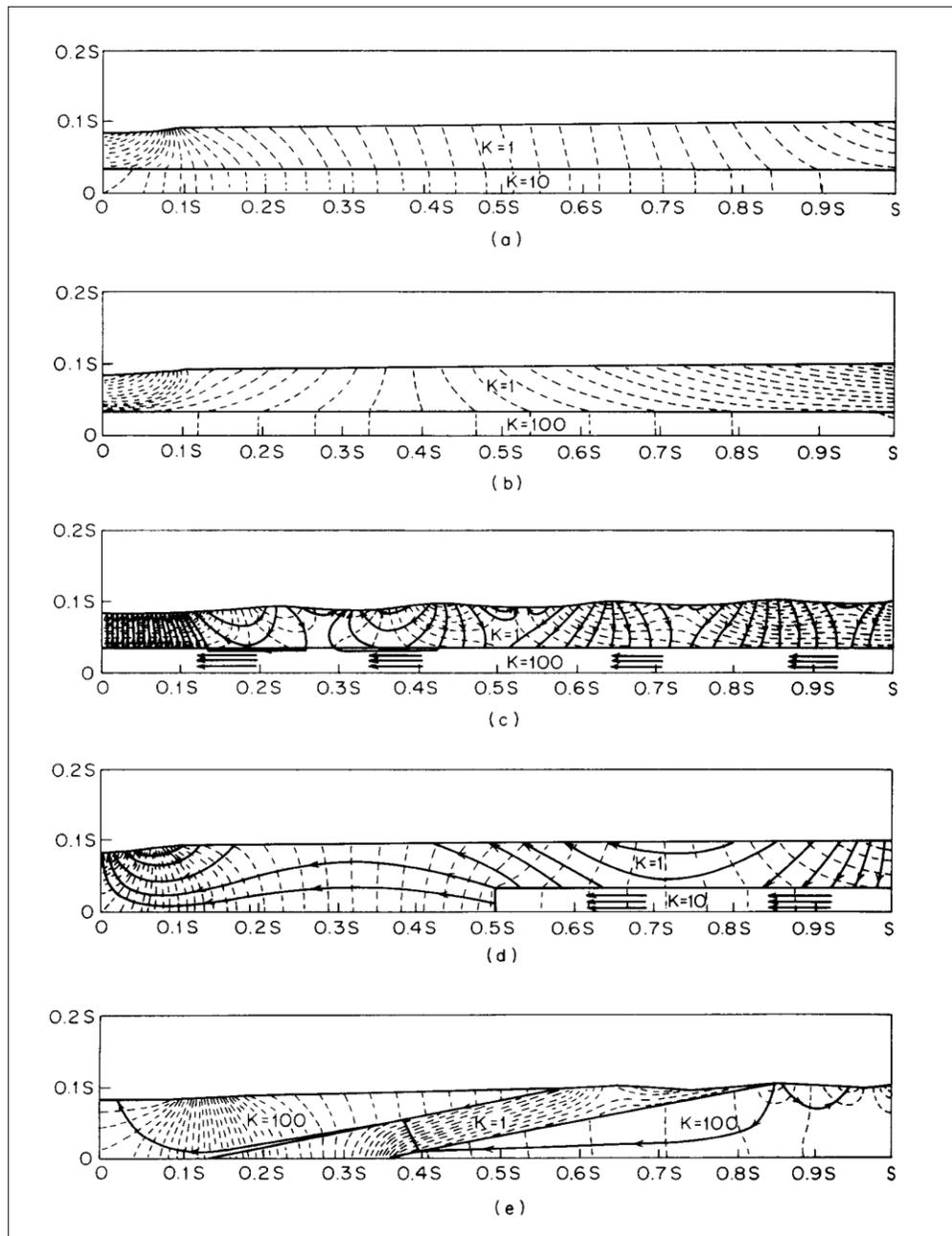


Figura 3.2. Efecto de la geología sobre los patrones de flujo regional del agua subterránea para diferentes casos, (a) relieve suave con una capa 10 veces más permeable que la superior; (b) relieve suave con una capa dos órdenes de magnitud más permeable que la superior; (c) relieve sinuoso con una capa 100 veces más permeable que la superior; (d) relieve suave con una capa profunda más permeable que se distribuye solo en la primera mitad de la sección; (e) relieve suave con materiales permeables atravesados por un estrato inclinado de menor permeabilidad. K representa la permeabilidad de la capa (modificado de Freeze y Witherspoon, 1967).

3.2 *Procesos químicos*

La relación entre la química del agua subterránea y los sistemas de flujo puede ser considerada en dos formas: diferencias químicas entre los tipos de sistemas de flujo y cambios químicos dentro de los sistemas de flujo. La composición química del agua subterránea está en función de la mineralogía del acuífero y la velocidad con la cual el agua se mueve a través del sistema. El agua subterránea se mueve a través del medio geológico e interactúa con diferentes minerales de las rocas disolviéndolos y cambiando entonces su composición química. Chebotarev (1955) reconoció que en los grandes sistemas de flujo, el agua subterránea tiende a evolucionar hacia una solución más concentrada similar a la composición del agua marina. Estos cambios sistemáticos en los contenidos iónicos han llegado a ser conocidos como la secuencia de Chebotarev (1955). En la dirección del flujo, desde el área de recarga, la secuencia puede ser como sigue:



Esta secuencia puede continuar hasta el final del proceso, si están presentes en las rocas minerales que contengan sulfato y cloruro, esto generalmente es válido para grandes sistemas de flujo en cuencas que contengan secuencias evaporíticas

Los sistemas de flujo local presentan una mayor movilidad que disuelve con mayor rapidez las sales minerales del acuífero, pero tienen trayectorias hacia los sitios de descarga relativamente cortas, por lo que su composición química podría no evolucionar hacia la fase sulfatada y quedar como agua bicarbonatada. Por otro lado, la velocidad del flujo es cada vez más lenta con la profundidad, por lo que los sistemas regionales e intermedios pueden evolucionar en facies de sulfato o cloruro, dependiendo de la disponibilidad de minerales evaporíticos en la secuencia sedimentaria. Debido a la lenta circulación del agua subterránea, particularmente en los sistemas de flujo regional, las sales son disueltas lentamente y persisten por miles o millones de años. En grandes cuencas, las salmueras pueden contener remanentes del agua marina originalmente presente en el ambiente depositacional, modificada por disolución de minerales evaporíticos y otros procesos.

Además de los cambios aniónicos ya descritos por Chebotarev, ocurren cambios en las propiedades fisicoquímicas del agua subterránea, a medida que transita por la cuenca se aprecia un incremento en: la temperatura, la conductividad eléctrica, los sólidos totales disueltos; disminuye el contenido de oxígeno disuelto y por consecuencia el potencial de oxidación.

3.3 Distribución del flujo del agua subterránea

Los sistemas individuales de flujo del agua subterránea pueden ser comparados con bandas transportadoras, con sus regiones fuentes vistas como áreas de movilización y carga, y sus regiones terminales como áreas de descarga y depositación. Los segmentos intermedios actúan principalmente como ambientes estables de transferencia de masa y energía.

En la figura 3.4 se presentan esquemáticamente las distribuciones de flujo del agua subterránea y algunas condiciones hidrogeológicas típicas y fenómenos naturales asociados con un ambiente de flujo por gravedad. La figura muestra una cuenca idealizada con un sistema de flujo simple en un lado y un sistema con topografía sinuosa con flujo local, intermedio y regional. Cada sistema de flujo, independientemente de su posición jerárquica, tiene un área de origen o recarga, un área de tránsito o transferencia y una de terminación o descarga.

En las áreas de recarga, las cargas hidráulicas representando la energía mecánica del agua, son relativamente altas y decrecen al aumentar la profundidad; el flujo de agua es hacia abajo y divergente. En las áreas de descarga, se revierten la energía y las condiciones de flujo; las cargas hidráulicas son bajas y se incrementan a profundidad, dando como resultado flujo convergente y ascendente. En las áreas de transferencia, la energía mecánica del agua se mantiene prácticamente constante con la profundidad (las equipotenciales son casi verticales) y, por lo tanto el flujo es casi horizontal. Los sistemas de flujo operan como bandas transportadoras e interactúan con su medio, la interacción produce efectos ambientales in-situ, sirviendo el flujo como un mecanismo para la movilización, transporte (distribución) y acumulación.

Los efectos ambientales típicos y las condiciones resultantes de la acción del movimiento del agua subterránea en cuencas con flujo por gravedad se ilustran en la figura 3.4 e incluyen:

- Cargas hidráulicas sub, normal y super-hidrostáticas en la dirección del flujo desde las áreas de recarga a áreas de descarga, respectivamente.
- Condiciones relativas de humedad en suelos en las áreas de recarga (balance hidrológico negativo) y en las áreas de descarga excedentes de agua (balance hidrológico positivo), posiblemente dando como resultado la formación de humedales; estas condiciones son expresadas en comparación con el balance de agua promedio en la cuenca, que podrían resultar simplemente de los fenómenos de precipitación y evapotranspiración.
- Cambios sistemáticos en las facies aniónicas del agua, de HCO_3^- a Cl^- pasando por SO_4^{2-} , a lo largo de los sistemas de flujo y con la profundidad.
- En las áreas de recarga, se puede presentar la lixiviación química de suelos y rocas superficiales y el incremento en los contenidos de sales o ensalitramiento de suelos (incluso la depositación de sales de valor comercial) en las áreas de descarga.
- Ciénegas salinas en localidades donde coinciden los humedales y el aporte de sales.
- Anomalías negativas y positivas en el gradiente geotérmico en las áreas de descenso y ascenso de flujos, respectivamente.
- Condiciones químicas de oxidación y reducción en áreas superficiales de las zonas de recarga y descarga, respectivamente.
- Una respuesta notable en el tipo y calidad de la cubierta vegetativa debido a las contrastantes condiciones de nutrientes y humedad, generadas por el

ingreso y salida de agua en los extremos del sistema (presencia de xerofitas y freatofitas).

- Incremento de la vulnerabilidad a deslizamiento de suelos o de rocas, debido al incremento en la presión de poro y al papel del agua como lubricante en los planos de falla.
- Acumulación de minerales transportados como iones metálicos (uranio, sulfuros) y contaminantes antropogénicos, principalmente en zonas de convergencia de flujos.

Manifestaciones tan diversas como las anteriores son posibles de encontrarse en cuencas de considerable extensión y el elemento clave de tal diversidad es el flujo subterráneo que actúa en un amplio espectro de espacio y tiempo. Debido a esta característica de diversidad en condiciones, con diferentes materiales reactivos, diferentes procesos y diferentes velocidades de flujo prevalecientes en diferentes lugares y profundidades del régimen hidráulico, los productos de interacción entre el agua y su ambiente son también muy diferentes. Sin embargo, todos estos fenómenos son generados simultáneamente y por el mismo agente: el flujo del agua subterránea.

El estudio de la heterogeneidad del medio geológico es fundamental para el análisis de los sistemas de flujo y el transporte de contaminantes, pues ambos son controlados por la presencia de zonas de alta permeabilidad y la existencia de fallas que pueden actuar en forma ambivalente, como barreras o conductoras para el flujo y el transporte (MacFarlane et al., 1994; Bjørlykke, 1996; Navarro, 2005).

La movilización de agua recargada recientemente y encontrada en unidades hidroestratigráficas profundas, tiene importantes implicaciones sobre el papel que juegan las fracturas en la evaluación de los recursos hidráulicos a largo plazo y en la protección del agua subterránea a la contaminación.

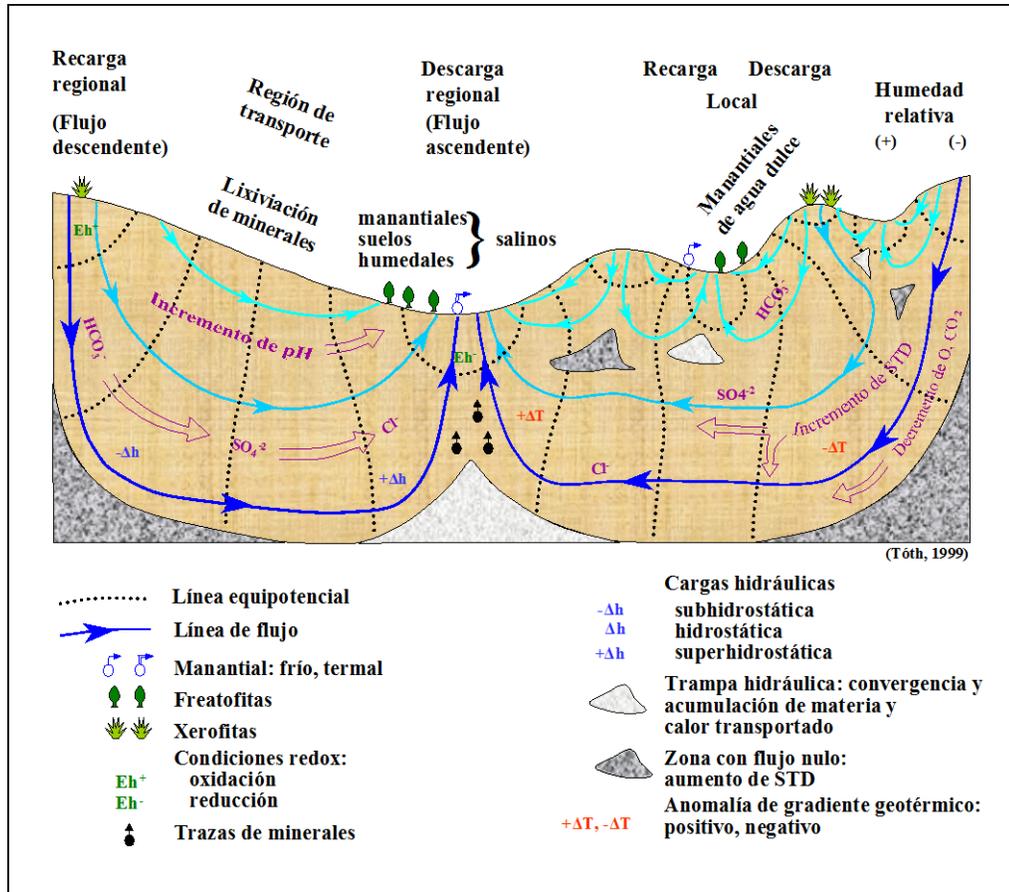


Figura 3.3. Distribuciones de flujo controlado por gravedad en una cuenca regional no confinada (Tóth, 1999).

3.4 *Introducción a los isótopos ambientales*

Una característica importante de los isótopos es que los isótopos de un elemento, reaccionan químicamente de la misma manera. Por ejemplo, las variaciones de isótopos de sulfuro (^{32}S , ^{34}S , ^{36}S) en el ion sulfato no afectarán la forma en que el ion sulfato se mueve con el agua (Davis et al. 1996; Navarro, 2005).

Los isótopos más abundantes en el ambiente son los del Hidrógeno (H), Carbono (C), Nitrógeno (N), Oxígeno (O) y Azufre (S) (Fritz, 1997).

Debido a la dificultad de medir cantidades o concentraciones reales de isótopos en una muestra, se emplean relaciones del isótopo más abundante de un elemento dado con respecto a un estándar cuya relación entre los dos isótopos más abundantes sea conocida. El instrumento usado para medir esa relación es un espectrómetro de masas. En la práctica, cada laboratorio tiene sus propios estándares contra los que se comparan la relación de la muestra. La diferencia de relaciones entre la muestra y el estándar con que se trabaja son corregidos, obteniéndose una diferencia relativa para el estándar internacional (Kehew, 2001).

3.5 *Isótopos del hidrógeno y oxígeno*

Los dos isótopos estables del hidrógeno ^1H y ^2H y los tres isótopos estables del oxígeno ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O forman parte de la molécula de agua, los análisis de sus concentraciones han sido usados ampliamente para entender el movimiento del agua subterránea (Davis et al, 1996).

La composición isotópica del agua es expresada por comparación con la composición isotópica del agua del océano. Para este propósito se seleccionó una muestra de agua de océano llamada Standard Mean Ocean Water, abreviado como SMOW (Mazor, 1991). Sus unidades son $\delta^{\square}\text{‰}$ a partir del estándar SMOW y se representa por $\delta^2\text{H}$ para el deuterio y $\delta^{18}\text{O}$ para ^{18}O .

El agua con menos deuterio que la SMOW tiene un valor negativo de $\delta^2\text{H}$ y el agua con más deuterio que la SMOW, tiene valores positivos de $\delta^2\text{H}$ (Mazor, 1991).

Las moléculas de agua isotópicamente ligeras, se evaporan más rápidamente que las pesadas, a medida que del agua se evaporan moléculas ligeras, van quedando las moléculas pesadas sin evaporar, esto hace que el aire que está en contacto con el agua se enriquezca de moléculas ligeras, lo que se refleja en valores relativamente negativos al calcular $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. En contraste, los valores calculados para el agua que aún no se evapora, serán más positivos (Mazor, 1991).

3.5.1 Línea global de agua meteórica

Considerando la complejidad del ciclo hidrológico, puede ser sorprendente que los valores de ^{18}O y ^2H sean predecibles. En 1961, Harmon Craig descubrió que los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en aguas naturales se correlacionan a escala global. La “línea global de agua meteórica mundial” de Craig, define la relación entre ^{18}O y ^2H de las aguas naturales alrededor del mundo, está expresada por la ecuación

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10^\circ / \text{SMOW}$$

La importancia de la observación de Craig es que el comportamiento de la composición isotópica de las aguas meteóricas se puede predecir. La línea de Craig es una aplicación global, y es actualmente una aproximación de muchas líneas meteóricas locales o regionales, las que difieren de la línea global debido a la variación de los parámetros climáticos y geográficos. Las líneas locales diferirán de la global tanto en la pendiente como en el punto de intersección del deuterio. El trabajo de Craig es quizá el más citado en los isótopos ambientales en la hidrología por proveer una referencia para interpretar el origen de las aguas subterráneas (Fritz et al., 1997).

Una observación hecha por Craig, y que se muestra en la figura 3.4, es que las aguas empobrecidas isotópicamente están asociadas con regiones frías y las aguas enriquecidas, son encontradas en regiones calientes (Fritz et al., 1997). La composición de la precipitación depende de la temperatura a la cual el agua del océano fue evaporada dentro del aire y aún más importante es la temperatura de condensación a la que se formaron las nubes y la lluvia.

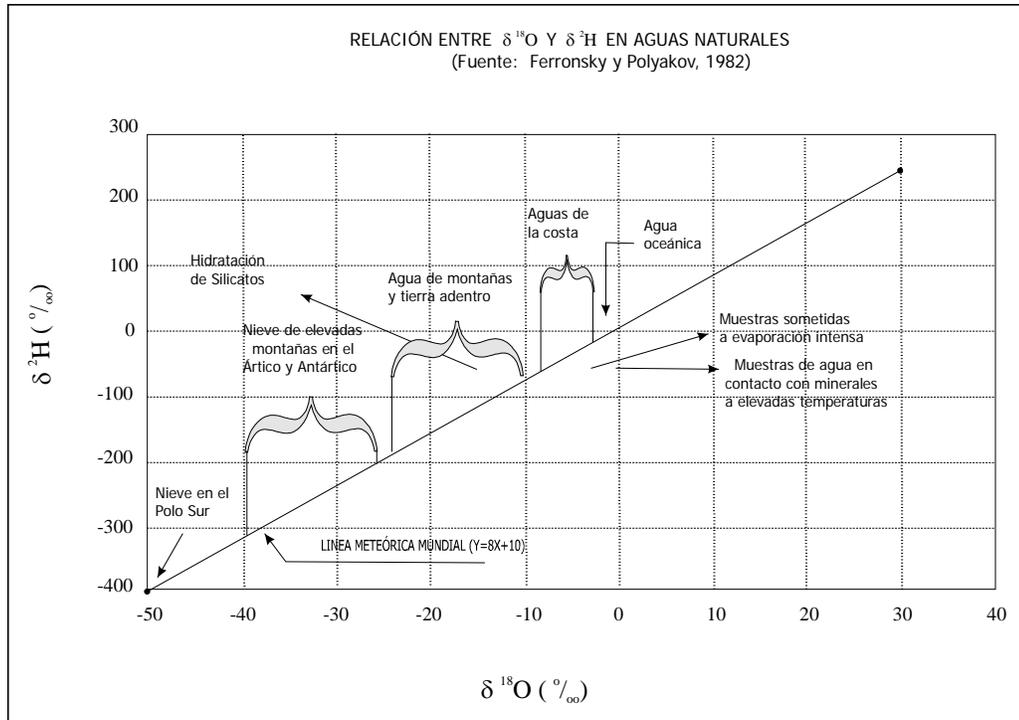


Figura 3.4. La Línea Meteorológica Mundial Global es una línea de referencia útil para entender mejor el movimiento del agua en sus diferentes fases a través del Ciclo Hidrológico.

3.5.2 Efectos locales sobre la temperatura y $\delta^{18}\text{O}$

Efecto de la altitud. En algunas regiones con poco relieve, puede ocurrir precipitación orográfica como masas de vapor elevadas sobre el terreno y al enfriarse por expansión, viene la lluvia. En altitudes mayores donde el promedio de temperatura es bajo, la precipitación es isotópicamente pobre. Para ^{18}O , su disminución varía entre aproximadamente -0.15 a -0.5 ‰ por 100 m de elevación en la altitud, con un decremento correspondiente entre -1 y -4 ‰ para ^2H (Fritz et al, 1997). La presión de vapor del agua que contiene ^{18}O (H_2^{18}O) difiere de la presión de vapor del agua que contiene ^2H (^2HHO) y en ambas es menor que la presión de vapor del agua (H_2O).

En áreas con fuerte relieve, los contenidos de ^2H y ^{18}O pueden indicar la elevación a la cual se da la recarga; ya que a medida que las masas de aire se mueven sobre las montañas, se van enfriando y el contenido de ^2H y ^{18}O va disminuyendo.

Efectos estacionales. La amplitud de las variaciones estacionales en la temperatura, se incrementan con la continentalidad del sitio. Las temperaturas extremas de las estaciones, generan fuertes variaciones estacionales en los isótopos de la precipitación. Estas variaciones en ^{18}O y ^2H , proveen una importante herramienta para determinar las tasas de la circulación del agua subterránea, la respuesta de la cuenca a la precipitación, y el tiempo que dura el año cuando ocurre la mayoría de recarga (Fritz et al, 1997).

Condensación de niebla costera. La precipitación puede ocurrir por condensación de niebla sobre el terreno (precipitación oculta), y puede ser una importante fuente de recarga en algunas regiones áridas. Los valores de ^{18}O y ^2H son muy cercanos a los del agua de mar (Fritz et al, 1997).

La composición isotópica del agua subterránea depende de una serie de procesos complejos, comenzando con la evaporación desde los océanos y siguiendo con movimientos de vapor en masas de aire sobre los continentes con fases de condensación, precipitación y movimiento a través de la zona vadosa durante la recarga. El primer paso en esta serie de eventos es la evaporación, que depende de la temperatura. Como resultado, la mayoría de agua en la atmósfera se derivó de la evaporación sobre los mares subtropicales (Kehew, 2001).

Por lo tanto, la determinación de ^2H y ^{18}O proporciona información sobre la historia del agua desde su evaporación en el mar, si se precipitó cerca o lejos de la costa, si sufrió procesos de reevaporación-precipitación, y si estuvo sometida a condiciones de presión y temperatura que permitieran el intercambio isotópico con los materiales del medio.

3.5.3 Mezcla de aguas subterráneas

Los métodos isotópicos pueden ser usados para cuantificar la mezcla de aguas subterráneas a escala local y de cuenca, en las mezclas de agua subterránea puede ocurrir que el origen de la recarga sea diferente para cada agua, que provenga de diferente acuífero o de diferentes sistemas de flujo (Fritz et al, 1997). Un dato importante es que los isótopos ^2H y ^{18}O son conservativos en la mezcla de aguas, a diferencia de los solutos por las reacciones geoquímicas que se llevan a cabo.

3.5.4 Sistemas de alta temperatura

Las aguas geotermales fueron en el pasado consideradas como fluidos derivados del magma que encontraron su camino hacia la superficie terrestre, la hidrología isotópica ha demostrado que son fluidos principalmente meteóricos. Su identificación e interacción con las rocas, pueden ser observadas sistemáticamente a través de los isótopos ^2H y ^{18}O . La figura 3.5 muestra intervalos de valores para $\delta^{18}\text{O}$, dado que las altas concentraciones de oxígeno en las rocas, son comparadas con las del fluido en el reservorio, el fluido toma la característica de $\delta^{18}\text{O}$ de la composición de la roca. En la figura 3.6 se presentan los intervalos de valores para $\delta^2\text{H}$ en los principales reservorios de hidrógeno; ambas fueron modificadas de Environmental Isotopes in Hydrogeology (Fritz et al, 1997).

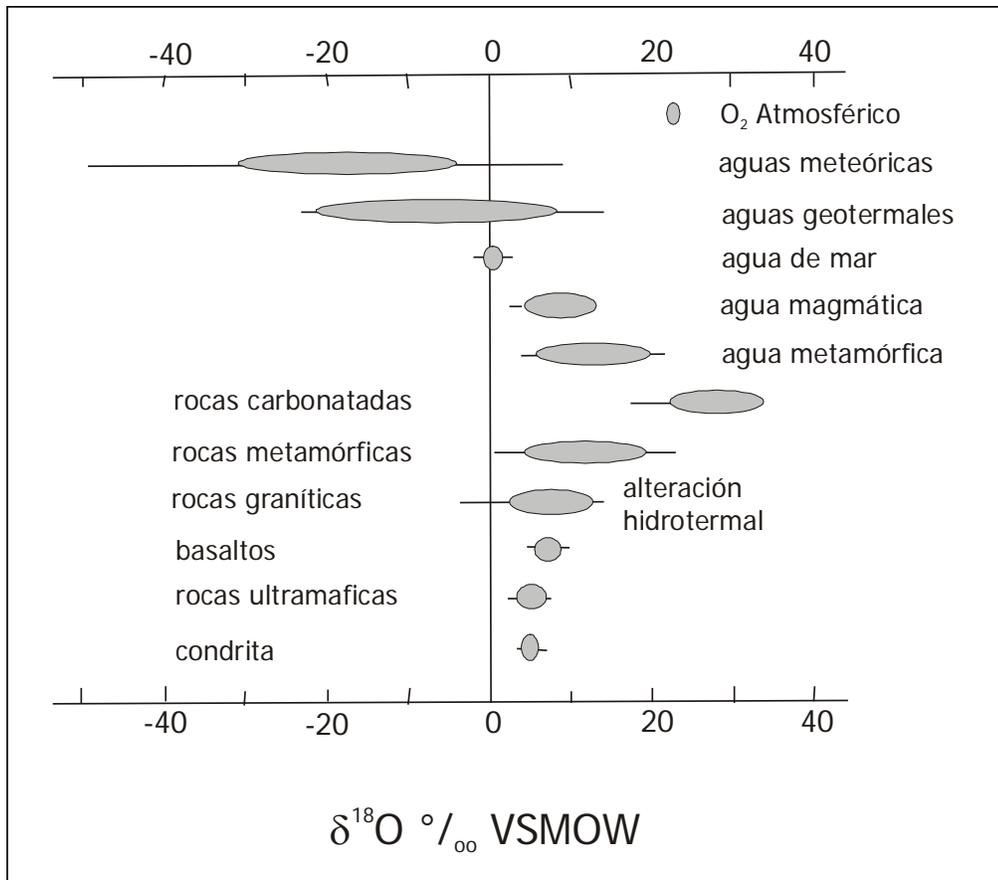


Figura 3.5. Intervalos de valores para $\delta^{18}\text{O}$ en varios tipos de rocas y aguas. La condrita es un meteorito rocoso y las rocas ultramáficas son una subdivisión de las rocas ígneas, un ejemplo es la peridotita (Modificado de Fritz et al., 1997).

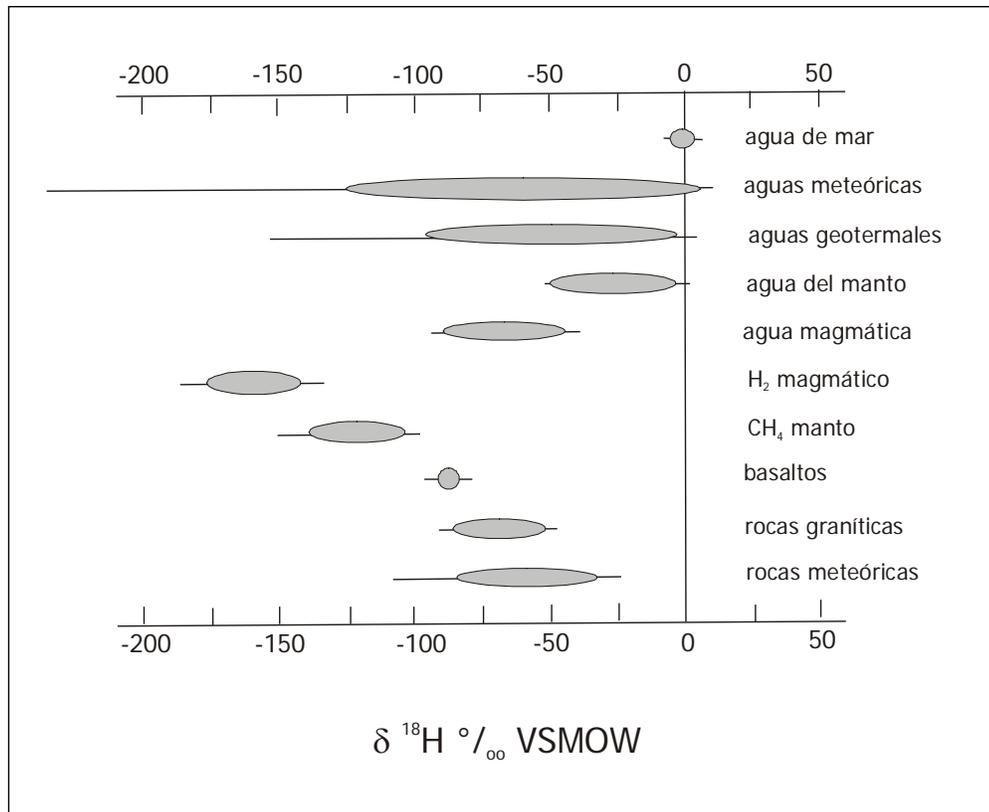


Figura 3.6. Intervalos de valores para δ^2H en los principales reservorios de hidrógeno. El contenido de δ^2H en las rocas es muy pequeño, tanto que los feldespatos y basaltos tienen una cantidad insignificante de hidrógeno (Modificado de Fritz et al., 1997).

3.6 *Isótopos del Azufre*

El azufre es el noveno elemento más abundante del universo no así en la corteza terrestre, sin embargo, es muy accesible porque existe de manera común en la naturaleza. Tiene cuatro isótopos estables ^{32}S (95.02%), ^{33}S (0.75%), ^{34}S (4.21%), y ^{36}S (0.02%). Las composiciones de los isótopos estables son referidas como la razón de $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ en ‰ relativa al estándar VCDT (Vienna Canyon Diablo Troilite). El rango terrestre general es de +50 a -50‰, con valores raros más altos o más bajos. El valor de $\delta^{34}\text{S}$ en el océano es de +21‰, pero ha variado desde aproximadamente +10 (inicio del Mesozoico) a +30 (inicio del Paleozoico). Las variaciones en los valores de $\delta^{34}\text{S}$ son causadas por dos tipos de procesos: la reducción de sulfato a sulfuro por bacterias anaerobias que producen un aumento en el ^{34}S del sulfato residual, y varios tipos de reacciones de intercambio que producen ^{34}S concentrándose en el compuesto con estado de oxidación más alto de S (Kendall et al. 1998). La figura 3.7 muestra los rangos de $\delta^{34}\text{S}$ para el azufre y algunos compuestos en diferentes materiales y ambientes; modificada de Environmental Isotopes in hidrogeology (Fritz et al, 1997), el azufre asociado con rocas ígneas, derivadas de la corteza, es isotópicamente similar al de los meteoritos y tiene valores de $\delta^{34}\text{S}$ cercanos a 0 ‰, mientras que el sulfato de calcio del Paleozoico reciente es el más enriquecido y la pirita biogénica, es la más pobre.

El uso principal de isótopos de azufre ha sido para entender la formación de depósitos minerales de sulfuro, que se pueden originar en ambientes sedimentarios o ígneos. El azufre asociado con procesos sedimentarios generalmente refleja la composición de sulfuro biogénico producido por reducción bacteriana de sulfato marino, y tiene valores negativos $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$. Por otro lado, el azufre asociado con rocas ígneas, derivadas de la corteza, es isotópicamente similar al de los meteoritos y tiene valores de $\delta^{34}\text{S}$ cercanos a 0 ‰; en petróleo, gas natural y carbón tiene valores de $-5 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < +10$, las evaporitas marinas (yeso, anhidrita) $+10 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < +30$, la reducción bacteriana presenta valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} > +20$ (Geyh, 2000).

Las principales fuentes de azufre en las aguas subterráneas son el sulfato de evaporitas, el sulfato disuelto en las aguas oceánicas y los sulfuros sedimentarios. Durante la evolución de la tierra, los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de las aguas oceánicas ha variado, y consecuentemente, el del sulfato de las evaporitas marinas, de +10 (Pérmico) a +35 (Cámbrico), como se ilustra en la figura 3.8. Las evaporitas marinas están constituidas por dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), halita (NaCl), silvina (KCl), carnalita ($\text{KCl}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Cl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$), bischofita ($\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$), anhidrita (CaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), kieserita ($\text{MgSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$), polihalita ($\text{K}_2\text{SO}_4\cdot \text{MgSO}_4\cdot 2\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cainita ($\text{KCl}\cdot \text{MgSO}_4\cdot 2,75\text{H}_2\text{O}$).

Las fuentes del azufre contenido en el sulfato disuelto de las aguas subterráneas puede ser debido a la contribución atmosférica ($-\langle \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} \rangle < +10$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4} < +10$), a la de rocas o minerales que puede tener sulfato de evaporitas fósiles y recientes ($+10 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < +30$), de fuentes marinas y playas ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} = +21$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4} < +9.5$), de aportaciones volcánicas y biológicas ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} \gg +20$) (Geyh, 2000).

Balderer (1991), hace una clasificación de $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ para las evaporitas marinas, las del Triásico Keuper $14 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < 17$, para el Triásico Bunter $9 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < 15$ y las del Triásico Muschelkal $16 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < 18$.

Las rocas volcánicas son particularmente enriquecidas en ^{34}S con valores $\delta^{34}\text{S}$ mayores a +20 reportados por Ueda y Sakai (1984). Se considera que este sobre enriquecimiento es producto principalmente de la recirculación de sulfato marino durante la subducción (Hoefs, 1997).

Andre, Franceschi, Pouchan y Atteia (2002), determinaron tres orígenes del sulfato en el acuífero de la cuenca Aquitaine, Francia: sulfato de evaporitas marinas ($+17.5 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < +20.4$), bioreducción de sulfato ($+33.18 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < +35.8$) y reducción de compuestos de sulfuro como la pirita ($-20.12 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < -0.40$).

El sulfato disuelto en el acuífero de Zechstein, Alemania; tiene dos orígenes: el de la disolución de evaporitas del Pérmico ($+9.6 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < +11.9$) y reducción bacteriana con un promedio de $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} = +39.1$ (Berner, Stüben, Leosson, Klinge, 2002).

En los valles de Cuatla y Yauatepec, México; se determinó como origen del sulfato disuelto de las aguas subterráneas, a evaporitas marinas del Cretácico con intervalos de $+15.4 < \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} < +16.8$, (Vázquez, Cortés, Palomera, Fritz, Aravena, 1989).

Como se ha visto, los compuestos de azufre de varias fuentes participan en la evolución geoquímica del agua subterránea y contribuyen a su salinización. Algunas aplicaciones de los isótopos del azufre se tienen en el origen de la salinidad en acuíferos costeros o en estratos sedimentarios, la circulación del azufre en cuencas agrícolas, la contaminación de aguas subterráneas por plumas de lixiviación de rellenos sanitarios, drenaje ácido de minas (Fritz et al, 1997).

El ciclo del azufre se puede resumir en función de las fuentes de sus compuestos: el sulfato tiene sus orígenes en la evaporación de minerales terrestres y oceánicos; la oxidación de minerales u organismos sulfurosos; precipitación atmosférica de aerosoles derivados del océano, precipitación atmosférica de polvos minerales de sulfato arrastrados desde suelos y playas. Las fuentes del sulfuro incluyen depósitos minerales; emanaciones volcánicas; reducción ambiental, tales como pantanos; materiales orgánicos en el interior de acuíferos, tales como carbón y aceite; reducción de sulfatos; y piritita diseminada en rocas ígneas y metamórficas y en sedimentos marinos (Alley, 1993).

La concentración de sulfato en agua subterránea puede exceder 1 g/L debido a la alta solubilidad del yeso. El yeso y la anhidrita son los principales constituyentes de las evaporitas marinas y los estratos sedimentarios, que pueden ser las mayores fuentes de sulfato en las aguas subterráneas. Además de la disolución de evaporitas, el sulfato marino de aguas subterráneas viene de una mezcla de agua de mar en acuíferos costeros y el sulfato derivado del agua de mar que se acumula en los suelos por evaporación. Los isótopos de azufre y la geoquímica pueden ser usados para distinguir entre estas fuentes.

La descomposición de azufre por los organismos da como resultado sulfatos en el agua; la reducción de sulfatos genera azufre en sedimentos profundos; cuando se da una combustión a la intemperie de materiales fósiles que contienen este elemento, evaporarán sulfatos hacia la atmósfera, éstos al precipitarse forman parte del sulfato en suelo, que nuevamente toman y descomponen los organismos, generando azufre en el suelo y sulfuro de hidrógeno en el

agua, que al evaporarse es transportado hacia la atmósfera, cuando se oxida se produce sulfato que posteriormente se precipita alojándose en el suelo, además de oxidarse, el sulfuro de hidrógeno de la atmósfera se libera, teniendo sulfuro de hidrógeno en el suelo, el sulfato y el sulfuro de hidrógeno contenidos en el suelo se reducen originando azufre, que al oxidarse nuevamente, es tomado por los organismos (Schmitz, 1996). La figura 3.10, modificada de Introduction to Water Pollution Biology (Schmitz, 1996), muestra todos los procesos descritos que involucra el ciclo del azufre.

Por lo general los sulfuros disueltos dentro del agua subterránea están limitados dentro del ion SO_4^{2-} . Los isótopos estables de azufre ^{32}S , ^{34}S , ^{36}S encontrados en el ion sulfato varían ampliamente, y bajo ciertas circunstancias, pueden ser buenos indicadores del origen del sulfato. Esto es cierto si, por ejemplo, se desea distinguir sulfato originado de la disolución natural del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) del sulfato originado por un derrame industrial de ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Davis et al, 1996).

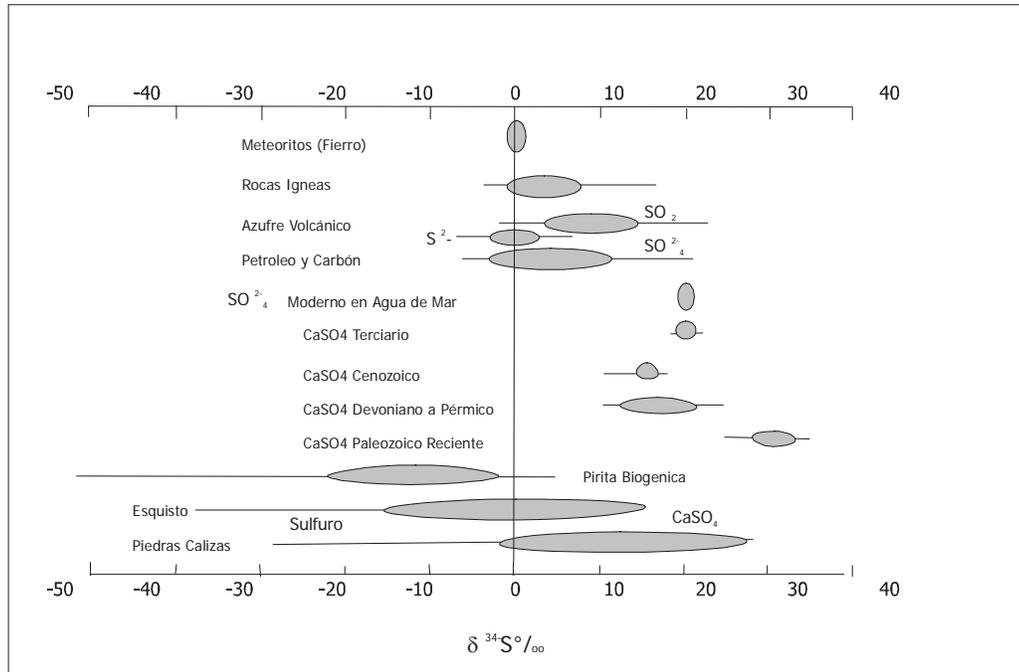


Figura 3.7. Intervalos de contenido de $\delta^{34}\text{S}$ en azufre y compuestos de azufre en diferentes materiales y ambientes (Modificado de Fritz et al, 1997).

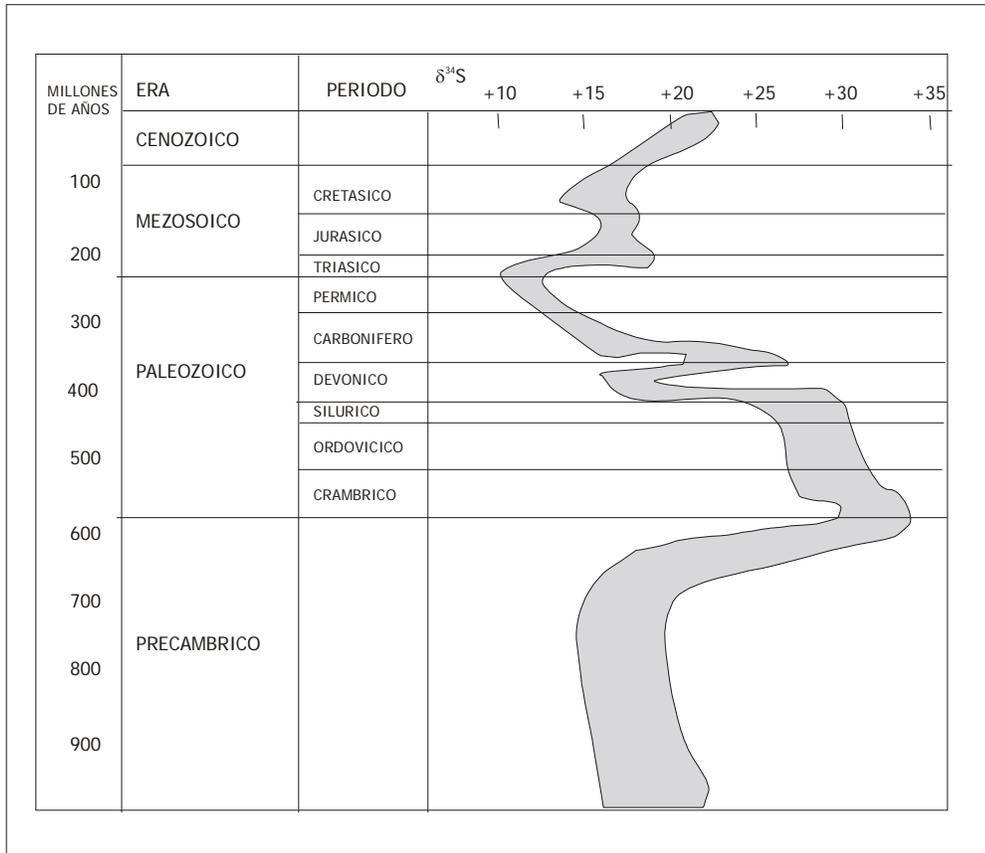


Figura 3.8. Variación de $\delta^{34}\text{S}$ del sulfato en las evaporitas marinas a través del tiempo geológico (Modificado de Geyh, 2000).

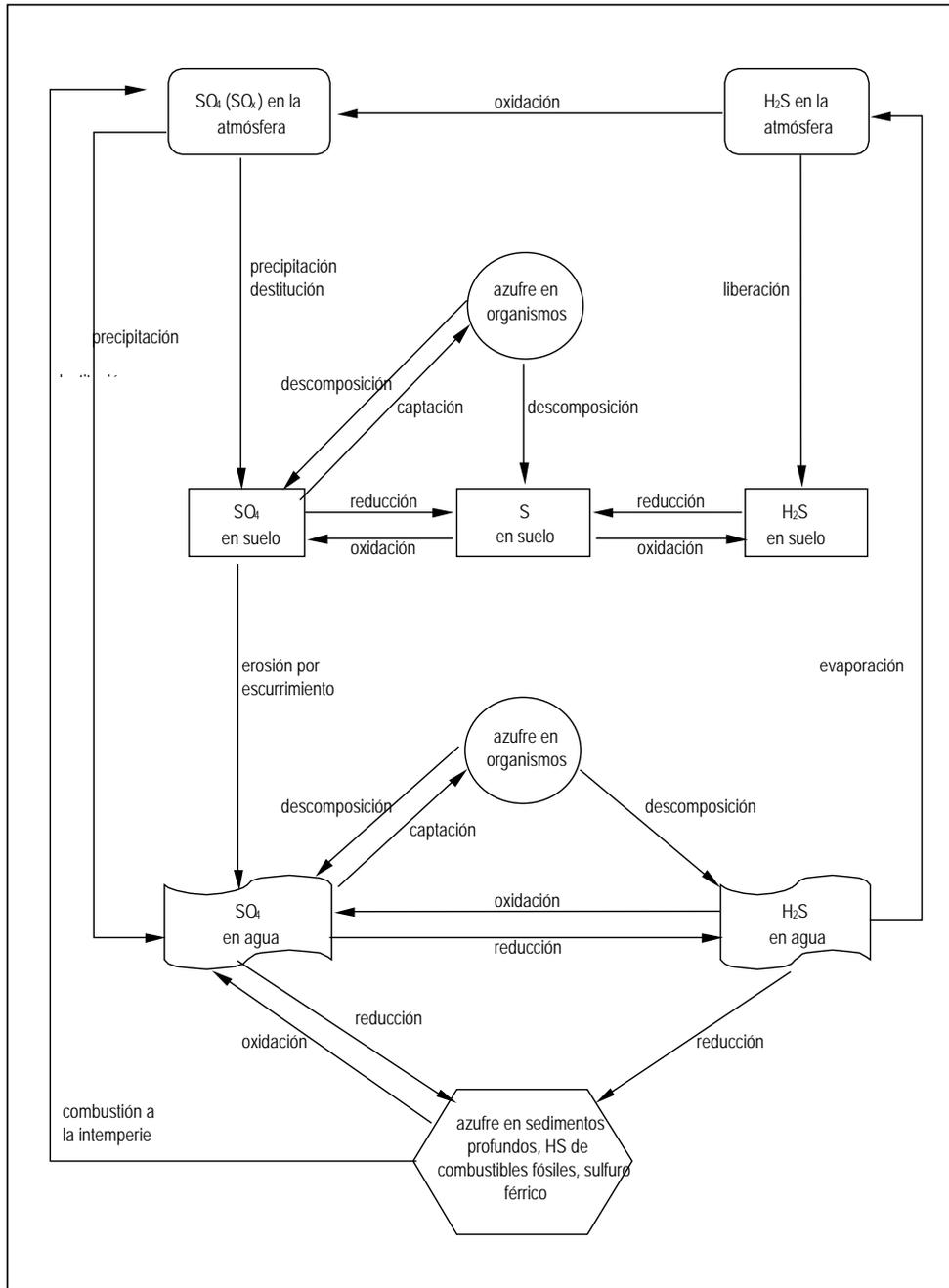


Figura 3.9. Ciclo del azufre (modificada de Schmitz, 1996).

Capítulo IV

MÉTODOS Y MATERIALES

4.1 Introducción

La ciudad de Puebla satisface su demanda de agua potable de fuentes subterráneas. Dada la creciente urbanización de la ciudad, la recarga del sistema acuífero, por precipitación pluvial y escurrimiento en la zona urbana y suburbana, es mínima; teniendo como consecuencia que no exista equilibrio entre la recarga anual y la extracción, ya que la demanda de suministro es mayor a la recarga. Como consecuencia de ello los niveles estáticos del acuífero han descendido y en algunos pozos se ha obtenido agua con altos concentraciones de sulfato que no es apta para el consumo humano. Es precisamente a partir de estos acontecimientos que surge la necesidad de identificar las fuentes de contaminación natural en el acuífero.

Para lograr este análisis fue necesario identificar algunos sitios que siempre han sido zonas de descarga, tal es el caso de los manantiales ascendentes por lo tanto, se seleccionaron cinco que por sus características de sulfatados pueden aportar datos relevantes del sistema de flujo; también se realizó un inventario de pozos de los cuales se seleccionaron nueve, cuatro de ellos aportadores de agua con altos contenidos de sulfato, y los cinco restantes aportadores de agua de buena calidad. Se seleccionaron además, siete manantiales en las

montañas para encontrar la interacción de éstos con los demás sitios. Se tomaron muestras de agua de todos los sitios, durante el muestro se les dio el tratamiento de acuerdo al tipo de análisis que se iba a efectuar, posteriormente se realizaron análisis fisicoquímicos e isotópicos. Con base en los resultados obtenidos se logró identificar la probable causa que origina la contaminación natural.

A pesar de la importancia económica de la ciudad de Puebla, no se tienen estudios detallados sobre el acuífero, éste es uno de los primeros trabajos de su género, en el que se trata de relacionar y analizar la escasa información recabada con los datos obtenidos durante la presente investigación, a fin de obtener un resultado que sirva de base científica para estudios posteriores sobre protección y gestión del acuífero.

4.2 Método general

La metodología general seguida durante el desarrollo de esta investigación comprende actividades llevadas a cabo en tres ámbitos distintos: gabinete, campo y laboratorio.

El trabajo de gabinete fue intenso, para lograr mejores resultados se organizó en tres etapas, la primera consistió en hacer un *inventario bibliográfico de estudios realizados anteriormente en la zona de estudio*. Fue necesario visitar tanto bibliotecas como instituciones gubernamentales; de esta manera se lograron obtener datos de análisis químicos de algunos pozos para los años 1990, 1992, 1993, realizados por la Comisión Nacional del Agua (CNA), Gerencia Estatal de Puebla, así como planos de niveles estáticos y cortes geológicos, estudios realizados por encargo del Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado de Puebla, (SOAPAP).

La segunda etapa fue *seleccionar los sitios que proporcionarían información de interés para la investigación*. Para ello se elaboró una relación de pozos abastecedores de agua, se investigó cuáles eran productores de agua sulfatada así como la viabilidad para muestrearlos (accesibilidad, en operación o no, permisos, etc.), se seleccionaron aquellos cuyos contenidos de sulfatos y sulfuros eran mayores a los establecidos en las normas. Una característica importante de los sitios escogidos es que su localización esté acorde al sentido de las líneas de flujo subterráneo. Finalmente se escogieron cinco manantiales

ascendentes, un pozo profundo y ocho pozos someros; además de siete manantiales en las faldas de la Sierra Nevada, con objeto de establecer el sistema de recarga del sistema acuífero. Esta actividad se realizó en la ciudad de Puebla, en los meses de octubre y noviembre del 2002, realizando visitas al organismo regulador de agua potable SOAPAP, así como a la CNA gerencia estatal Puebla.

La tercera etapa consistió en *analizar la información geológica* recabada durante la primera etapa, para ello fue necesario ahondar la investigación del área de estudio en cuanto a su formación en el marco del tiempo geológico, todo ello encaminado a la mejor comprensión del fenómeno de contaminación natural. Esto condujo al conocimiento de estratos profundos que no aparecen en los mapas geológicos obtenidos durante el inventario bibliográfico.

Las actividades de campo consistieron básicamente en el *muestreo de los sitios seleccionados*. La primera campaña de muestreo se llevó a cabo el 27 de marzo de 2003, se tomaron muestras en los manantiales ascendentes, el pozo profundo y los pozos someros. Se midieron parámetros in situ, las muestras se prepararon para realizarse análisis químicos y se trasladaron al laboratorio del CIRA; las muestras para análisis de cationes se conservaron con ácido nítrico al 65.3%, para aniones sólo se refrigeraron. La segunda campaña de muestreo se realizó el 13 de septiembre del mismo año, consistió en tomar muestras en los sitios seleccionadas para determinar los isótopos ^{34}S , ^{18}O del sulfato y ^{34}S sulfuro; durante la tercer campaña que se realizó en febrero de 2004, se muestrearon siete manantiales localizados en las faldas de la Sierra Nevada, para su conservación sólo se refrigeraron ya que el objetivo era determinar los isótopos ^{18}O y ^2H .

En la etapa de laboratorio se realizaron *análisis químicos e isotópicos*. Los análisis químicos se efectuaron en el laboratorio de calidad de agua del CIRA y en el laboratorio de física de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), en base a los resultados obtenidos se identificaron los tipos de agua y su relación con la geología de la zona. Los análisis isotópicos se realizaron en el laboratorio de isótopos ambientales de la Universidad de Waterloo, Canadá; se determinaron los isótopos ^{18}O , ^2H , $^{34}\text{Sso}_4^{2-}$, $^{18}\text{Oso}_4^{2-}$ para establecer el mecanismo del sistema de flujo así como el origen del sulfato en el sistema acuífero.

4.3 Área de estudio y sitios muestreados

El Valle de Puebla abarca la parte Sur del estado de Tlaxcala y la porción Noroeste del estado de Puebla, está delimitado al Norte por la Sierra de Tlaxco, al Sur por la presa Manuel Ávila Camacho en la ciudad de Puebla, al Este por el volcán La Malinche, al Oeste por la Sierra Nevada.

Se seleccionaron sitios aportadores de agua con elevados contenidos de sulfato así como pozos aportadores de agua con buena calidad, clasificándolos de la siguiente manera: siete manantiales de montaña, ubicados en la falda de la Sierra Nevada (no existen manantiales en el lado Este del área de estudio); cinco manantiales ascendentes, localizados dentro de la ciudad de Puebla que funcionan como zonas de descarga del sistema acuífero; un pozo profundo y ocho pozos someros, también al interior de la ciudad. En la figura 4.1 se puede ver el área de estudio así como los sitios muestreados, en la figura 4.2 se observa con detalle la localización de pozos y manantiales ubicados en la ciudad de Puebla. En la tabla 4.1 se presenta la clasificación de los sitios. El acuífero del Valle de Puebla es extenso, de manera que se tomó la decisión de muestrear solamente sitios dentro del estado de Puebla, ya que en el Valle, la ciudad con mayor problema de contaminación natural y abastecimiento de agua potable es Puebla.

Tabla 4.1. Clasificación de sitios muestreados, símbolos usados en las figuras así como sus nombres.

MANANTIALES DE MONTAÑA	MANANTIALES ASCENDENTES
<ul style="list-style-type: none"> ▲ ZOPILOCALCO ▲ SN PEDRO BENITO JUÁREZ ▲ PRECIOSITA ▲ AXOCOPAN ▲ PIEDRA COLORADA ▲ SAN BALTAZAR ▲ SAN MARTÍN TEXMELUCAN 	<ul style="list-style-type: none"> ● AGUA AZUL ● BAÑOS P BRAVO ● CROWN PLAZA ● RANCHO COLORADO ● LA PAZ
POZO PROFUNDO	POZOS SOMEROS
<ul style="list-style-type: none"> ■ CAPU 	<ul style="list-style-type: none"> ■ STANLEY ■ CNIC ■ GABRIEL PASTOR ■ AUTOPISTA ■ CASTILLOTLA ■ AMALUCAN ■ CFE ■ EL ÁNGEL

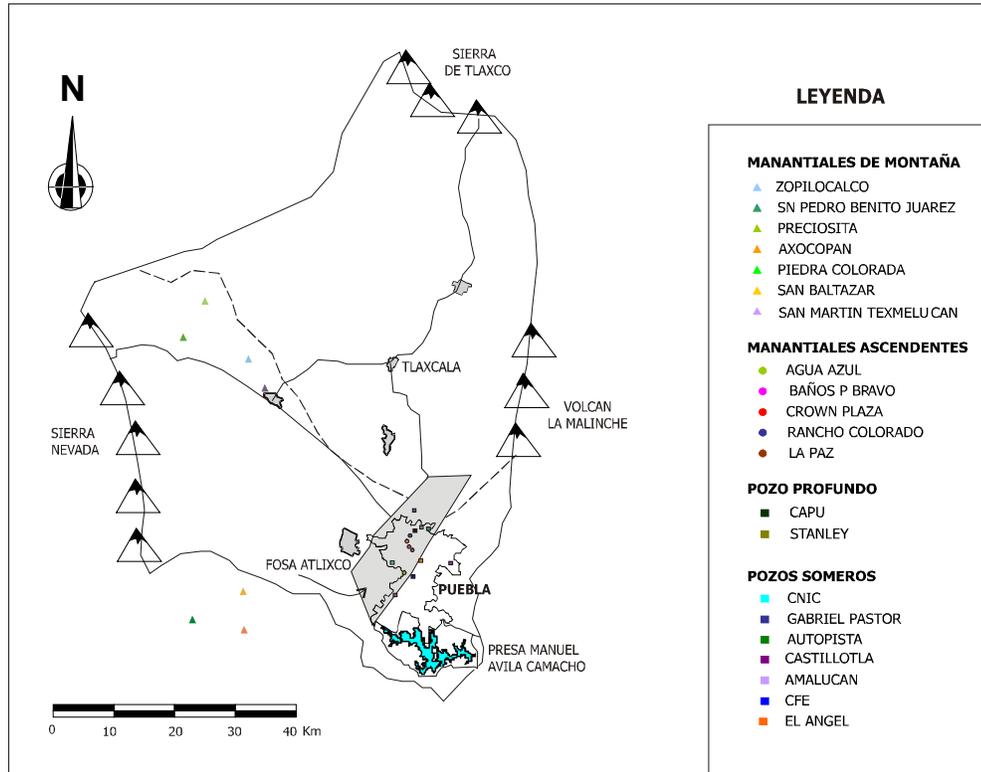


Figura 4.1. *Sitios muestreados en el área de estudio. Manantiales en la Sierra Nevada, considerados para análisis isotópicos de ^2H y ^{18}O ; pozos y manantiales ubicados en la ciudad.*

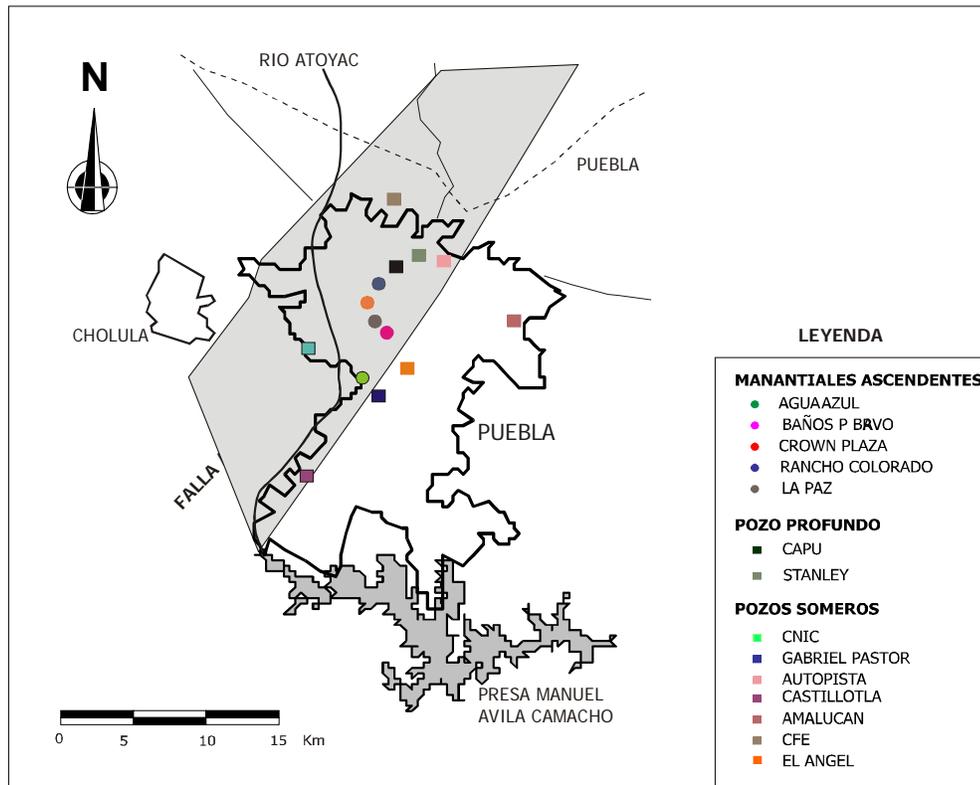


Figura 4.2. *Detalle de los manantiales y pozos muestreados en la ciudad de Puebla. Nótese que los manantiales ascendentes se localizan sobre la fosa Atlixco. La localización de la fosa se hizo en base a los cortes geológicos.*

4.4 Análisis fisicoquímicos e isotópicos

Con frecuencia se encuentran análisis fisicoquímicos aplicados en estudios de aguas subterráneas, que sólo hablan de la calidad con respecto al uso que se le dará al agua en cuestión, sin proporcionar más que algunos principios generales para comprender el origen de dichos recursos. Sin embargo, tratándose de aguas subterráneas, los parámetros a medir así como la interpretación de los resultados de un análisis fisicoquímico, deberían estar ligados al flujo del agua; ya que el flujo es el vehículo de transporte de las características físicas, químicas e isotópicas. Por lo tanto, la observación de propiedades geológicas, topográficas y físicas proporcionará información sobre el movimiento del agua subterránea, es decir, recarga, circulación, almacenamiento y descarga; así como la relación geológica del sistema.

Todas las aguas subterráneas contienen sales en solución, el tipo y concentración de sales depende del ambiente, movimiento y origen del agua subterránea. Esto significa que el agua desde el proceso de evaporación de los océanos, hasta la recarga de un acuífero subterráneo, va sufriendo cambios; esto es porque en cada etapa del ciclo hidrológico adquiere iones, reacciona con los materiales por los que circula, acarrea elementos de una etapa y los deposita en otra; este ciclo geoquímico del agua superficial y subterránea, se puede observar de manera resumida en la figura 4.3, que muestra las reacciones ocurridas en cada etapa del ciclo hidrológico.

La cantidad y tipo de materia mineral disuelta depende de la composición química y la estructura física de las rocas, así como de la concentración de iones hidrógeno (pH) y el potencial redox del agua. De manera local, los gases absorbidos de origen magmático, contribuyen en la disolución de productos minerales en el agua subterránea; un ejemplo es la mineralización de manantiales termales (Todd, 1980).

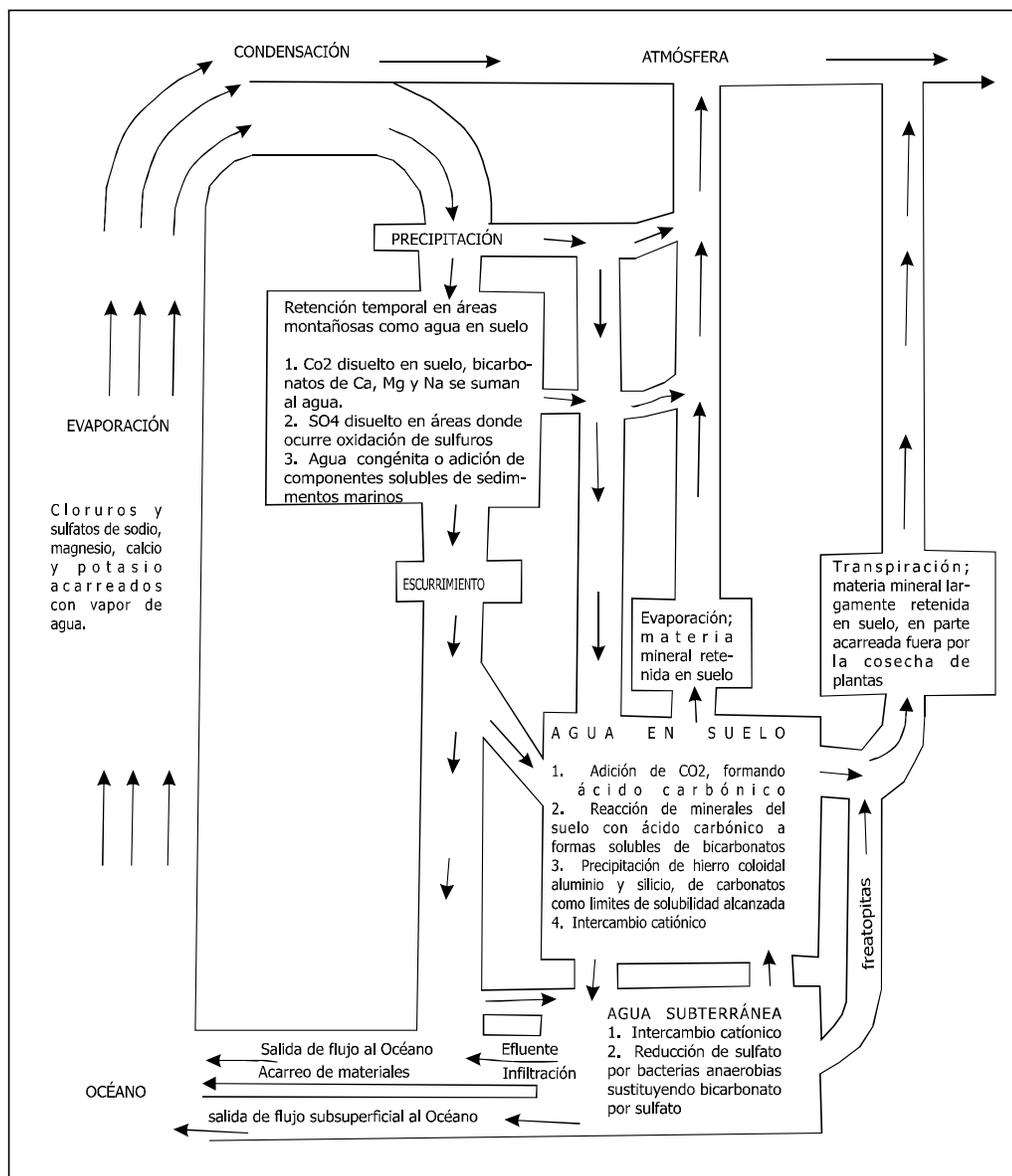


Figura 4.3. Ciclo geoquímico del agua superficial y subterránea. El agua, durante cada etapa del ciclo hidrológico va adquiriendo iones y se realizan varios tipos de reacciones, dependiendo del ambiente en el que se encuentre (modificado de la USGS, 1964).

4.4.1 Parámetros medidos in situ

Existen parámetros que deben ser medidos en el lugar donde que se toma la muestra porque al almacenarlos cambian sus propiedades y tampoco se les puede agregar algún reactivo para conservarlo. Los parámetros medidos in situ fueron:

Temperatura. Es un dato necesario para calcular el equilibrio agua-roca, así como para identificar grupos de agua, propiedades de los elementos que la componen y deducir la profundidad de circulación, medida en °C.

Conductividad eléctrica. Los iones disueltos presentes en el agua le dan un carácter eléctrico, que es directamente proporcional a la temperatura. También existe una correlación positiva entre la conductividad eléctrica y el total de iones disueltos. La medición de este parámetro es necesaria para sustituir la concentración del total de iones disueltos cuando no se determinaron de manera individual en el laboratorio. Se mide en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

El *pH* de una solución indica la concentración efectiva del ion hidrógeno H^+ . Describe la composición del agua: pH 7 indica agua neutra, valores menores indican agua ácida y valores mayores, agua básica. El valor del pH medido en campo es un parámetro importante en la valoración de la calidad del agua relacionada con problemas de corrosión o sabor.

Oxígeno disuelto. Su determinación es informativa con respecto a: definir el ambiente del acuífero en términos del grado de condiciones anaerobias; para detectar cambios que ocurren en el sistema de agua, la disminución de oxígeno disuelto puede indicar un incremento en la actividad biológica relacionada con la llegada de aguas residuales u otros contaminantes líquidos; identificar intrusión de agua desde pozos adyacentes, como resultado de la explotación intensiva; entre otros. La concentración de oxígeno disuelto en aire saturado depende de: la presión, que es controlada por la altitud y la temperatura.

4.4.2 Análisis químicos

Durante la primera campaña de muestreo, se tomaron muestras en los manantiales ascendentes, el pozo profundo y los pozos someros. Primeramente se midieron los parámetros in situ con un multimedidor D24 HORIBA; recolectando 1.5 L para la determinación de cationes, acidificándolos con ácido nítrico al 65.3 %, para su conservación se mantuvieron en refrigeración; para la obtención de aniones se almacenó 1.0 L, solamente se refrigeró. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio de calidad del CIRA y de la UPAEP en donde efectuaron los análisis. Durante la segunda campaña de muestreo, se tomaron muestras para la determinación de los isótopos ^{34}S y ^{18}O del sulfato y sulfuro, fue necesaria la recolección de 4 L para cada uno, se refrigeraron y trasladaron al laboratorio del CIRA. Durante la tercer campaña de muestreo, se recolectaron muestras en los manantiales ubicados en las faldas de la Sierra Nevada, manteniéndose en refrigeración se trasladaron al laboratorio del CIRA para su posterior envío al laboratorio de la Universidad de Waterloo.

Los cationes fueron determinados, mediante absorción atómica de llama de acuerdo a las técnicas del APHA-AWWA-WPCF (1995), Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales, así como a la NOM-AA-051-1980. En el laboratorio del CIRA se empleó un espectrofotómetro modelo CARY 1E marca VARIANT, usando una curva de calibración de concentración conocida para cada catión.

Los Sulfatos, Sulfitos y Sulfuros fueron determinados en el laboratorio de la UPAEP apegándose a las normas NOM-AA-036-1980, APHA-AWWA-WPCF (1995); se usó el fotómetro Spectroquant NOVA 60 (Merck).

Los Cloruros se obtuvieron aplicando el método Argentométrico, la determinación de Bicarbonatos se realizó por el método de Titulación, ambos análisis se efectuaron en el CIRA, de acuerdo a las normas NOM-AA-036-1980 y APHA-AWWA-WPCF (1995).

Todas las muestras fueron recolectadas atendiendo la NOM-014-SSA1-1993 y el manual APHA-AWWA-WPCF (1995), esto es, en envases de plástico lavados con una solución ácida, refrigeración de las muestras a 4°C, traslado inmediato al laboratorio, determinación

de parámetros dentro de los tiempos especificados. La caracterización química, los diagramas de Piper y Shoeller se obtuvieron mediante el programa Aquachem v.3.6.2.

4.4.3 Análisis factorial

El análisis factorial es un método estadístico cuyo propósito es encontrar la manera de condensar o resumir la información contenida en un grupo original de variables a un nuevo grupo pequeño formado por las dimensiones de las nuevas variables (factores) con un mínimo de información. Las técnicas de análisis factorial pueden satisfacer dos objetivos: identificar la estructura para resumir los datos y la reducción de ellos (Hair et al, 1998).

Estas técnicas se han empleado con éxito para caracterizar las aguas subterráneas de varias regiones (Subbarao C, Subbarao N.V, Chandu S. N., 1996; Wang y, Ma T, Luo Z, 2001; Usunoff, Guzmán-Guzmán, 1989; Jeong, 2001), la ventaja que presenta sobre otros métodos es que las variables más correlacionas se agrupan en un primer factor, en un segundo factor sucede lo mismo una vez que se han quitado las del primer factor, y así sucesivamente, de esta manera las variables se reducen a unos cuantos factores, haciendo más sencillo el análisis. Al término del análisis, los factores resultantes se relacionan con las variables que le dieron origen, obteniendo así la caracterización del agua subterránea. Se puede tener en una misma base de datos pH, conductividad, iones, solidos disueltos entre otros, la diferencia de unidades no es significativa, lo importante es la correlación entre los datos.

La aplicación de esta técnica se hizo mediante el software Statistical package for the Social Sciences (SPSS), primeramente se escogieron las variables que intervendrían en el análisis, éstas fueron los iones mayoritarios y los sólidos totales disueltos, se creó la base de datos para generar la matriz de correlación de coeficientes aplicando las pruebas de Kaiser-Meyer-Olkin y Bartlett, seleccionando el método de extracción de componentes principales (eigenvalores) así como el número de factores para analizar la matriz de correlación; los valores de los factores se calcularon con la técnica de rotación Varimax.

4.4.4 Análisis isotópicos

Los análisis isotópicos se hicieron en el laboratorio de isótopos ambientales de la Universidad de Waterloo, Canadá. Previo al envío de muestras fue necesario hacer varias actividades, para la determinación de ^{18}O y ^2H de las aguas de los manantiales de la Sierra Nevada, se almacenaron 50 mL de cada sitio de muestreo y se refrigeraron para su conservación. Obtener los isótopos ^{34}S y ^{18}O del sulfato y ^{34}S del sulfuro requirió de mayor esfuerzo, primero se hicieron los análisis químicos para saber las concentraciones de sulfatos y sulfuros de cada sitio, conociendo este dato fue necesario organizar la segunda campaña de muestreo en la que se recolectaron 8 L por cada sitio (4 L para sulfatos y 4 L para sulfuros) se refrigeraron y trasladaron al laboratorio del CIRA de igual manera, durante la recolección de estas muestras se aplicaron las normas NOM-014-SSA1-1993 y el manual APHA-AWWA-WPCF (1995).

El procedimiento para determinar los isótopos del sulfato consistió primeramente acidificar la muestra con ácido clorhídrico al 37.2% hasta un pH de 4 a 5, enseguida se agregó cloruro de bario para precipitar sulfato de bario, la cantidad requerida de sulfato de bario por el laboratorio de isótopos ambientales fue de 20 mg; partiendo del conocimiento que 1 mL de cloruro de bario es capaz de precipitar 40 mg de sulfato de bario, se agregó la cantidad requerida dependiendo de la concentración de sulfatos, una vez agregado el reactivo se esperó un tiempo para obtener el precipitado, eliminándose el agua excedente, filtrando y lavando el precipitado resultante con agua destilada, una vez seco se almacenó en celdas para su envío a Canadá.

Para obtener el ^{34}S del sulfuro se agregó 1 g de acetato de cinc por 1 L de muestra, una vez obtenido el precipitado, se eliminó el exceso de agua, se filtró, se secó y se almacenó en celdas. Los análisis de ^{34}S y ^{18}O del sulfato se hicieron por espectrometría de masa, los valores de ^{34}S se determinan por el SO_2 generado por la disociación de sulfato a altas temperaturas, la medición de ^{18}O del sulfato se hace sobre el CO_2 producido por la combustión de sulfato-grafito a altas temperaturas. Los análisis de ^{34}S del sulfuro se hacen convirtiendo CdS a AgS por titulación con AgNO_3 , el sulfuro de plata se mezcla con óxido cúprico y se calentó hasta obtener SO_2 para su análisis por espectrometría de masa. Las

celdas con precipitados de sulfatos y sulfuros fueron enviados al laboratorio de isótopos ambientales de la Universidad de Waterloo para realizar los análisis correspondientes.

4.5 Equipo y material utilizado en campo y laboratorio

Las actividades de campo comprendieron la toma de muestras y medición de parámetros in situ; fue necesario emplear envases de plástico, hieleras, termómetros así como un multimedidor D24 HORIBA.

Durante la determinación de parámetros químicos se usaron vasos de precipitados, matraces Erlenmeyer, buretas, matraces aforados, pipetas y tubos de ensayo, así como las sustancias especificadas en las técnicas para cada análisis; además los espectrofotómetros CARY 1E marca VARIANT en el CIRA y el Spectroquant NOVA 60 (Merck) en la UPAEP.

Capítulo V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis Hidrogeológico

Al revisar los cortes geológicos y sondeos eléctricos, se puede observar que existen puntos comunes entre ambos, el Río Atoyac, presentado en la figura 5.1, el pueblo Ocotlan en la 5.2, en la 5.3, Amalucan; y el pueblo de Xoxtla, en la 5.4. Como se ha mencionado, la presencia de fallas supone un intercambio de flujo entre los diferentes estratos, lo que puede hacer variar la calidad del agua.

Una estructura muy notable, como se ha visto en los cortes geológicos, es la fosa Atlixco que cubre parte de la sección Noroeste de la ciudad de Puebla. En todas las figuras se observa una coincidencia, la existencia de dos acuíferos separados por un acuitardo, que son afectados por un sistema de fallas y fracturas que permiten el movimiento del flujo subterráneo a través de ellas, los manantiales ascendentes son puntos de descarga del acuífero profundo. Las zonas de recarga se localizan en las partes altas de la Sierra Nevada y del volcán La Malinche, éstas generan flujos subterráneos del Oeste de la subcuenca hacia la ciudad de Puebla y del Este también hacia la ciudad.

La geología conocida hasta ahora la conforman gravas, arenas, tobas, arenas y materiales volcánicos de permeabilidad media a alta que conforman el primer acuífero o acuífero somero, pertenecen al período Cuaternario de la era Cenozoica. El acuitardo está formado por arcillas lacustres de baja permeabilidad del período Terciario de la misma era, el segundo acuífero por rocas volcánicas y conglomerados del Terciario de la era Cenozoica. En los sondeos verticales se aprecia un último estrato formado por calizas de baja permeabilidad del Cretácico de la era Mesozoica que constituye un segundo acuitardo, a éste acuitardo le subyace un tercer acuífero formado por depósitos marinos evaporíticos; se desconoce el espesor del segundo acuitardo y el tercer acuífero.

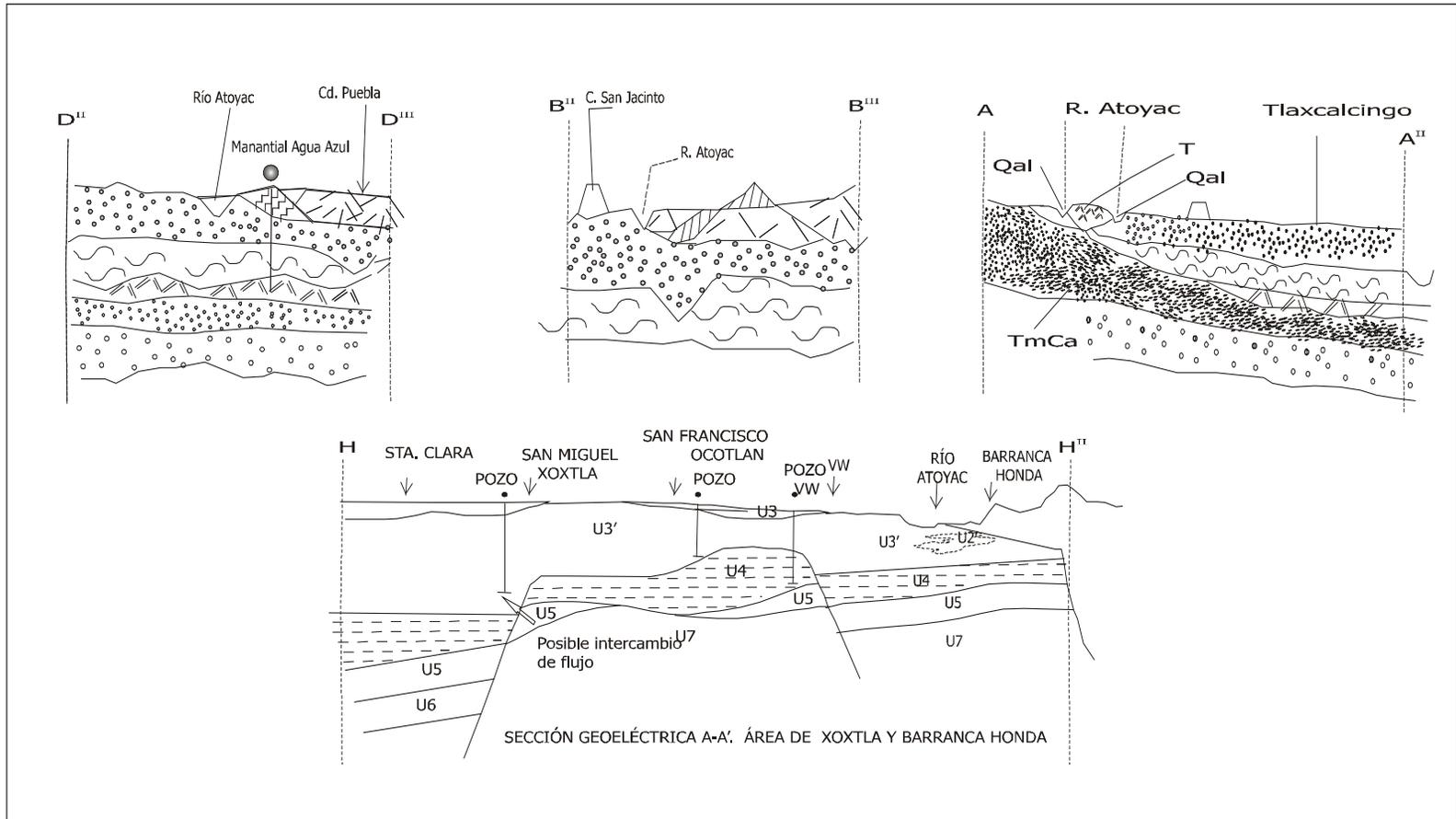


Figura 5.1. Un punto importante en las secciones geológicas y el sondeo geoelectrico del área de Xoxtla-Baranca Honda, es el Río Atoyac, ambos estudios coinciden, ya que el río descansa sobre un estrato superior que funciona como acuífero libre, un estrato intermedio de sedimentos lacustres, y un tercer estrato con material de alta permeabilidad. (Modificado de Jiménez 1999b).

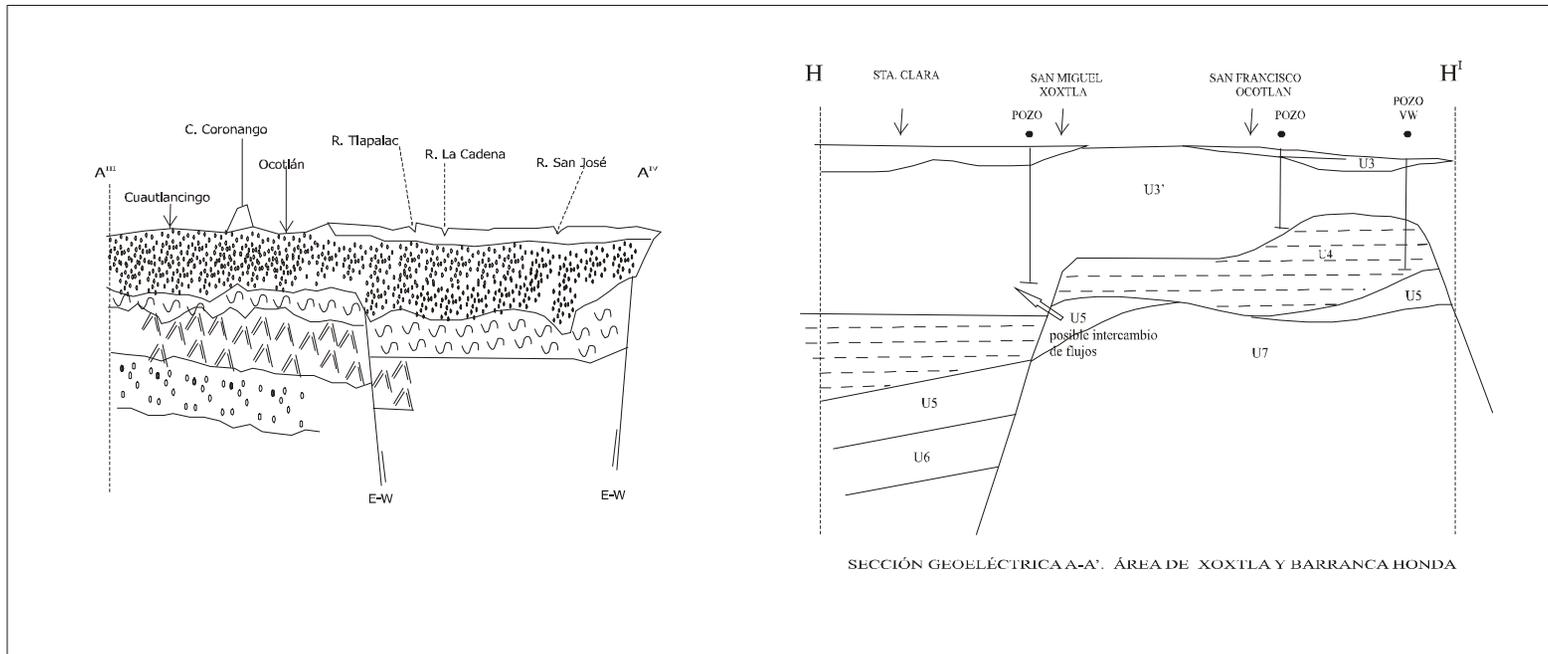


Figura 5.2. Ocotlán es otro punto de intersección entre las secciones geológicas y el sondeo geoelectrico del área de Xoxtla-Barranca Honda; en ambos se aprecia la existencia de un estrato superior de aluviones (Q_{1a}), seguido por uno de arcillas lacustres que descansa sobre un segundo acuífero (Modificado de Jiménez 1999b).

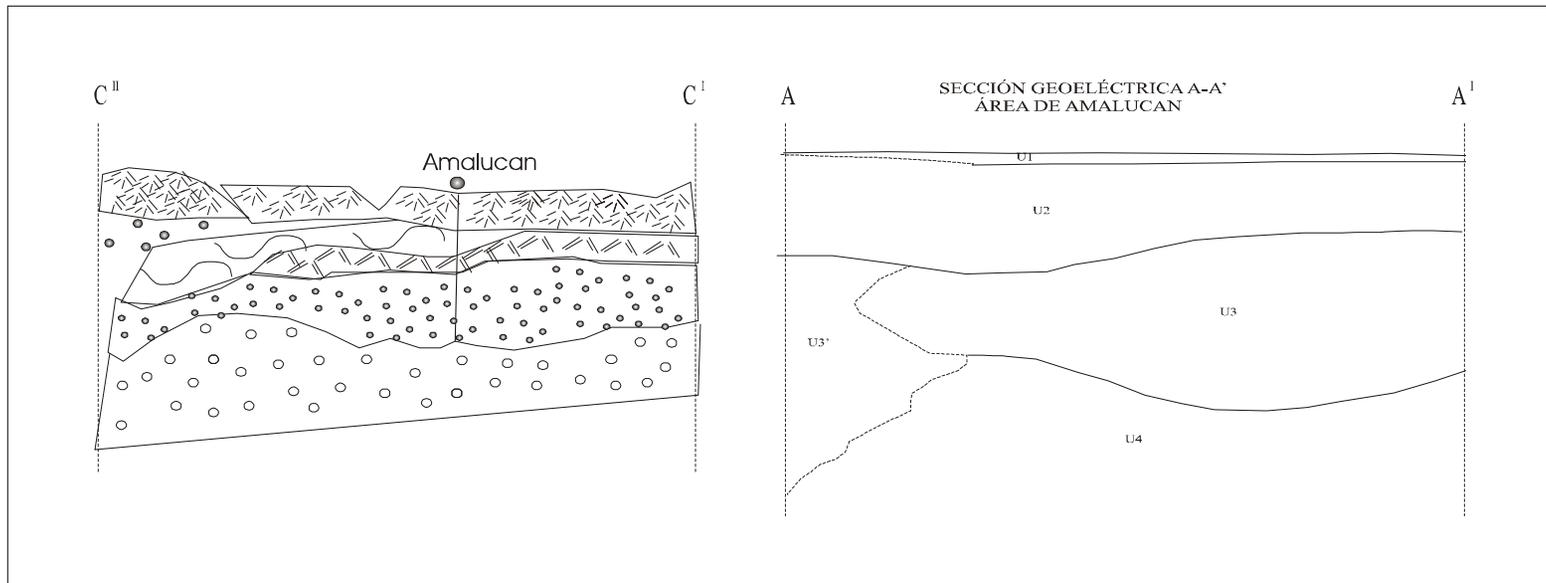


Figura 5.3. En Amalucan, se observa el mismo comportamiento, dos acuíferos separados por un estrato de origen lacustre (Modificado de Jiménez 1999b).

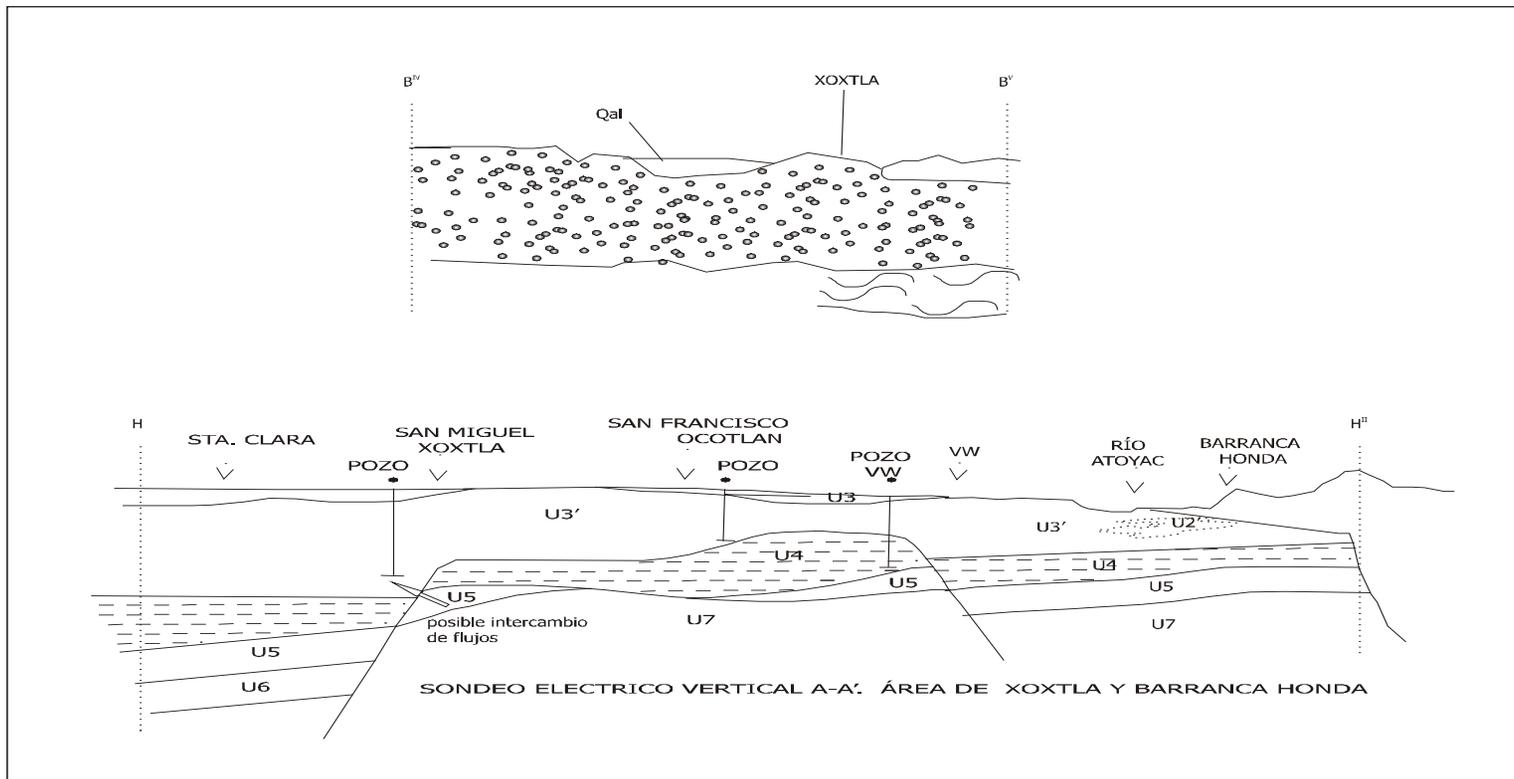


Figura 5.4. Xoxtla es un punto común entre el corte geológico B-B' y el sondeo eléctrico vertical A-A' área de Xoxtla-Barranca Honda. En el sondeo geoelectrico se puede distinguir una falla que origina el desplazamiento y separación del estrato lacustre, permitiendo cierto contacto entre los estratos U3' Y U5, en los que se puede dar un intercambio de flujo (Modificado de Jiménez 1999b).

El sistema acuífero se formó sobre el Complejo Acatlán que está compuesto por materiales metamorfizados de la era Paleozoica. En los comienzos de la era Mesozoica emergen zonas de las aguas marinas, en las que se depositan materiales transportados por los ríos, provenientes de la meteorización de los macizos paleozoicos. Los materiales depositados sufren procesos de hundimiento ligero y ocupación de aguas marinas de tipo somero, nuevos movimientos ascendentes provocan la retirada del mar y la formación de depósitos continentales. Es durante estos procesos de invasión y retiro del mar que se formaron estratos evaporíticos a partir de la evaporación del agua de mar atrapada. Después se inició un período de gran actividad que dio origen a la formación de volcanes, es posible que durante el ascenso del magma quedaran atrapados materiales del estrato evaporítico y al enfriarse la lava en la superficie, dio origen a estratos de material volcánico con venas de materiales evaporíticos, actualmente constituyen los dos acuíferos conocidos en el Valle de Puebla.

Los esfuerzos entre los materiales que constituyen el sistema acuífero dieron origen a varias fallas, ocasionando la discontinuidad entre las capas geológicas. En la parte noroeste de la ciudad de Puebla se formó una fosa tectónica entre dos fallas normales, esta región deprimida entre dos bloques levantados es conocida como “Fosa Atlixco” y se extiende desde la ciudad de Atlixco hasta el volcán La Malinche. Las fallas y la fosa Atlixco constituyen una importante vía que permite el movimiento de las aguas del acuífero inferior al superior. En la figura 5.5 se muestra el esquema del sistema acuífero, resultado del análisis de la información geológica y el desarrollo evolutivo de la zona.

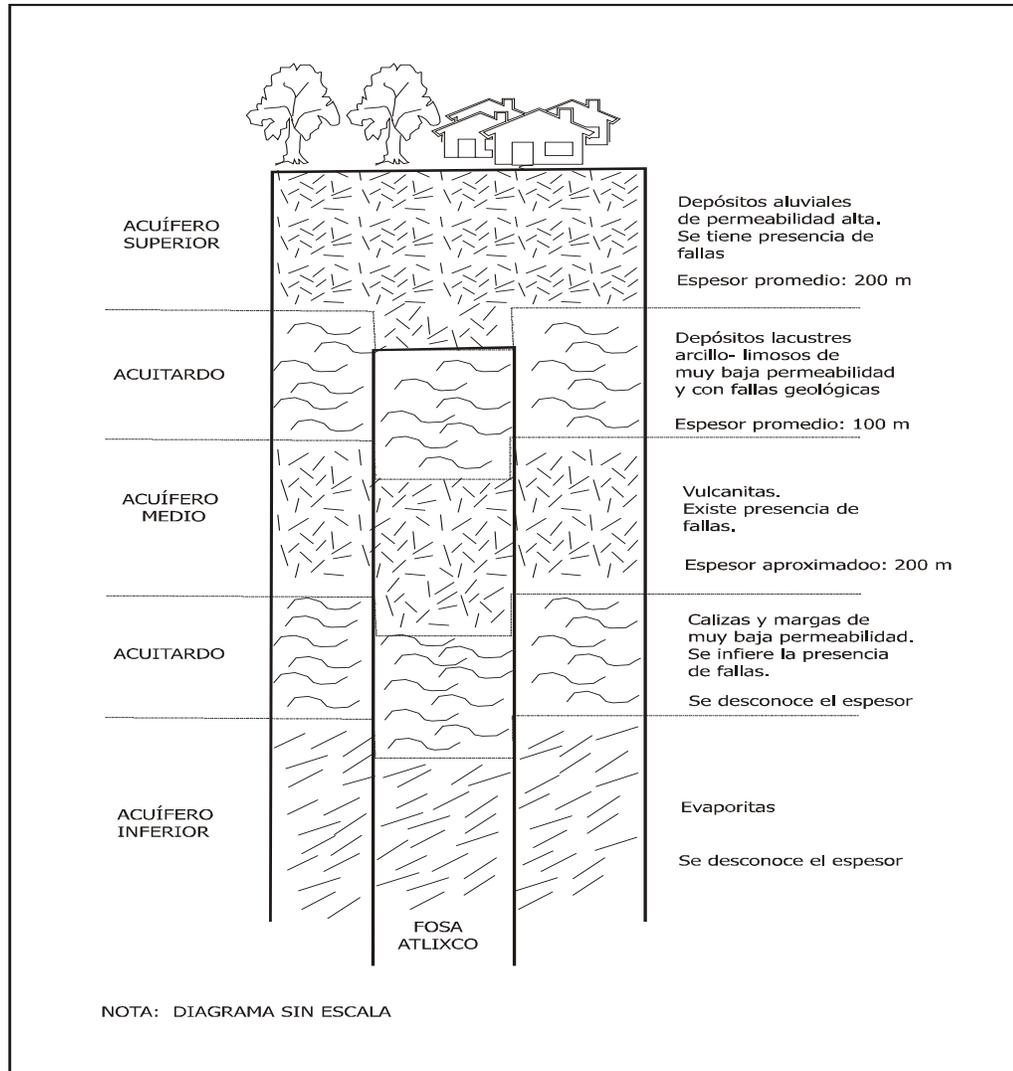


Figura 5.5. Esquema general del sistema acuífero, se observa la presencia de tres acuíferos separados por acuitardos e interconectados por la fosa Atlixco, además de existir fallas secundarias en las diferentes estructuras del sistema.

5.2 *Análisis hidrogeoquímico*

La composición química de las aguas subterráneas aporta información muy valiosa sobre el comportamiento hidrogeológico regional. Para la mejor comprensión de dicho comportamiento, es necesario antes de realizar cualquier análisis, establecer los parámetros que serán de utilidad en la interpretación del proceso de movimiento de flujo subterráneo. Existen varias maneras de clasificar las aguas de acuerdo a su composición química en esta investigación se usaron dos: el primero basado en análisis hidroquímicos apoyados en métodos gráficos como los diagramas de Piper y Shoeller, el segundo fue la aplicación de métodos analíticos de análisis multivariado, específicamente análisis factorial.

5.2.1 *Análisis hidroquímico*

Los datos químicos, empleados para caracterizar las aguas subterráneas del sistema acuífero, fueron obtenidos en el marco de esta investigación a través de las diferentes campañas de muestreo, tal como se describe en el Capítulo IV. Se midieron los siguientes parámetros *in situ*: pH, temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto; en el laboratorio se hicieron análisis para determinar los cationes Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio así como los aniones Sulfatos, Cloruros, Bicarbonatos y Nitratos.

Los resultados *in situ* se presentan en la tabla 5.1, es interesante observar que las muestras con las temperaturas más altas tienen menos oxígeno disuelto y una alta conductividad eléctrica, además de ser ácidas en general. Una observación importante es la temperatura del pozo Stanley, que presenta el valor más elevado, esto significa que el flujo asciende desde capas profundas del sistema, a partir de esta observación cambia su clasificación de pozo somero a profundo. En la tabla 5.2 se recogen los valores de los iones mayoritarios y los sólidos totales disueltos, las unidades de medición son mg/L. Para efectos de análisis y comparaciones químicas, se deben homogenizar las unidades de medición, llevando los mg/L a meq/L (miliequivalentes/Litro); en la tabla 5.3 se muestran los iones mayoritarios empleados para verificar la calidad de los análisis químicos, mediante el balance iónico (BI) de cada muestra, se considera aceptable el análisis cuando su BI es menor a diez ($BI < 10$).

Tabla 5.1. *Parámetros medidos in situ. Nótese que la mayoría de las aguas muestreadas son ácidas y con bajos valores de oxígeno disuelto (O₂), además de tener alta conductividad eléctrica.*

NOMBRE DEL SITIO	FECHA DE MUESTREO	TEMPERATURA °C	pH	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA μ S/cm	OXÍGENO DISUELTO mg/L
AGUA AZUL	27-03-02	25.6	5.39	2440.0	1.0
BAÑOS PASEO BRAVO	27-03-02	25.5	6.39	2682.0	NM
CROWN PLAZA	27-03-02	24.0	6.41	2347.0	NM
RANCHO COLORADO	27-03-02	23.7	6.58	3360.0	1.4
LA PAZ	27-03-02	24.3	6.71	3610.0	0.6
C A P U	27-03-02	27.2	6.46	2880.0	2.7
STANLEY	27-03-02	29.0	6.32	2314.0	NM
C N I C	27-03-02	22.3	6.17	2460.0	3.0
GABRIEL PASTOR	27-03-02	22.1	6.26	2160.0	3.4
C F E	27-03-02	20.9	8.12	249.0	1.4
AUTOPISTA	27-03-02	22.6	6.94	509.0	4.8
EL ÁNGEL	27-03-02	20.7	7.71	497.0	3.6
CASTILLOTLA	27-03-02	20.4	6.73	961.0	3.2
AMALUCAN	27-03-02	19.7	7.88	224.0	5.1

NM = No Medido

Tabla 5.2. *Iones y Sólidos Totales Disueltos (STD) de las muestras recolectadas. Llama la atención la cantidad de sólidos disueltos que en la mayoría de las muestras rebasa el límite de 1000 mg/L establecido en la NOM-127-SSA1-1994 de Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano.*

NOMBRE DEL SITIO	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₃ ²⁻ mg/L	H ₂ S mg/L	STD mg/L
AGUA AZUL	12.99	150.57	433.01	113.80	687.91	983.17	313.53	<0.10	8.00	0.10	2695.0
BAÑOS PASEO BRAVO	12.29	111.82	344.09	99.65	621.55	854.01	99.97	ND	3.30	4.80	2143.4
CROWN PLAZA	14.03	124.03	373.01	101.05	634.00	851.52	95.42	ND	2.11	6.51	2193.2
RANCHO COLORADO	13.07	102.08	380.24	103.10	408.47	1023.15	127.23	<0.10	7.00	2.50	2358.5
BALNEARIO LA PAZ	13.47	122.60	450.78	131.08	655.18	951.77	104.51	<0.10	6.00	0.50	2429.8
C A P U	14.53	157.73	496.85	127.00	900.70	1064.22	131.78	<0.10	43.38	6.19	2893.0
STANLEY	11.32	117.63	357.67	101.40	589.43	886.85	81.79	ND	2.40	5.00	2146.2
C N I C	17.48	152.39	337.30	121.05	614.03	1045.11	340.80	0.71	6.90	3.00	2629.1
GABRIEL PASTOR	15.99	46.13	313.93	92.20	498.69	757.01	99.97	1.55	0.30	2.30	1825.6
C F E	4.63	10.62	29.16	17.56	9.25	128.10	27.41	<0.10	0.80	0.01	293.7
AUTOPISTA	7.67	37.91	52.90	15.14	61.15	187.15	59.07	1.96	0.60	0.04	422.9
EL ÁNGEL	16.28	56.28	61.52	14.13	57.59	185.49	122.69	2.09	0.60	0.01	516.1
CASTILLOTLA	11.49	48.01	108.28	59.75	55.75	666.87	59.07	0.88	0.20	0.05	1010.1
AMALUCAN	3.93	11.39	29.24	10.46	5.62	129.16	40.90	1.00	0.50	0.04	231.7

Tabla 5.3. Iones mayoritarios y balance iónico (BI). De acuerdo a los valores del balance iónico, los análisis químicos realizados son aceptables, ya que $BI < 10$.

NOMBRE DEL SITIO	K ⁺ meq/L	Mg ²⁺ meq/L	Ca ²⁺ meq/L	Na ⁺ meq/L	SO ₄ ²⁻ meq/L	HCO ₃ ⁻ meq/L	Cl ⁻ meq/L	BI
AGUA AZUL	0.33	12.39	21.61	4.95	14.32	16.11	8.84	0.00
BAÑOS PASEO BRAVO	0.31	9.20	17.17	4.33	12.94	14.00	2.82	2.07
CROWN PLAZA	0.36	10.20	18.61	4.40	13.20	13.96	2.69	5.87
RANCHO COLORADO	0.33	8.40	18.97	4.48	8.50	16.77	3.59	5.45
BALNEARIO LA PAZ	0.34	10.09	22.49	5.70	13.64	15.60	2.95	9.09
C A P U	0.37	12.98	24.79	5.52	18.75	17.44	3.72	4.49
STANLEY	0.29	9.68	17.85	4.41	12.27	14.53	2.31	5.07
C N I C	0.45	12.54	16.83	5.27	12.78	17.13	9.61	5.96
GABRIEL PASTOR	0.41	3.79	15.67	4.01	10.38	12.41	2.82	3.50
C F E	0.12	0.87	1.46	0.76	0.19	2.10	0.77	2.32
AUTOPISTA	0.20	3.12	2.64	0.66	1.27	3.07	1.67	4.81
EL ÁNGEL	0.42	4.63	3.07	0.61	1.20	3.04	3.46	6.27
CASTILLOTLA	0.29	3.95	5.40	2.60	1.16	10.93	1.67	5.81
AMALUCAN	0.10	0.94	1.46	0.45	0.12	2.12	1.15	6.88

Al revisar los resultados presentados en la tabla 5.3, ya es posible hacer una caracterización inicial, sin hacer uso de ningún software especializado. En primer término se tienen los cationes, de manera general se observa el siguiente comportamiento: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$; en los aniones se tiene: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$.

Con la aplicación del software Aquachem v.3.6.2, se obtuvieron los diagramas de Piper y Shoeller. En el diagrama triangular de la figura 5.6 se observan dos grupos que corresponden a diferentes tipos de agua, el primero agrupa en color rojo a los manantiales ascendentes los pozos profundos CAPU y Stanley, así como a los pozos someros CNIC y Gabriel Pastor; el segundo en color negro agrupa el resto de los pozos someros (Amalucan, Castillotla, CFE, Autopista, El Ángel), se observa una tendencia general en el acuífero hacia $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$. En el diagrama de Shoeller de la figura 5.7, se puede apreciar un grupo compacto en indicado por un círculo en color rojo en el que se ubican los manantiales ascendentes, los pozos profundos y dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor), todos ellos presentan enriquecimiento en calcio y sulfato; sólo dos de ellos tienen un mayor enriquecimiento en cloruros (Agua Azul y CNIC). El segundo grupo, encerrado en color negro, está formado por pozos someros, en ellos predomina el enriquecimiento de bicarbonatos, calcio y magnesio.

En base al análisis de estas dos gráficas, se identificaron dos tipos de agua, $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ para los manantiales ascendentes, los pozos profundos y los pozos someros CNIC y Gabriel Pastor; el segundo tipo es $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ y pertenecen a los pozos Amalucan, Castillotla, CFE, Autopista y El Ángel. Los sitios que aportan agua del primer tipo se localizan sobre la fosa Atlixco y próximos a ella, sus aguas pertenecen al flujo profundo, esto hace evidente la influencia que la fosa Atlixco ejerce sobre el movimiento del flujo subterráneo hacia la superficie, es posible que algunos pozos someros presenten mezclas con las aguas del flujo profundo, como se muestra en las gráficas, algunos sitios considerados como someros aparecen muy próximos a los profundos. Las flechas en las gráficas indican la tendencia general de evolución en el acuífero.

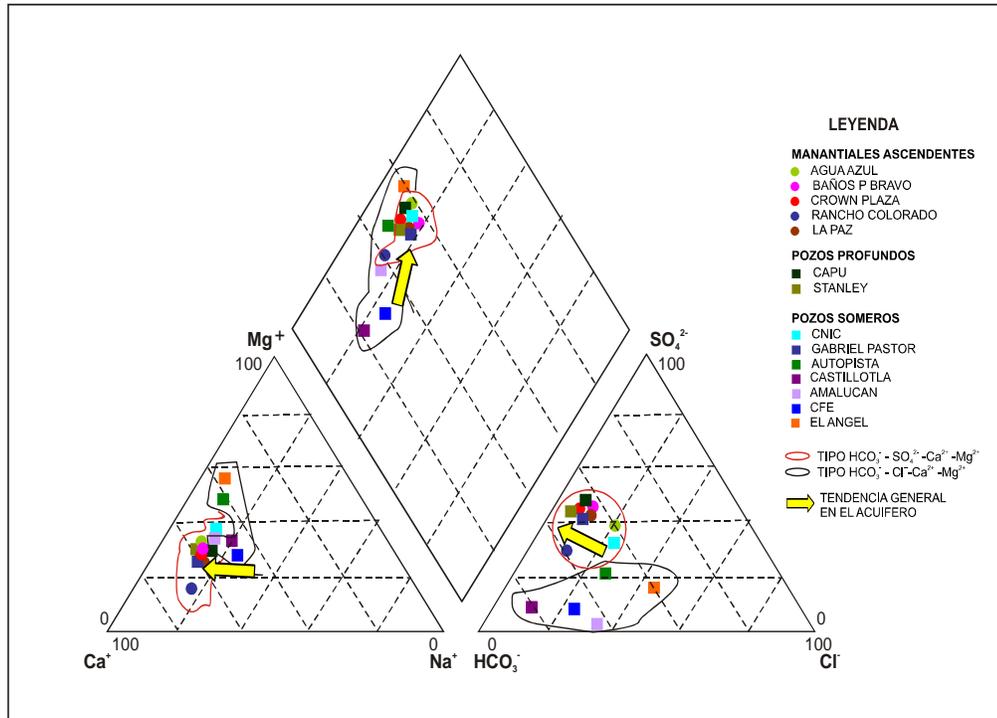


Figura 5.6. Diagrama de Piper. Se observa un grupo compacto con características similares y otro disperso; en el primero se localizan los manantiales ascendentes, los pozos profundos y los pozos CNIC y Gabriel Pastor, su tipo de agua es $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$. En el segundo grupo el tipo de agua es $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ en el se ubican pozos someros que en la gráfica aparecen dispersos. Las flechas indican la tendencia general de evolución en el acuífero.

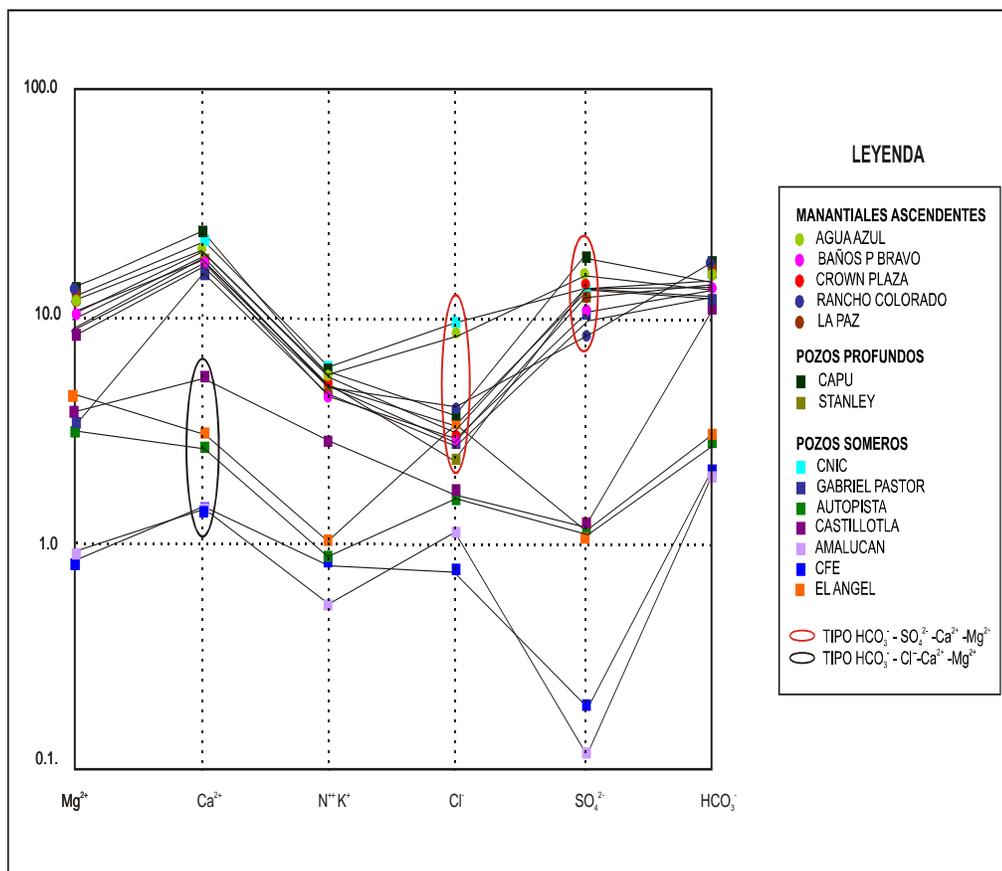


Figura 5.7. Diagrama de Shoeller. Se observan dos grupos: en el primero están los manantiales ascendentes, los pozos profundos y dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor), en el segundo grupo se encuentran el resto de los pozos someros.

Las relaciones entre los iones disueltos en un agua pueden guardar cierta relación con el terreno del que procede el agua o indicar la acción de fenómenos modificadores. Los datos que se emplean en este tipo de relaciones están en meq/L y se indican por medio de “r”.

Las relaciones rCa^{2+}/rMg^{2+} , rCa^{2+}/rSO_4^{2-} , rSO_4^{2-}/rCl^- , $rHCO_3^-/rSO_4^{2-}$, rCa^{2+}/rCl^- , rMg^{2+}/rCl^- , rK^+/rNa^+ son de utilidad para determinar que tipo de mineral se está disolviendo, si existe intrusión marina o no, así como para identificar aguas de diferentes flujos.

En la figura 5.8 se aprecia la relación rCa^{2+}/rMg^{2+} y rCa^{2+}/rSO_4^{2-} , los valores de la relación rCa^{2+}/rMg^{2+} próximos a 1 indican la posible influencia de terrenos dolomíticos ($CaMg(CO_3)_2$). La relación rCa^{2+}/rSO_4^{2-} es útil para identificar el origen del sulfato, la fuente de calcio puede ser yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), anhidrita ($CaSO_4$), calcita ($CaCO_3$) y dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), además los primeros son más solubles, por lo tanto valores menores a 1 indican disolución de yeso y/o anhidrita. Si la relación $rCa^{2+}/r(Ca^{2+}+SO_4^{2-}) > 0.5$, la fuente de calcio no es yeso, pueden ser carbonatos o silicatos.

Al obtener los valores para ambas relaciones, se llegó a la conclusión de que el posible origen de calcio son carbonatos, el origen del sulfato aún no es claro. Se puede observar que en ambas figuras se agrupan varios registros, éstos son los manantiales ascendentes, los pozos profundos y dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor) que aparecen encerrados en un círculo, es la misma tendencia que se observó en el diagrama de Piper.

Las relaciones $rHCO_3^-/rSO_4^{2-}$ y rSO_4^{2-}/rCl^- de la figura 5.9 permiten saber si existe intrusión marina o no. En el agua de mar la relación rSO_4^{2-}/rCl^- tiene un valor de 0.105, valores mayores indican intrusión marina; tanto el sulfato como los bicarbonatos determinan la salinidad del agua. Nuevamente se observa que en ambas relaciones se agrupan los mismos sitios: los manantiales ascendentes, los pozos profundos y dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor); en todos ellos el valor de $rSO_4^{2-}/rCl^- > 0.105$, no existe intrusión porque no hay agua de mar. El enriquecimiento tanto de bicarbonatos como de sulfatos en la relación $rHCO_3^-/rSO_4^{2-}$, indica un mismo origen para los sitios que se agrupan y posible mezcla de diferentes flujos en los restantes.

Las relaciones rCa^{2+}/rCl^- y rMg^{2+}/rCl^- son útiles para identificar el origen de cada uno de estos iones en el agua; el cloruro es resultado de la disolución de halita (NaCl), el calcio de la calcita ($CaCO_3$), anhidrita ($CaSO_4$) y dolomita ($CaMg(CO_3)_2$); el magnesio de estratos de dolomita. Se observa en ambas gráficas de la figura 5.10 un enriquecimiento de cloruros, a la vez que se enriquece en calcio y magnesio, sobre todo en los manantiales ascendentes, los pozos profundos y en dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor).

La relación rK^+/rNa^+ puede variar entre 0.001 y 1 en aguas dulces, para el agua marina vale de 0.02 a 0.025, debido a la fijación preferente de potasio en el terreno, esta relación es menor en el agua que en la roca origen, y tanto menor sea la relación, más concentrada en sales está el agua como se ilustra en la figura 5.11, los sitios encerrados en el círculo mantienen el mismo comportamiento que en las gráficas anteriores, al relacionarlos con la tabla 5.2 se comprueba que se trata de aquellos que tienen mayores concentraciones de sólidos disueltos, lo que confirma la teoría mencionada en líneas anteriores.

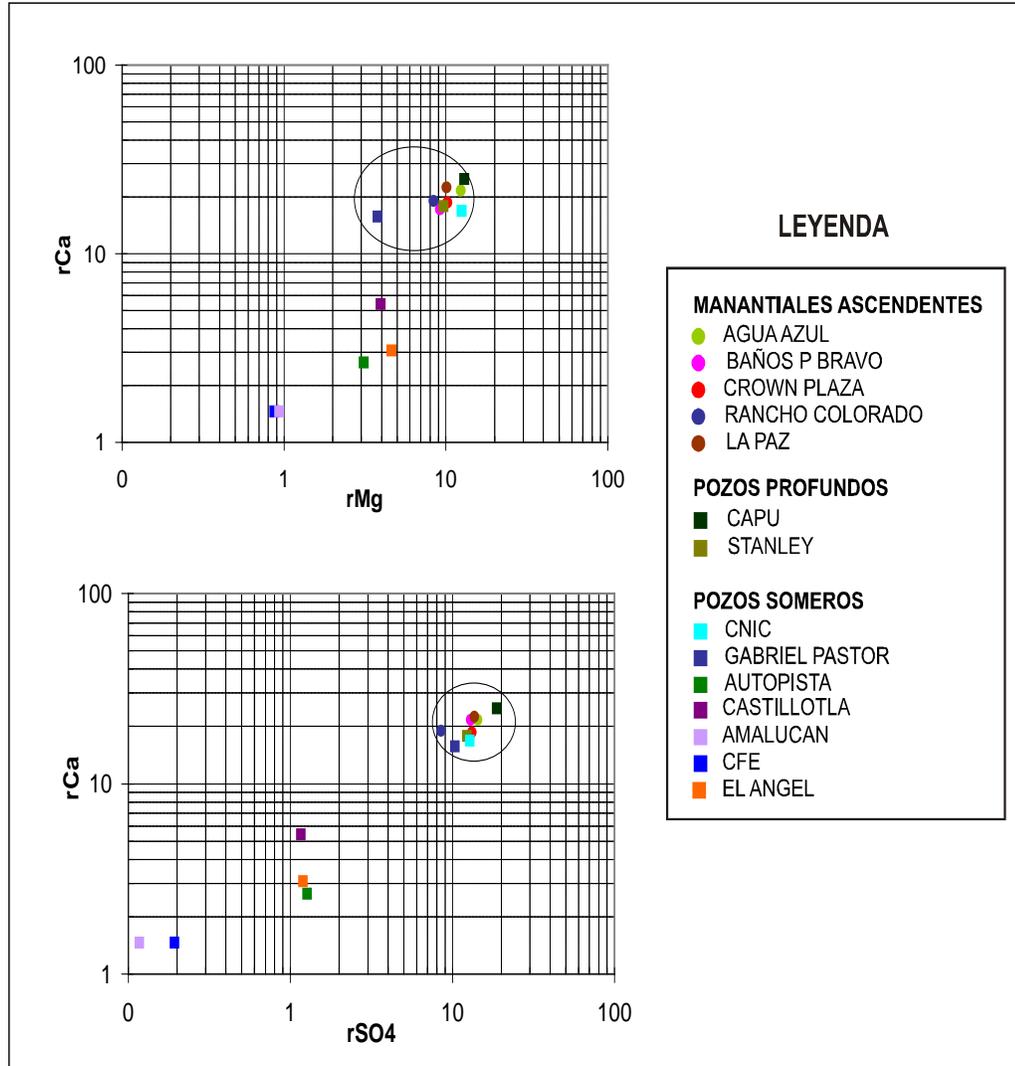


Figura 5.8. Relación rCa^{2+}/rMg^{2+} y rCa^{2+}/rSO_4^{2-} . En ambas se agrupan varios registros, éstos son los manantiales ascendentes, los pozos profundos y dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor) que aparecen encerrados en un círculo, es la misma tendencia que se observó en el diagrama de Piper.

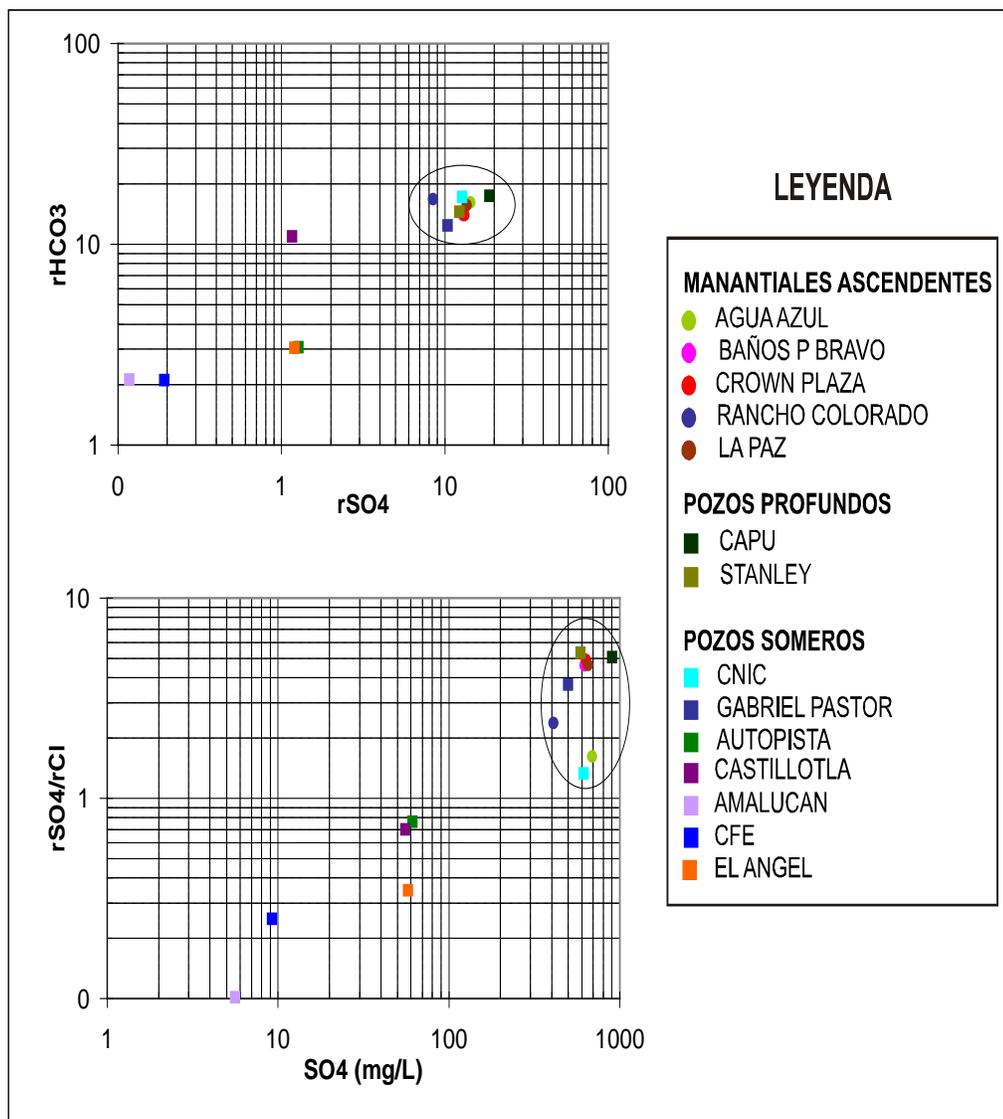


Figura 5.9. Relación $rHCO_3^-/rSO_4^{2-}$, y rSO_4^{2-}/rCl . Tanto el sulfato como el bicarbonato determinan la salinidad del agua, en todos los sitios el valor de $rSO_4^{2-}/rCl > 0.105$, esto indicaría intrusión marina, sin embargo no hay, por lo que la salinidad del agua puede deberse a evaporitas marinas. Los sitios agrupados reciben agua del mismo flujo.

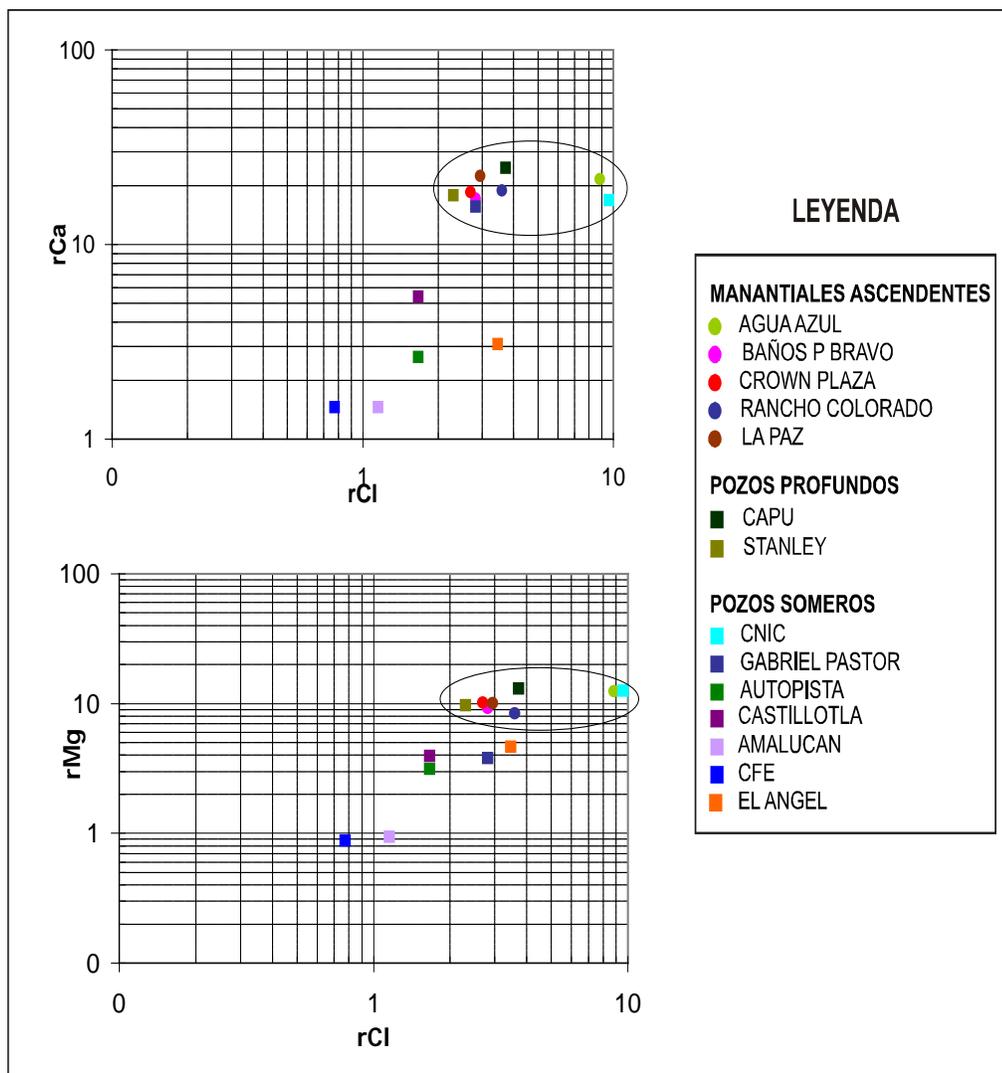


Figura 5.10. Relaciones rCa^{2+}/rCl y rMg^{2+}/rCl , útiles para identificar el origen de cada uno de estos iones en el agua. El cloruro es resultado de la disolución de halita, el calcio de la calcita, anhidrita y dolomita; el magnesio de estratos de dolomita. Se observa en ambas gráficas un enriquecimiento de cloruros, a la vez que se enriquece en calcio y magnesio, sobre todo en los manantiales ascendentes, los pozos profundos y en dos pozos someros (CNIC y Gabriel Pastor). Los sitios encerrados aportan agua del mismo flujo.

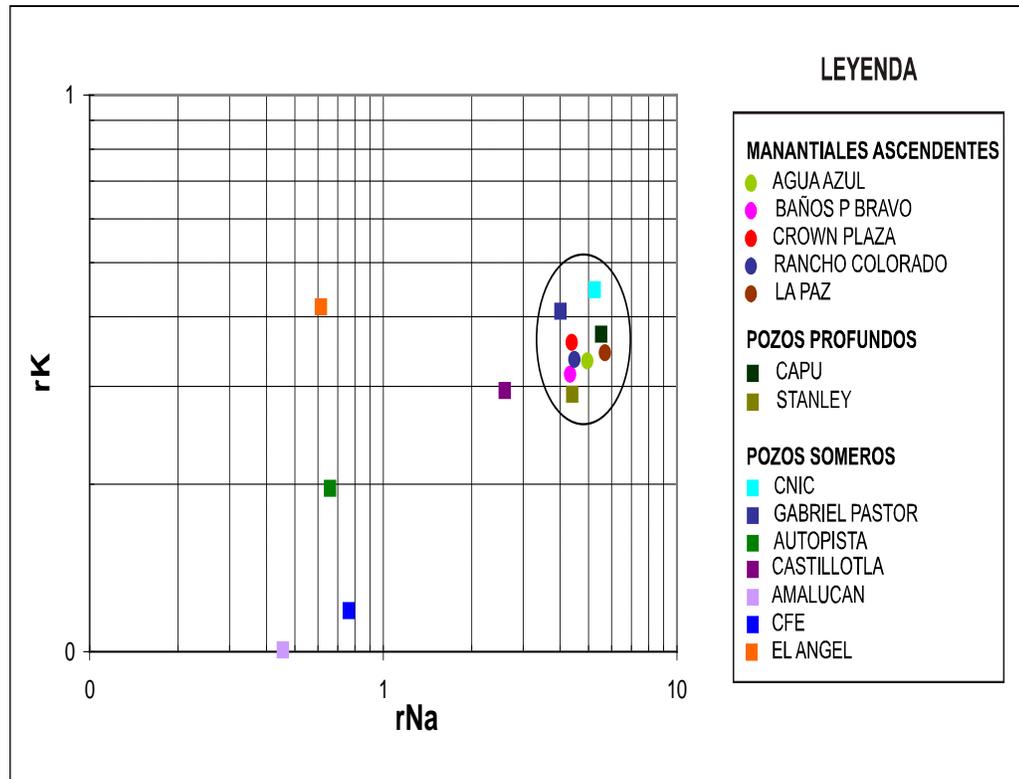


Figura 5.11. Debido a la fijación preferente de potasio en el terreno la relación rK^+/rNa^+ es menor en el agua que en la roca origen, y cuanto menor sea ésta más concentrada en sales está el agua. Los sitios encerrados en el círculo mantienen el mismo comportamiento que en las gráficas anteriores, se trata de aquellos que tienen mayores concentraciones de sólidos disueltos.

5.2.2 Análisis Factorial

En la aplicación del análisis factorial se consideraron los sólidos totales disueltos y los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- . La matriz de correlación para las siete variables se muestra en la tabla 5.4, se extrajeron 3 factores para representar la influencia de la contribución química en la composición del agua subterránea. El eigenvalor mayor corresponde al factor 1 con valor de 5.937 y varianza 84.789 %, el segundo factor es de 0.724 y varianza de 10.345 %, el tercero 0.196 y 2.8 % respectivamente. Los eigenvalores empleados deben ser cercanos o mayores a 1, aunque en este caso el tercero tiene un valor pequeño, se incluye para tener una mejor apreciación en el momento de relacionarlos con las variables y sitios muestreados.

Tabla 5.4. Matriz de correlación con las variables para la aplicación del análisis factorial.

	TSD	Mg ⁺	Ca ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
TSD	1.000						
Mg ²⁺	0.940	1.000					
Ca ²⁺	0.982	0.909	1.000				
Na ⁺	0.929	0.815	0.908	1.000			
SO ₄ ²⁻	0.961	0.921	0.973	0.877	1.000		
HCO ₃ ⁻	0.979	0.897	0.949	0.918	0.904	1.000	
Cl ⁻	0.548	0.594	0.427	0.541	0.447	0.489	1.000

En la tabla 5.5 se muestran los valores obtenidos para los eigenvalores, las varianzas y los factores extraídos. El factor 1 con una varianza del 84.789 % incluye a las variables Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , TDS y HCO_3^- , en orden de mayor a menor; el factor 2 tiene influencia solo del Na^+ y el factor 3 sólo de Cl^- ; como puede observarse las variables del factor 1 son las que caracterizan a las aguas del flujo profundo

Tabla 5.5. *Eigenvalores, varianzas, factores extraídos y variables que afectan a cada factor.*

Factor	Total	Varianza %	Varianza acumulada %	Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
F1	5.935	84.789	84.789	TSD	0.824	0.480	0.294
F2	0.724	10.345	95.134	Mg^{2+}	0.888	0.207	0.384
F3	0.196	2.800	97.935	Ca^{2+}	0.858	0.473	0.158
F4	0.087	1.242	99.177	Na^+	0.610	0.723	0.296
F5	0.041	0.592	99.769	SO_4^{2-}	0.887	0.375	0.189
F6	0.015	0.217	99.986	HCO_3^-	0.773	0.547	0.236
F7	0.001	0.014	100.000	Cl^-	0.222	0.171	0.959

Durante la aplicación de los factores a los sitios muestreados se obtiene un valor numérico para cada uno, que indica la influencia de cada factor, los valores son positivos y negativos, los positivos indican que el lugar está influenciado por el factor correspondiente, los negativos significan que no tienen ninguna influencia del factor que produce dicho valor. Se aplicó el método de rotación varimax con normalización KMO y prueba de Bartlett para extraer los factores de cada sitio, los valores obtenidos se muestran en la tabla 5.6.

Al analizar los valores se observa que se agrupan en 3 tipos, en el primero con valores positivos en el factor 1 se localizan los manantiales ascendentes los pozos profundos y el pozo CNIC, coincidiendo con los resultados de los análisis químicos. En el segundo grupo

se localizan los pozos someros CFE, Amalucan y Autopista presentan valores negativos en los tres factores, esto significa que ninguna de las variables es dominante en ellos, este segundo grupo de igual manera tiene correspondencia en la parte química y forman parte del flujo local; los pozos Gabriel Pastor, Castillotla y el Ángel no tienen influencia del factor 1, pero sí del factor 2 o factor 3, esto significa que las aguas que aportan son producto de la mezcla de ambos flujos.

La figura 5.12 muestra la influencia de cada factor sobre los sitios muestreados, se aprecia que los manantiales ascendentes y los pozos profundos son altamente influenciados por el factor 1, los pozos Amalucan, CFE y Autopista no tienen influencia positiva de ningún factor y los pozos Gabriel Pastor, Castillotla y el Ángel representan la mezcla entre los dos flujos al tener al menos un valor positivo, ya sea en el factor 2 o el factor 3.

Este análisis es muy congruente con la parte química, los dos tipos de agua son muy claros y los pozos que aportan aguas producto de la mezcla de los dos flujos también se pueden corroborar con la parte química, tan sólo en el total de sólidos disueltos el pozo Gabriel Pastor y Castillotla rebasan los 1000 mg/L, además, se localizan en los límites de la fosa Atlixco. Los pozos CFE, Autopista y Amalucan, pertenecen al tipo de flujo local, el Amalucan se localiza fuera de la fosa Atlixco, CFE y Autopista dentro de la fosa, próximos a estos dos se encuentran los pozos profundos CAPU y Stanley, ambos aportadores del flujo regional, el hecho de que CFE y Autopista no aporten aguas con altos contenidos de sulfatos se debe a que son someros y el agua que captan pertenece al acuífero libre.

Tabla 5.6. *Valor de los factores para cada sitio muestreado. Se observan 3 grupos, el primero en el factor 1 con valores positivos, el segundo con valores negativos en los tres factores y el tercero con un valor positivo en el factor 2 o 3.*

SITIO	F1	F2	F3
AGUA AZUL	0.718	-0.237	2.012
BAÑOS PASEO BRAVO	0.747	0.130	-0.472
CROWN PLAZA	0.990	-0.082	-0.528
RANCHO COLORADO	0.198	0.952	-0.174
BALNEARIO LA PAZ	0.666	1.092	-0.564
C A P U	1.670	0.074	-0.321
STANLEY	0.831	0.171	-0.682
C N I C	0.271	0.094	2.459
GABRIEL PASTOR	-0.379	1.251	-0.549
CASTILLOTLA	-0.860	0.495	-0.568
EL ANGEL	-0.357	-1.948	0.418
AUTOPISTA	-0.455	-1.488	-0.386
C F E	-0.918	-0.834	-0.781
AMALUCAN	-0.860	-1.101	-0.611

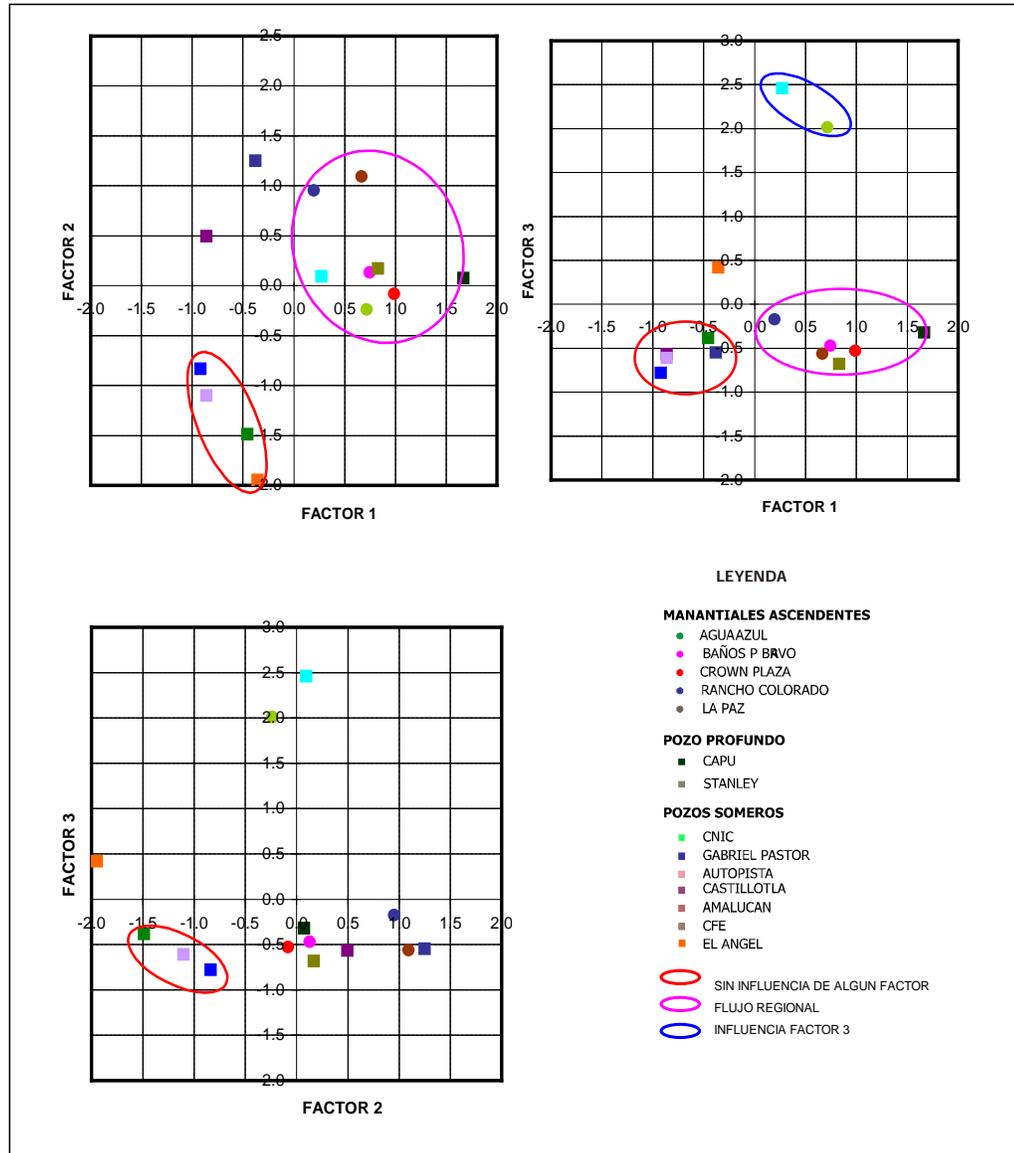


Figura 5.12. El flujo regional está influenciado por el factor 1 que incluye las variables Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , TSD y HCO_3^- ; se reproduce el comportamiento observado en las relaciones químicas, corroborando la existencia de dos tipos diferentes de agua, uno asociado al flujo regional y otro al flujo local. Los sitios que no tienen influencia del factor 1 pero sí del 2 ó el 3, son producto de la mezcla de los dos flujos, tal es el caso de los pozos someros Gabriel Pastor, Castillotla y el Ángel.

5.3 *Análisis isotópicos*

La realización de análisis isotópicos condujo a la obtención de valores $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ para todos los sitios muestreados, así como valores de $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del ion sulfato de las aguas de los manantiales ascendentes, pozos profundos y someros, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.7. En la figura 5.13 se muestra la relación entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ y la Línea Meteorica Global Mundial, cuya ecuación es $Y=8X+10$; las muestras analizadas se separan sobre la línea en tres grupos, los valores más empobrecidos en ambos isótopos corresponden a los que reciben agua recargada a mayor altitud que origina un flujo regional, los sitios que se agrupan en esta parte son los manantiales de montaña, dos manantiales ascendentes y un pozo profundo (Agua Azul, La Paz y CAPU, respectivamente); los valores más enriquecidos, que se ubican en la parte superior de la línea, tienen influencia de aguas recargadas a baja altitud que generan flujo local, en el centro se ubican los sitios cuya recarga está a altitudes intermedias entre los primeros y los últimos. Los sitios Rancho Colorado, Crown Plaza, Baños Paseo Bravo, CNIC y Gabriel Pastor aparecen entre la parte media y superior de la línea, esto parecería una contradicción con las relaciones iónicas revisadas anteriormente, sin embargo, no lo es; pertenecen al mismo tipo de agua del pozo CAPU y los manantiales Agua Azul y La Paz, sólo que presentan algún aporte del flujo local y es la firma de éste la que reflejan los resultados de los análisis isotópicos $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$.

Los valores para $\delta^{34}\text{S}_{\text{so}_4^{2-}}$ oscilan entre +8.55 y +17.46; los de $\delta^{18}\text{O}_{\text{so}_4^{2-}}$, entre +7.58 y +13.055. Al comparar estos valores con los mencionados en el capítulo III, se observa que no corresponden a una contribución marina o volcánica, tampoco biológica ni atmosférica, pero sí están dentro de los intervalos establecidos para las evaporitas, y dentro de la clasificación de Balderer, evaporitas de la era Mesozoica del período Triásico. Esto concuerda con el esquema general del sistema acuífero mostrado en la figura 5.5, en el que se menciona que la quinta capa del sistema acuífero está formada por depósitos evaporíticos marinos y que corresponden al tercer acuífero; lo cual significa que las altas concentraciones de sulfato en las aguas subterráneas se deben a la disolución de un estrato de evaporitas a una profundidad desconocida, por los cortes geológicos y sondeos eléctricos se infiere que debe estar a más de 400 m de profundidad.

Tabla 5.7. Valores de $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del ión sulfato así como $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ (SMOW) para cada uno de los sitios muestreados.

NOMBRE DEL SITIO	$\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ ‰ CDT	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4^{2-}}$ ‰ SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ SMOW	$\delta^2\text{H}$ ‰ SMOW
AGUA AZUL	15.730	12.235	-10.600	-74.540
BAÑOS PASEO BRAVO	15.285	10.070	-10.060	-71.055
H. CROWN PLAZA	8.550	10.100	-10.180	-70.090
RANCHO COLORADO	12.055	10.400	-9.730	-69.960
BALNEARIO LA PAZ	15.770	11.395	-10.570	-74.285
C A P U	16.410	11.660	-10.700	-74.085
STANLEY	16.490	10.715	-	-
C N I C	17.460	13.055	-	-
GABRIEL PASTOR	16.570	12.080	-9.610	-67.515
C F E	9.720	7.580	-9.720	-69.085
AUTOPISTA	12.795	10.705	-10.020	-72.990
EL ÁNGEL	13.000	11.590	-9.795	-71.620
CASTILLOTLA	17.040	13.040	-9.230	-65.625
AMALUCAN	12.330	11.555	-10.265	-71.160
ZOPILOCALCO	-	-	-10.520	-77.445
SAN PEDRO BENITO JUÁREZ	-	-	-10.890	-75.460
PRECIOSITA	-	-	-11.130	-79.655
AXOCOPAN	-	-	-11.760	-83.855
PIEDRA COLORADA	-	-	-10.820	-78.580
SAN BALTAZAR	-	-	-11.850	-81.220
SAN MARTÍN	-	-	-10.500	-76.960

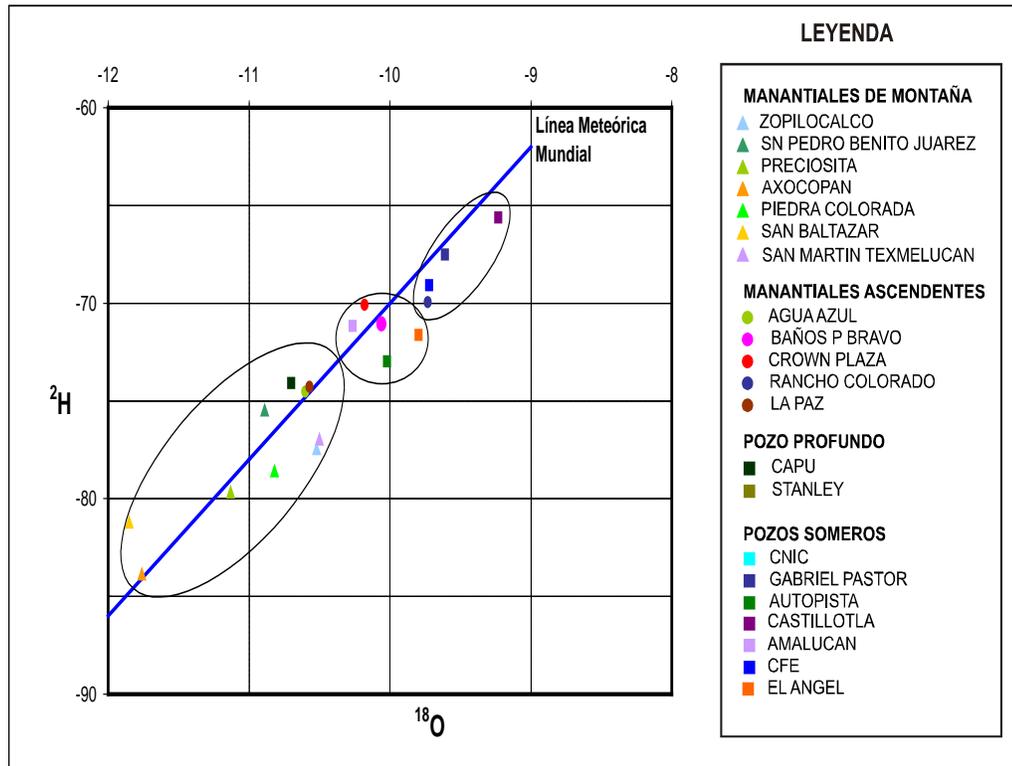


Figura 5.13. Relación $^2\text{H}-^{18}\text{O}$, se tienen tres grupos: los más empobrecidos tienen una recarga a grandes altitudes; la recarga de los más enriquecidos es a menor altitud y en la parte central a una altitud intermedia entre los inferiores y superiores. La Línea Meteorica Mundial se utilizó como referencia para situar los lugares muestreados.

La figura 5.14 presenta la relación entre $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4^{2-}}$, se observa que los sitios muestreados se agrupan en dos, los superiores corresponden a evaporitas del Triásico Keuper y los inferiores al Triásico Bunter, esto es de acuerdo a la clasificación de Balderer (1991); los valores menores a +20 indican que no existe reducción bacteriana en el estrato evaporítico. En el grupo inferior aparecen los pozos someros El Ángel, Amalucan, CFE y Autopista, sus valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4^{2-}}$ los sitúan dentro de la clasificación de Balderer, sin embargo, retomando los análisis químicos, estos sitios no rebasan la norma en cuanto a sulfatos y sólidos totales disueltos, por lo tanto el sulfato que contienen se debe a la disolución de pequeñas venas de material evaporítico, atrapadas por el magma y solidificadas junto con la lava durante el período de actividad volcánica en la zona.

El pozo somero Castillotla, que aparece en el grupo superior, aporta aguas de mezcla con el flujo que proviene del estrato evaporítico y el flujo local, como lo demuestran los análisis químicos y factorial, con altos valores de sólidos totales disueltos, de bicarbonatos y calcio, además de localizarse muy próximo a la fosa Atlixco. En base a los resultados de los análisis químicos e isotópicos se identificó como origen del sulfato a la disolución de evaporitas de dos formas diferentes: la primera como la disolución de ellas en el estrato evaporítico, formando el flujo regional y haciéndose presente en la superficie mediante los manantiales ascendentes, los pozos profundos y pozos someros CNIC, Gabriel Pastor y Castillotla, siendo la fosa Atlixco el mecanismo que permite el movimiento del acuífero inferior al superior. La segunda forma en la que participan las evaporitas como origen del sulfato disuelto en las aguas subterráneas, se debe a la disolución de venas evaporíticas atrapadas entre los materiales volcánicos del primer acuífero y están caracterizadas por las aguas de los pozos someros El Ángel, Amalucan, CFE y Autopista.

En la relación SO_4^{2-} y $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ de la figura 5.15 se puede distinguir el mismo comportamiento que en las relaciones iónicas, los sitios muestreados se agrupan en dos diferentes tipos de agua, los datos encerrados en el polígono corresponden a los manantiales ascendentes, los pozos profundos y dos pozos someros que descargan aguas del flujo regional proveniente del acuífero de evaporitas. Los que se localizan en la parte inferior y que presentan menos concentración de sulfatos, descargan aguas que circulan por el acuífero volcánico.

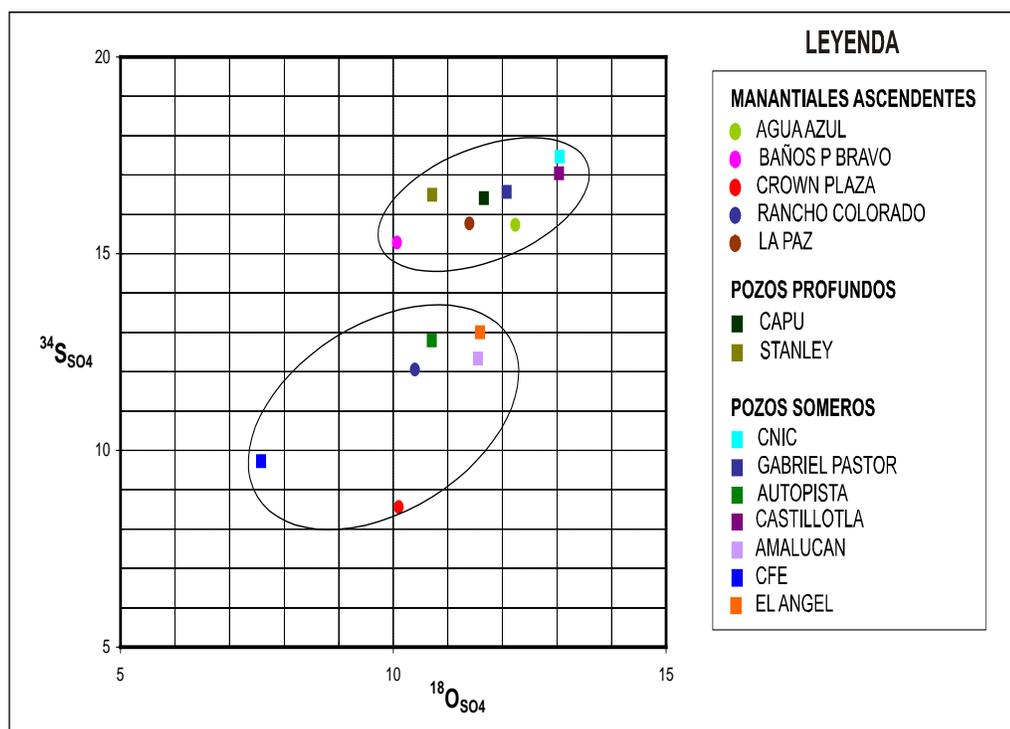


Figura 5.14. Relación entre los valores de $\delta^{34}S$ y $\delta^{18}O$ del ión sulfato. Los valores de $\delta^{34}S$ varían de +8.55 a +17.46, para $\delta^{18}O$ de +7.58 a +13.055. De acuerdo a los rangos de Balderer (1991), el origen del sulfato son las evaporitas marinas del Triásico. Los valores $\delta^{34}S < +20$ indican que no existe proceso reductor anaerobio en la capa donde se lleva a cabo la disolución de las evaporitas.

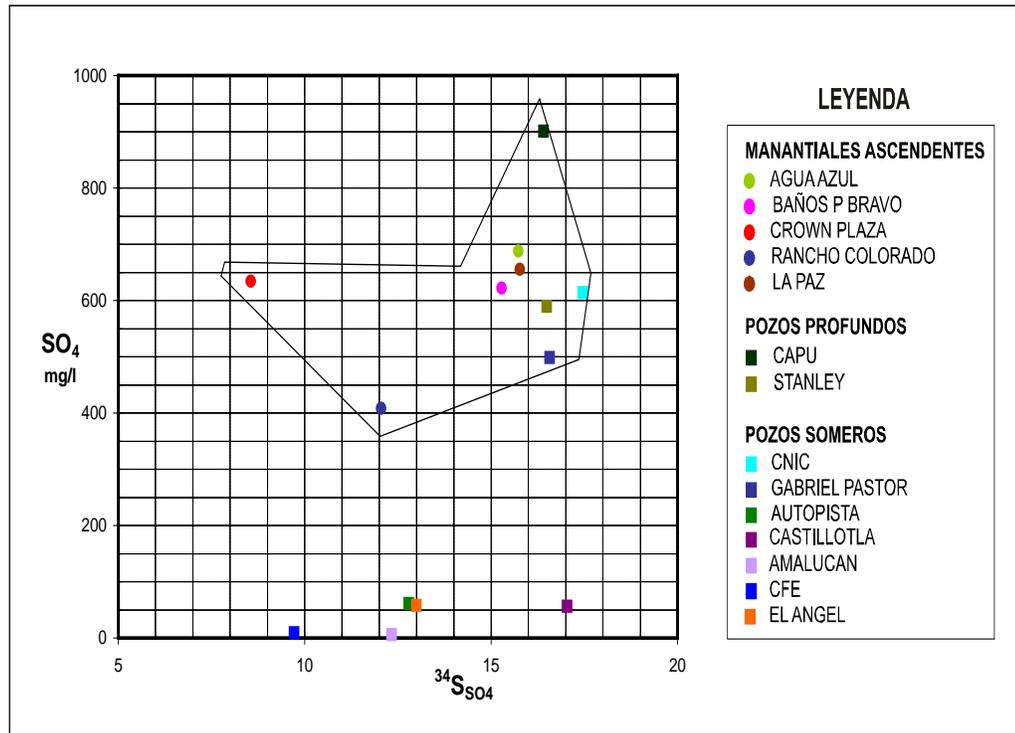


Figura 5.15. *Relación entre los valores de SO_4 y $\delta^{34}S$. Se observan dos tipos de agua, el que formado por los sitios encerrados que tienen sulfato de origen evaporítico y el resto cuyo origen es la disolución de materiales del acuífero superior.*

5.4 Revisión general de los resultados obtenidos

Las zonas de recarga de un acuífero constituyen un componente principal del sistema de flujo subterráneo. En el caso del acuífero del Valle de Puebla, topográficamente se tienen dos zonas de recarga, la primera es la Sierra Nevada y origina un flujo subterráneo que se mueve desde ella hasta la ciudad de Puebla. La segunda, corresponde al volcán La Malinche, el flujo subterráneo se mueve a partir del volcán y hasta la ciudad, ambos flujos se ilustran en la figura 5.16, ambos generan flujos regionales y locales en la zona. En los diagramas de Piper y Shoeller se hizo evidente la existencia del flujo regional y local, en el regional se agrupan los manantiales ascendentes, los pozos profundos y los pozos someros CNIC y Gabriel Pastor; todos ellos fuera de la norma en cuanto al contenido de sulfatos y sólidos totales disueltos. El segundo tipo está integrado por el agua de los pozos someros Amalucan, CFE, Autopista, Castillotla y El Ángel.

El primer tipo debe sus altas concentraciones de sulfato a las aguas del flujo regional que provienen del acuífero de evaporitas y asciende por la fosa Atlixco; el segundo tiene como origen del sulfato la disolución de venas evaporíticas existentes entre los materiales del acuífero volcánico por el que circula el flujo subterráneo. Por otro lado, se tiene que la cuenca topográfica no necesariamente coincide con la subterránea, además de que los manantiales y ríos son zonas de descarga de los flujos subterráneos, en Puebla se tienen varios manantiales ascendentes y un río en el lado Oeste de la ciudad, si la fosa no existiera, el río sería la zona de descarga del flujo subterráneo tanto del lado Oeste (Sierra Nevada) como del lado Este (La Malinche), y sus aguas serían la mezcla de ambos, como se muestra en la figura esquemática 5.17. Ahora bien, la fosa Atlixco modifica este sistema, creando una discontinuidad entre los flujos a ambos lados de ella, convirtiéndose ella misma en una zona de descarga y de mezcla de las aguas subterráneas, y el medio por el que más rápido puede circular el flujo subterráneo hacia la superficie, como se muestra en la figura 5.18.

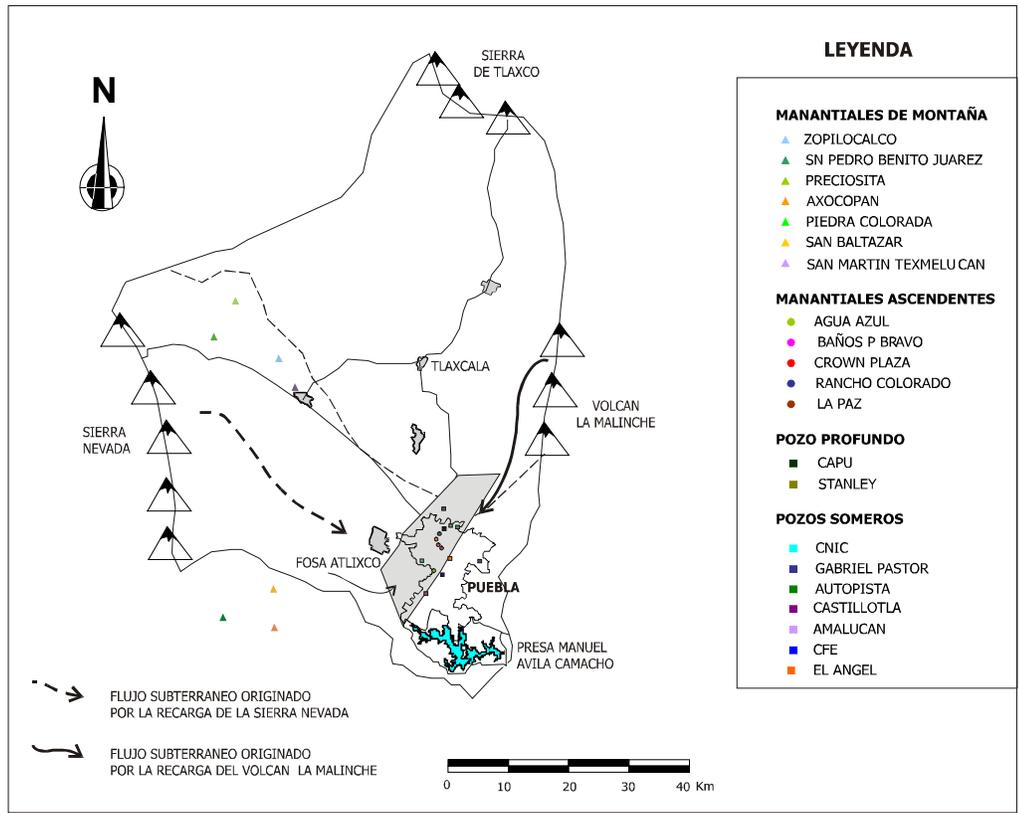


Figura 5.16. Se muestran los flujos subterráneos generados por la recarga en la Sierra Nevada y el volcán La Malinche, así como los sitios muestreados y la fosa Atlixco.

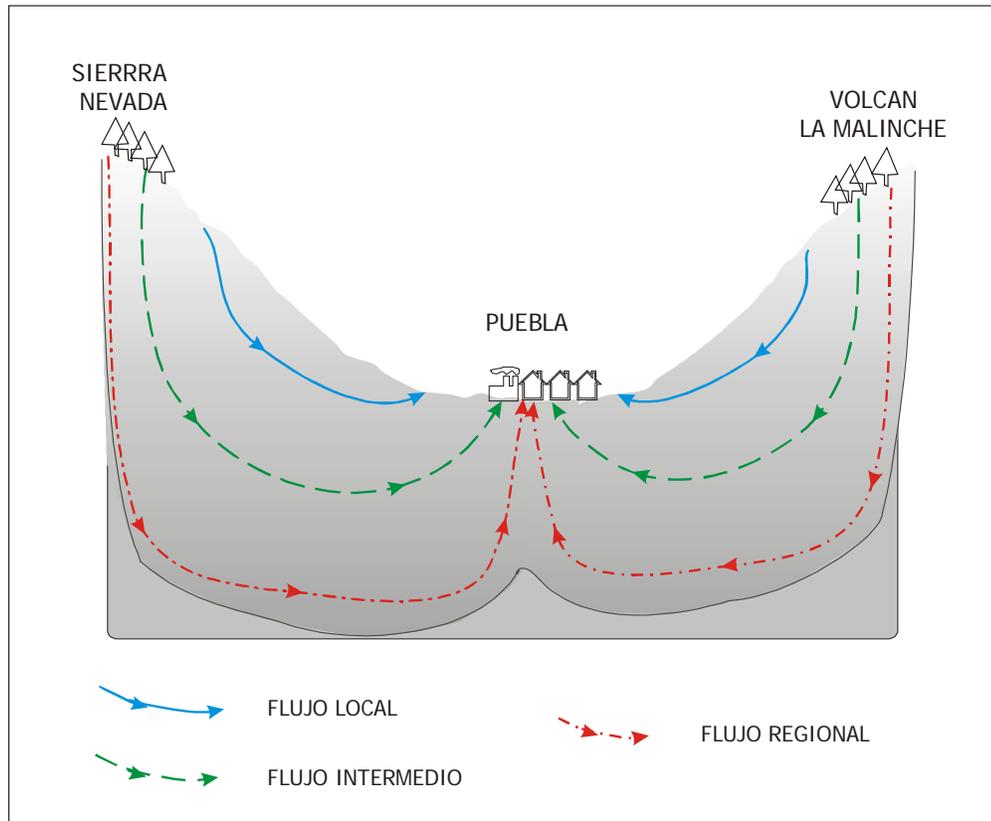


Figura 5.17. Esquema que muestra como sería el sistema de flujo en el valle de Puebla si no existiera la fosa Atlixco, no se considera la influencia de los acuitardos.

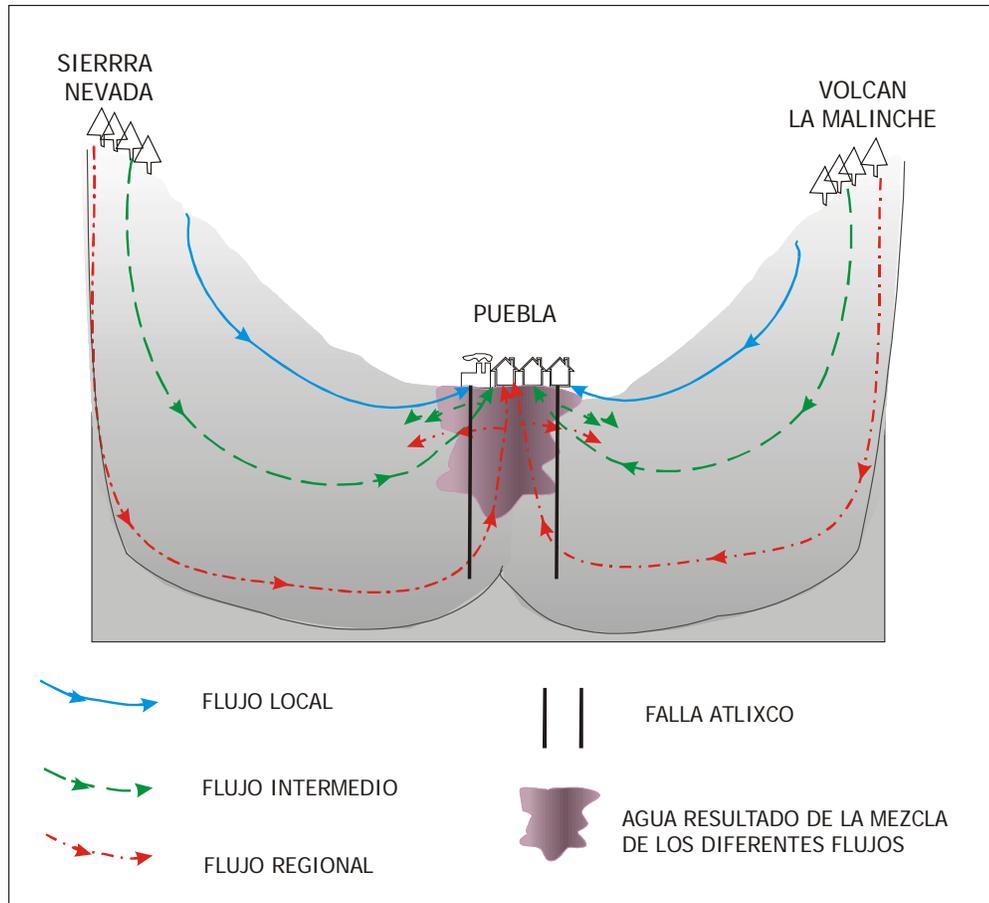


Figura 5.18. Esquema que muestra como se comporta en la actualidad el flujo subterráneo del sistema acuífero; la fosa Atlixco permite el ascenso y mezcla del agua del flujo regional, que es el que disuelve las evaporitas, con el flujo intermedio y el flujo local.

Los resultados de los análisis isotópicos ^{18}O y ^2H permitieron identificar, tres diferentes altitudes de recarga que se relacionan con dos tipos de agua, uno con altas concentraciones de sulfato y el otro con bajas concentraciones. Los sitios muestreados que descargan flujo regional corresponden a los manantiales de montaña, los manantiales ascendentes, los pozos profundos, y los pozos CINC y Gabriel Pastor, el último aportador de la mezcla del flujo regional y local; a excepción de los manantiales de montaña, son los que tienen las mayores concentraciones de sulfatos que tienen por origen la disolución de evaporitas en el acuífero inferior y el flujo asciende por la fosa Atlixco.

El flujo local está representado por los pozos someros Autopista, Amalucan, CFE, El Ángel, Castillotla y Gabriel Pastor; los dos últimos presentan altos contenidos de sólidos disueltos como resultado de la mezcla de sus aguas con las del flujo regional. No es fácil identificar el flujo intermedio ya que no se cuenta con características específicas de los pozos muestreados (profundidad, localización de la rejilla) lo mismo se puede decir en cuanto a separar el flujo subterráneo producto de la recarga en la Sierra Nevada del resultante de la recarga del volcán La Malinche, ya que no fue posible muestrear manantiales en las faldas de La Malinche así como pozos ubicados del lado Este de la ciudad de Puebla.

En las gráficas de las relaciones iónicas (figuras 5.8 a 5.11), se observó un mismo patrón de comportamiento, los manantiales ascendentes, los pozos profundos y los someros CNIC y Gabriel Pastor, están asociados en una misma tendencia, esto indicó que provenían del mismo sistema de flujo. Los resultados de los análisis isotópicos del ión sulfato lo confirman ya que en las gráficas correspondientes nuevamente se agrupan. Los puntos dispersos en las relaciones iónicas corresponden al flujo local.

Los resultados de $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del ión sulfato, indican que la fuente que origina las altas concentraciones de sulfato en las aguas subterráneas del flujo regional es la disolución de evaporitas marinas del Triásico. La profundidad de los estratos constituidos por evaporitas no está determinada exactamente, pero debe ser mayor a los 400 m de acuerdo al análisis hecho en los cortes geológicos y sondeos geoelectrónicos.

Los valores de $\delta^{34}\text{S}$ menores a +20 significan que en la capa donde se lleva a cabo la disolución de evaporitas, no existe reducción de sulfato por bacterias anaerobias; es posible que el H_2S se origine en las inmediaciones del estrato evaporítico por reducción bacterial, debido a la existencia de materia orgánica; es por eso que se percibe un olor desagradable en algunos sitios muestreados, cuyas concentraciones fluctúan entre 2.3 y 6.5 mg/L de H_2S . Se sabe que durante el proceso de reducción de sulfato a sulfuro, la concentración del sulfato disminuye y aumenta la del sulfuro, en este caso, las aguas del flujo regional deben tener concentraciones aún mayores a las detectadas, tanto que la reducción bacterial no es suficiente para que se aprecie una disminución del sulfato.

Capítulo VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación permitió alcanzar un grado de conocimiento muy importante sobre aspectos variados y desconocidos (al menos no documentados) de la hidrogeología de las aguas subterráneas del valle de Puebla. Estos nuevos conocimientos son el resultado de la aplicación de técnicas hidrogeoquímicas, de análisis multivariado e isotópicas que permitieron hacer una caracterización del sistema acuífero y establecer hipótesis bien fundamentadas acerca del comportamiento del mismo.

Los análisis químicos y el análisis multivariado muestran dos comportamientos diferentes, en el primero siempre se agrupaban los manantiales ascendentes, los pozos profundos y el pozo CINC y Gabriel Pastor, la razón es que todos ellos descargan agua del flujo regional, los pozos someros Amalucan, CFE y Autopista son aportadores del flujo local; los pozos, Castillotla y el Ángel son productores de la mezcla de flujo regional y local. La interpretación de las relaciones iónicas permitieron identificar disolución de dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, halita NaCl , andidrita CaSO_4 y yeso $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, que conforman a las evaporitas marinas.

Los resultados de los isótopos ^{18}O y ^2H , demuestran la existencia de los flujos regional y local, originados a diferentes altitudes de recarga. El flujo regional que presenta la mayor

concentración de sulfatos, confluye hacia la superficie a través de la falla Atlixco y las fracturas existentes en el acuífero, durante el ascenso se mezclan con las aguas del sistema de flujo local, llegando en ocasiones a ser dominantes las características del flujo regional.

Los isotópos ^{34}S y ^{18}O del ión sulfato fueron determinantes para identificar el origen del sulfato en las aguas subterráneas, los valores obtenidos se compararon con los representativos para las contribuciones volcánicas, orgánicas, meteóricas y marinas, encontrando que no tenían relación alguna por lo que se descartaron; se encontró que los valores estaban dentro del rango establecido por Balderer (1991). Se llegó a la conclusión de que la fuente natural de contaminación por sulfato en las aguas subterráneas del valle de Puebla son las evaporitas del período Triásico, esto fue un gran hallazgo, ya que se descarta el origen volcánico que predomina en los estudios anteriores, además de contribuir al conocimiento geológico de la zona, ya que demuestra la existencia de un estrato evaporítico que no aparece en ningún corte geológico. Así mismo, las condiciones prevalecientes en el acuífero muestran que no existe reducción bacteriana en la capa donde se diluyen las evaporitas, esto es, la disolución de evaporitas no se da de manera conjunta con la reducción de sulfatos, sino que suceden en niveles diferentes. La reducción bacteriana, que origina las altas concentraciones de sulfuros, es posible que se de en las inmediaciones del acuífero de evaporitas. El mecanismo de ascenso que representa la fosa Atlixco ha contribuido a tener mayor presencia del flujo regional en el acuífero superior.

El crecimiento urbano así como la industrialización cada vez mayor en la ciudad de Puebla ha traído como consecuencia la sobreexplotación de las aguas subterráneas, llevando de la mano el aumento de las concentraciones de sulfatos y sulfuros en las aguas extraídas. La sobreexplotación que existe en la zona, ha ocasionado el abatimiento de los niveles estáticos que aunado a la existencia de la fosa Atlixco y fracturas en el acuífero, ha permitido de manera natural el ascenso del flujo regional, que proviene de zonas profundas donde existen evaporitas, ocupando espacios que anteriormente eran de aguas de buena calidad, dando como resultado que varios pozos de la región sean aportadores de agua con altos contenidos de sulfatos por efecto de la mezcla de los diferentes flujos en el sistema.

De acuerdo a todo lo analizado en los capítulos anteriores, se pueden definir las siguientes recomendaciones.

1. Efectuar estudios detallados de la fosa Atlixco y su relación con el sistema de flujo subterráneo.
2. Establecer un modelo de flujo para determinar el tiempo de residencia del sistema de flujo y aportar elementos para la gestión de los recursos hídricos en el acuífero.
3. Establecer un estudio de zonificación de áreas sensibles a la contaminación natural y evaluar escenarios futuros de la explotación racional y sustentable del agua.

BIBLIOGRAFÍA.

- Alley, William M. (1993). *Regional Ground-Water Quality*. Van Nostrand Reinhold, N.Y. 634 pp.
- André Laurent, Franceschi Michel, Pouchan Pierre, Atteia Olivier (2002). *Origine et évolution du soufre au sein du Bassin aquitain*. *Journal Geoscience* 334. 749-756.
- Armijo M. V. y Bacaicoa J. M. (1984). *La salud por las aguas termales*. 1a. Edición, EDAF, México, D. F., 120 pp.
- Back W. (1966). *Hydrochemical facies and groundwater flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain*. United States Geological Survey, Professional Paper 498-A, 42 pp.
- Balderer W, Pearson jr F.J., Loosli H.H., Lehmann B.E., Matter A. Peters T., Schmassmann H, Gautschi A. (1991). *Applied isotope Hydrogeology*. *Studies in Environmental Science* 43.
- Berner Z A., Stüben D., Leosson M. A., Klinge H. (2002). *S- and O-isotopic character of dissolved sulphate in the cover rock aquifers of a Zechstein salt dome*. *Journal Applied Geochemistry* 17, 1515-1528.
- Bjørlykke K. (1996). *Lithological control on fluid flow in sedimentary basins*. In: *Fluid flow and transport in rocks - mechanisms and effect*. Jamtveit B. y Yardley B. W. (Eds.). Chapman & Hall, Inc., London, Great Britain. 2-34.
- Comisión Nacional del Agua (CNA 1990-1993). *Gerencia Estatal de Puebla, Subgerencia de Administración del Agua, Laboratorio del Departamento de Calidad y Reutilización del Agua*.
- Chebotarev I. I. (1955). *Metamorphism of natural waters in the crust of weathering*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 8, p. 22-48; 137-170; 198-212.
- Cherry, John (1987). *Groundwater occurrence and contamination in Canada*. (1987). *Canadian aquatic resources*. *Canadian bulletin of fisheries and aquatic sciences* 215, chapter 14. Healey, M.C. & Wallace, R.R. 386-426.
- Davis, S.N.; Campbell, D.J.; Bentley, H.W. & Flynn T.J. (1996). *Ground water tracers*. National Ground Water Association. Worthington, Ohio. 200 pp.
- Domenico P. A. (1972). *Concepts and models in groundwater hydrology*. 1st. Edition, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 405 pp.
- Domenico P. A. y Schwartz F. W. (1997). *Physical and chemical hydrogeology*. 2nd. Edition. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 824 pp.

- Doodge J. C. (1967). The hydrologic cycle as a closed system. In: Proceedings of International Hydrology Symposium, Sept. 6-8, Fort Collins, CO, USA, 98-113.
- Engelen G. B. (1986). Water systems, methodology and definitions. In: Developments in the analysis of groundwater flow systems. Engelen G. B. y Jones G. P. (Eds.), IAHS publication 163, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, England, 67-109.
- Fetter, C. W. (1999). Contaminant hydrogeology, second edition. Prentice Hall. New Jersey. 499 pp.
- Freeze R. A. y Cherry J. A. (1979). Groundwater. 1st. Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 604 pp.
- Fritz Peter & Clark Ian (1997). Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers. 328pp.
- Geyh, Mebus (2000). Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Volume IV Groundwater. Saturated and Unsaturated Zone. Unesco Paris 372 pp.
- Hair Joseph F., Anderson Rolph E., Tatham Ronald L., Black William C. (1998). Multivariate Data Analysis, Fifth Edition. Prentice Hall. 750pp
- Hounslow, Arthur W. (1995). Water Quality Data. Analysis and Interpretation. Lewis Publisher, New York. 393 pp.
- Hoefs, Jochen (1997). Stable Isotope Geochemistry. Springer-Verlag. Berlin. 201 pp.
- INEGI a. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2000). Síntesis Geográfica del Estado de Puebla. 124 pp.
- INEGI b. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Censo General de Población y Vivienda del año 2000.
- Jankowski J. y Jacobson G. (1989). Hydrochemical evolution of regional groundwaters to playa brines in Central Australia. Journal of Hydrology, v. 108, 123-173.
- Jeong Ho Chan (2001). Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea. Journal of Hydrology 253, 194-210.
- Jiménez Suárez, Gabriel (1999). Análisis hidrogeológico del Valle de Puebla. Trabajo de investigación A 37 pp.
- Jiménez Suárez, Gabriel (1999). Estudio geofísico del Acuífero del Valle de Puebla. Trabajo de investigación B 25 pp.
- Kasenow M. (1995). Hydrogeology and hydrogeochemistry of a northern bog. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, USA, 73 pp.

- Kendall, C. and McDonnell, J. J. (1998). *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 839 pp.
- Kehew, Alan E. (2001). *Applied Chemical Hydrogeology*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 523 pp.
- Krouse, H.R., (1980). Sulfur isotopes in our environment. En: Fritz, P., Fontes, J.Ch. (Eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry: 1. The Terrestrial Environment*. Elsevier, Amsterdam, 435-471.
- MacFarlane P. A., Doveton J. H., Feldman H. R., Butler J. J., Combes J. M. y Collins D. R. (1994). Aquifer/aquitard units of the Dakota aquifer system in Kansas: methods of delineation and sedimentary architecture effects on ground-water flow and flow properties. *Journal of Sedimentary Research*, v. B64, 464-480.
- Meyboom P., van Everdingen R. y Freeze R. A. (1966). Patterns of groundwater flow in seven discharge areas in Saskatchewan and Manitoba. *Geological Survey of Canada Bulletin* 147, 74.
- Mudd G. M. (2000). Mound springs of the Great Artesian Basin in South Australia: A case study from Olympic Dam. *Environmental Geology*, v. 39, n. 5, 463-476.
- Navarro, de León Ignacio (2005). *Análisis de estrategias de manejo integral del agua subterránea mediante modelación de flujo: cuenca de la Independencia, Guanajuato, México*. Tesis Doctoral. UNAM.
- Romero Macías Emilio (1996). *Investigación del Procesos de Salinidad Congénita en Aguas Subterráneas*. Grupo de Hidrogeología y Medio Ambiente. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Huelva. 25 pp.
- Schmitz J. Richard (1996). *Introduction to Water Pollution Biology*. Gulf Publishing Company, Houston. 320 pp.
- Shanley J. B., Pendall E., Kendall C., Stevens L. R., Michel R. L., Phillips P. J., Forester R. M., Naftz D. L., Liu B., Stern L., Wolfe B. B., Chamberlain C. P., Leavitt S. W., Heaton T. H., Mayer B., DeWayne C. L., Lyons W. B., Katz B. G., Betancourt J. L., McKnight D. M., Blum J. D., Edwards T. W., House H. R., Ito E., Aravena R. O. y Whelan J. F. (1998). Isotopes as indicators of environmental change. In: *Isotope tracers in catchment hydrology*. Kendall C. y McDonnell J. J. (Eds.), 1st. Edition, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 761-816.
- Subbarao C. Subbarao N.V. Chandu S.N. (1996). Characterization of groundwater contamination using factor analysis. *Journal Environmental Geology* 28, 175-180.
- Taylor, B.E., Wheeler, M.C., (1994). Sulfur and oxygen isotope geochemistry of acid mine drainage in the western United States: field and experimental studies revisited. En: Alpers, C.N., Blowes, D.W. (Eds.), *Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation*. ACS Symposium Series, vol. 550, 481-515.

- Tóth J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, v. 68, n. 16, 4795-4812.
- Tóth J. (1970). A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *Journal of Hydrology*, v. 10, 164-176.
- Tóth J. (1984). The role of regional gravity flow in the chemical and thermal evolution of groundwater. In: *Proc. of the first canadian/american conference on hydrogeology. Practical applications of ground water geochemistry*. Hitchon B. y Wallick E. I. (Eds.). Worthington, Ohio, USA, 3-39.
- Tóth J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, v. 7, n. 1, 1-14.
- Ueda A., Sakai S. (1984). Sulfur Isotope Study of Quaternary Volcanic Rocks from the Japanese Island. *Arc. Geochim Cosmochim Acta* 48:1837-1848.
- Usunoff E. J., Guzmán-Guzmán A. (1989). Multivariate analysis in hidrochemistry: an example of the use of factor and correspondence analyses. *Jornal Groundwater* vol. 27, no. 1, 27-34.
- Van Stempvoort, D.R., Krouse, H.R., (1994). Controls of d18O in sulfate. En: Alpers, C.N. Blowes, D.W. (Eds.), *Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation*. ACS Symposium Series, vol. 550, 446-480.
- Vázquez Sanchez E. Cortés A., Jaimes Palomera R., Fritz P., Aravena R. (1989) Hidrogeología isotópica de los valles de Cuautla y Yautepec, México. *Geofísica* vol. 28-2, 245-264
- Wallick E. I. (1981). Chemical evolution of groundwater in a drainage basin of Holocene Age, East Central Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, v. 54, 245-283.
- Wang Y., Ma T. Luo Z. (2001). Geostatistical and geochemical analysis of surface water leakage into groundwater on a regional scale: a case study in the Liulin Karst system, northeastern China. *Journal Hydrology* 246, 223-234.
- Williams R. E. (1970). Groundwater flow systems and accumulation of evaporate minerals. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 54, n. 7, 1290-1295.
- Yaalon D. H. (1963). On the origin and accumulation of salts in groundwater and soils in Israel. *Bulletin of Research Council of Israel, Section G*, v. G, n. 3, 105-131.
- Zeman A., Suchy V., Stejskal M., Janku J., Cermak J. y Turek K. (2000). Migration of fluids controlled by equidistant fracture systems: An example from Central Europe (Czech Republic, Slovakia and Austria). *Journal of Geochemical Exploration*, v. 69-70, 499-504.