

03095



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**INSTITUTO DE GEOFÍSICA
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**EXPLORACIÓN MODELO DE FLUJO Y TRANSPORTE
EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE PUEBLA**

T E S I S
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA
GABRIEL JIMÉNEZ SUÁREZ**

**DIRECTOR DE TESIS
DRA. ELSA L. FLORES MÁRQUEZ**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F.

DICIEMBRE 2005

M: 350385



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

A Paty, gracias por todo el apoyo y amor que me has dado,

A Hilda y Gabriel, ustedes fueron la razón para lograr esta meta.

A mi Madre, gracias por la vida, te adoro.

A mi familia ha sido fabuloso ser hermano de ustedes.

A mis sobrinos son una extensión de mis hijos.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: GABRIEL JIMENEZ SUAREZ

FECHA: 25/10/15

FIRMA: 

AGRADECIMIENTOS

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por su valioso apoyo, que espero retribuirle con mi mejor esfuerzo para generar conocimiento y formar mejores generaciones.

Mi más profundo agradecimiento a la Dra. Elsa L. Flores Márquez por su dirección, paciencia e interés científico.

De igual forma a los Drs. René Chávez segura, Raymundo Martínez Serrano, J. Oscar Campos Enríquez, Jaime Herrera Barrientos, Joel Carrillo Rivera por su amistad, asesoría, acertados comentarios y haber aceptado formar parte del jurado de revisión de esta tesis.

A los Drs. Martín Díaz Vieira, Alfredo Nicolás Carrizosa, por sus sugerencias para mejorar el desarrollo del modelo realizado en este trabajo.

Al Dr. Guillermo Hernández García por su invaluable y desinteresada ayuda, y sobre todo por su asesoría en el manejo del paquete computacional VISUALMODFLOW utilizado para el desarrollo del modelo.

Agradezco el apoyo económico de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por la beca que me otorgo para el desarrollo del Doctorado, a la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo a los proyectos PAEP (DGEP-UNAM) No. 2000-206308 y PAPIID (DGAPA-UNAM) No. IX103304 y IN107602 por el apoyo otorgado al desarrollo de los trabajos de campo realizados en la cuenca de Puebla.

Al Ingeniero Átalo Ortiz Ramírez (Comisión Nacional del Agua) por haberme sugerido el tema de tesis y proporcionarme gentilmente toda la información.

INDICE

CAPITULO I GENERALIDADES

| | | |
|-----|---------------------------------|---|
| 1.1 | Introducción | 1 |
| 1.2 | Aspectos socioeconómicos | 5 |
| 1.4 | Antecedentes y trabajos previos | 5 |
| 1.5 | Planteamiento del problema | 7 |

CAPITULO II PROSPECCION GEOELÉCTRICA

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Introducción | 9 |
| 2.2 | Origen de la información | 9 |
| 2.3 | Prospección geoeléctrica en la zona de Xoxtla | 10 |
| 2.4 | Unidades hidrogeológicas definidas por prospección geoeléctrica | 27 |
| 2.5 | Tomografía eléctrica | 28 |

CAPITULO III GEOLOGÍA DE LA REGIÓN

| | | |
|-----|--------------------|----|
| 3.1 | Introducción | 31 |
| 3.2 | Fisiografía | 31 |
| 3.3 | Geomorfología | 32 |
| 3.4 | Geología histórica | 33 |
| 3.5 | Geología general | 33 |

CAPITULO IV SISTEMA ACUÍFERO DE LA CUENCA DE PUEBLA

| | | |
|-----|-----------------------|----|
| 4.1 | Introducción | 40 |
| 4.2 | Conceptos básicos | 40 |
| 4.3 | Clima | 41 |
| 4.4 | Precipitación pluvial | 41 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.5 | Temperatura | 42 |
| 4.6 | Corrientes Superficiales | 42 |
| 4.7 | Composición del sistema Acuífero | 43 |
| 4.8 | Hidrodinámica del sistema acuífero | 46 |
| 4.8.1 | Identificación de los sistemas de flujo del acuífero | 47 |
| 4.8.2 | Zona de agua termal sulfhídrica | 48 |
| 4.9 | Nivel estático del agua subterránea | 51 |
| 4.9.1 | Evolución del nivel estático en la cuenca de Puebla | 52 |
| 4.10 | Balance hidrológico de la cuenca años 1973,2002 | 56 |
| 4.11 | Hidrogeoquímica conceptos básicos | 63 |
| 4.11.1 | Breve descripción química del acuífero freático en la Cuenca de Puebla | 64 |
| 4.10.2 | Breve descripción química del acuífero freático en la ciudad de Puebla | 67 |
| 4.11.3 | Breve descripción química del agua sulfhídrica en la ciudad de Puebla | 70 |
| 4.12 | Principales resultados del capítulo | 74 |
| 4.13 | Conclusiones del capítulo | 75 |
| 4.14 | Discusiones | 75 |

CAPITULO V

MODELO NUMÉRICO DE FLUJO Y TRANSPORTE DEL VALLE DE PUEBLA

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1 | Introducción | 77 |
| 5.2 | Conceptos básicos | 77 |
| 5.3 | Propiedades intensivas y extensivas del medio Continuo | 80 |
| 5.4 | Conservación de la masa | 81 |
| 5.5 | Marco teórico | 83 |
| 5.5.1 | Ecuaciones diferenciales parciales de flujo | 83 |
| 5.5.2 | Ecuación de transporte de masa | 84 |
| 5.5.3 | Condiciones iniciales y de frontera | 93 |
| 5.6 | Simulación numérica del sistema acuífero | 94 |
| 5.7 | Calibración del modelo | 107 |
| 5.7 | Interpretación de resultados | 113 |

Conclusiones generales 128

Recomendaciones 130

Referencias 132

ANEXO A

ANEXO B

RESUMEN

Se presenta la metodología para construir un modelo de flujo y transporte para comprender y analizar las causas que han originado que en los últimos 20 años se haya incrementado la presencia de agua termal sulfhídrica en el acuífero freático en una amplia zona de la ciudad de Puebla degradando la calidad del agua dulce contenida en dicho acuífero.

Por medio de la reinterpretación de la información geológica y geofísica existente y el análisis de la evolución piezométrica e hidrogeoquímica se propone el modelo hidrogeológico de la cuenca de Puebla, que consta de cuatro unidades hidrogeológicas.

El modelo hidrogeológico indica que en la ciudad de Puebla convergen tres sistemas de flujo cuyo origen son en el oeste la Sierra Nevada, en este el volcán la Malinche, y un sistema de flujo geotermal.

La concentración de calcita y magnesio, así como la temperatura y elementos químicos como boro y cloro en el agua subterránea manifiesta que existen sistemas de flujo de origen volcánico a través de calizas Cretácicas que forman la unidad hidrogeológica más profunda, y que por lo tanto, existe conexión hidráulica entre las unidades hidrogeológicas desde la más profunda hasta el acuífero superior.

En la ciudad de Puebla en pozos que penetran el acuitardo aproximadamente a 160 m de profundidad alumbran agua termal sulfhídrica con una fuerte presión ascendente, estos pozos se alinean en dirección noroeste sureste, sobre una posible fractura o falla tectónica.

Con base en el modelo hidrogeológico, se diseñó un modelo de flujo y transporte de masa utilizando el paquete comercial VISUAL MODFLOW para determinar las causas que originan que en la ciudad de Puebla agua termal sulfhídrica esté aumentando su presencia en el acuífero freático.

Los resultados del modelo indican que el abatimiento del nivel estático ha disminuido la presión hidrostática sobre la segunda unidad hidrogeológica (acuitardo) causando la pérdida de equilibrio hidráulico entre las unidades hidrogeológicas, esta pérdida de equilibrio, según el modelo de flujo ha traído como consecuencia el aumento de agua termal sulfhídrica en el acuífero freático.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El estado de Puebla está localizado en la región centro-este de la República Mexicana, tiene una superficie de 34,017.04 km². Limita al norte y este con el estado de Veracruz, al sur con el estado de Oaxaca y Guerrero, al oeste con los estados de Morelos, México, Tlaxcala, e Hidalgo (Figura 1.1)

La ciudad de Puebla capital del estado del mismo nombre, se localiza en el Altiplano Mexicano a 2162 m.s.n.m. a 120 km al oriente de la ciudad de México (D.F.), capital de la República Mexicana. La ciudad de Puebla se localiza en las coordenadas geográficas: 18°59'-19°6' latitud norte; 98°15'–98°13' longitud oeste. La región modelada de la cuenca de Puebla se encuentra entre las coordenadas 18°57'-19°21' latitud norte, 98°39'-98°01' longitud oeste. La Figura 1.2 presenta una vista general de la cuenca de Puebla en el que se incluye la Sierra Nevada y el volcán la Malinche así como las principales corrientes superficiales.

La ciudad de Puebla ha incrementado considerablemente su población en los últimos 20 años. Paralelamente ha registrado un considerable aumento en la actividad industrial, comercial y de servicios. También, pero en menor escala, todas las ciudades asentadas en el valle de Puebla han presentado un crecimiento demográfico y económico. La zona rural del valle de Puebla también ha registrado un crecimiento económico debido al incremento de la agricultura de riego. Lo anterior ha hecho que se incremente rápidamente la demanda de agua potable. Los beneficios de satisfacer esta demanda son evidentes en el desarrollo de las zonas agrícolas, e industriales, generación de empleos y en la disminución de la pobreza y la insalubridad de la población de las zonas marginadas.

El uso intensivo del agua subterránea en el valle de Puebla y principalmente en la ciudad del mismo nombre ha traído como consecuencia efectos negativos en el equilibrio del sistema acuífero. Estos efectos son el descenso del nivel freático y potenciométrico, que se refleja en la disminución del volumen de agua en manantiales, corrientes superficiales del valle, y menor calidad del agua, pero el

más significativo es la degradación de la calidad del agua dulce del acuífero libre debido al incremento de agua sulfhídrica en la superficie, contenida en unidades hidrogeológicas más profundas.

La presencia de agua termal sulfhídrica en el acuífero superior con altos contenidos de sólidos totales disueltos y mayor temperatura al mezclarse con el agua dulce, degrada la calidad de esta aumentando su concentración en sólidos totales disueltos.

La restauración de la calidad del agua en un acuífero suele ser un proceso largo y costoso y algunas veces técnicamente imposible (Llamas y Custodio, 1999) de ahí la importancia de proteger y prevenir cualquier tipo de daño al acuífero.

Para comprender el mecanismo de mineralización del agua del acuífero superior y proponer acciones que minimicen la mineralización se va a analizar el sistema acuífero por medio de un modelo numérico de flujo de agua y transporte.

Al sistema acuífero de la cuenca de la ciudad de Puebla la Comisión Nacional del Agua le denomina sistema acuífero del valle de Puebla, en lo sucesivo en este trabajo se denominará sistema acuífero de la cuenca de Puebla.

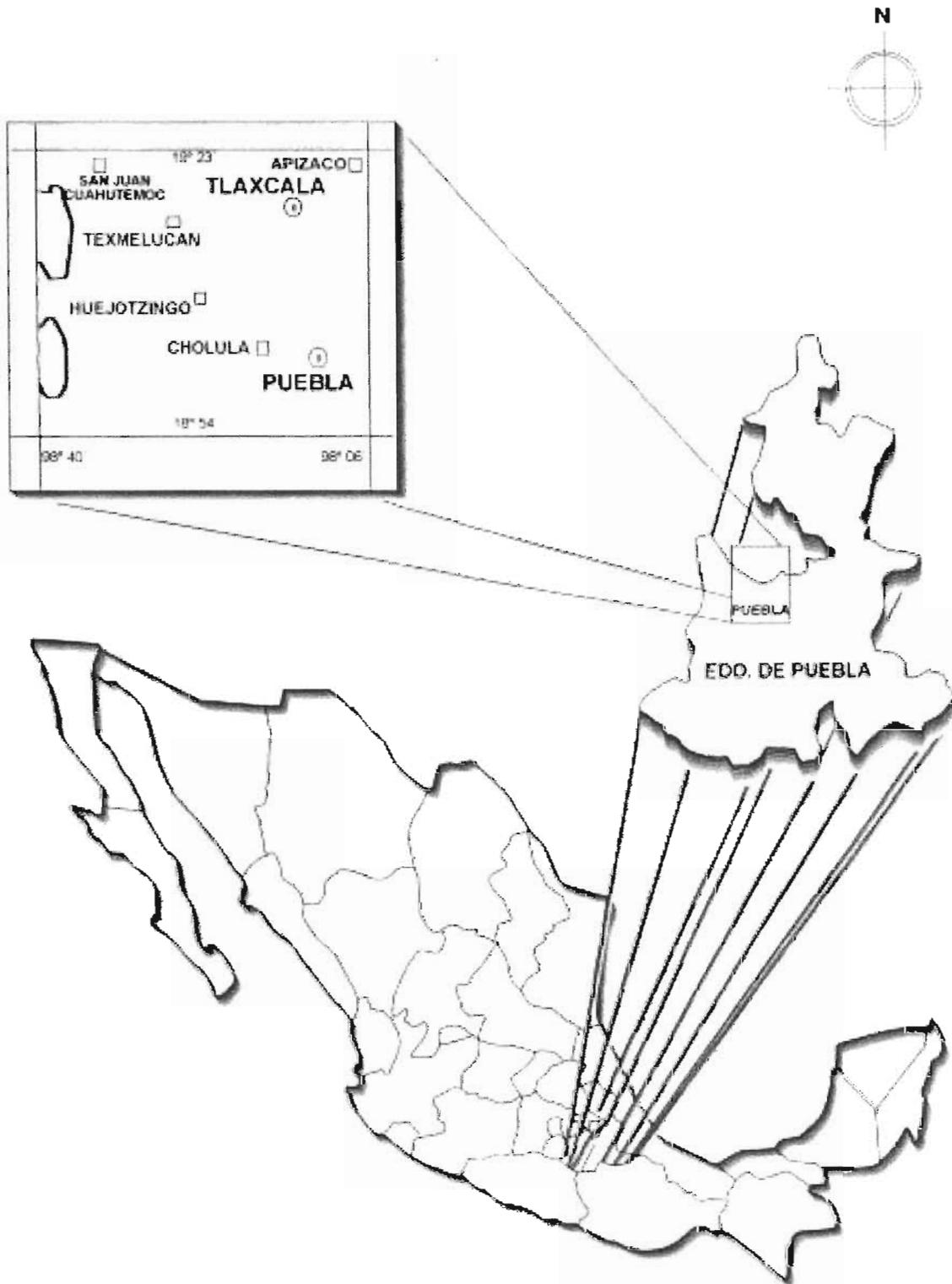


FIGURA 1.1 La región en estudio.

1.2 ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS

Las principales ciudades que se localizan en la cuenca son: Puebla, Tlaxcala, San Martín Texmelucan, Huejotzingo, Cholula. La cuenca de Puebla, se localiza entre los estados de Puebla y Tlaxcala, de acuerdo a la división político-administrativa de la República Mexicana, dos terceras partes del área de la cuenca pertenecen al estado de Puebla y el resto al estado de Tlaxcala; en la cuenca se asientan veintisiete municipios del estado de Puebla y quince municipios del estado de Tlaxcala.

La cuenca de Puebla es la región más densamente poblada de los estados de Puebla y Tlaxcala, lugar en donde viven aproximadamente 4 millones de personas, y es en donde se asienta el mayor corredor industrial de ambos estados.

La agricultura también es una actividad importante en la cuenca, los principales cultivos son: maíz, frijol, haba, alfalfa, manzanas, peras, etc., actividad que influye en la calidad y cantidad de los recursos hidráulicos subterráneos por el uso de fertilizantes y plaguicidas que alcanzan directamente el agua subterránea, y por la extracción de considerables volúmenes de agua para riego.

La ciudad de Puebla y zonas conurbadas se han convertido en un importante polo de desarrollo económico en la región centro del país. Por su actividad comercial e industrial y el número de habitantes (2.6 millones), la ciudad ocupa el cuarto lugar en importancia económica a nivel nacional.

1.3 ANTECEDENTES Y TRABAJOS PREVIOS

La degradación de la calidad del agua en la zona central de la ciudad de Puebla se empieza a notar a principios de los años ochentas, alcanzando niveles críticos a principios de la década de los noventa en que se clausuran aproximadamente 6 pozos por el alto contenido de sólidos totales disueltos y compuestos de azufre. El estudio más antiguo acerca del agua sulfhídrica son análisis físico-químicos hechos por la Comisión Nacional del Agua C.N.A. (1990) a 36 pozos ubicados en la zona de agua termal sulfhídrica, dichos análisis no fueron interpretados desde el punto de vista de la hidrogeología.

La cuenca de Puebla ha sido estudiada en su aspecto geológico-téctonico por Mooser, et al, (1996) el estudio muestra: la sucesión estratigráfica, y las fallas de origen tectónico. El Estudio de la Geología general de la cuenca de México D.F., (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), este estudio abarca una parte de la cuenca de Puebla, describe los eventos más importantes de su geología histórica, determina la sucesión crono-estratigráfica y describe la composición mineralógica de las rocas.

La empresa Geotecnología (1997), realizó pruebas de bombeo en 38 pozos ubicados en toda la cuenca. Por medio de recopilaciones describe la geología de

la cuenca de Puebla, bajo la asesoría de Mooser F., efectúa prospección geoelectrica a lo largo de 132 km que permite identificar estratos a profundidades de 300 m, y definió unidades geoelectricas más profundas de las que permite el alcance real de la investigación. Este estudio propone un sistema acuífero formado por cinco unidades hidrogeológicas:

- 1.) Acuífero libre.
- 2.) Acuífero formado por sedimentos lacustres limos y arcillas.
- 3.) Acuífero medio formado por rocas volcánicas.
- 4.) Acuífero formado por lutitas, margas y calizas (no registrado por ningún método de prospección, ni existe evidencia en superficie).
- 5.) Acuífero profundo formado por calizas de origen marino de edad Cretácica.

Geotecnología también describe un sistema de fallas paralelas que forman fosas tectónicas en el valle de Puebla que influyen significativamente en el sistema hidrogeológico, estas fosas no las registra Mooser et al (1996), (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989) ni existe evidencia geológica en superficie. El estudio incluye análisis físico-químicos del agua subterránea, clasificación de aguas; producto de una recopilación presenta el nivel estático para los años 1973, 1980, 1996, efectúa un modelo de flujo (utilizando VISUALMODFLOW) cuyas condiciones de frontera no representan el entorno hidrogeológico del área modelada, la conclusión del modelo es la de señalar áreas en las que se deben perforar pozos.

(C.N.A., 2002) en un grupo de pozos que denomina red piloto mide la profundidad del nivel estático en pozos ubicados en una franja localizada en el estado de Puebla.

Los estudios de estas empresas particulares fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (C.N.A.) delegaciones Puebla, y Tlaxcala.

El Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla (SOAPAP), proporcionó profundidades del nivel estático y estudios físico-químicos del año 1999, 2000, 2002, y 2004 de pozos ubicados en la ciudad de Puebla y municipios conurbados.

A la fecha, por parte de la Comisión Nacional del Agua, compañía particular o Institución de educación superior no se ha realizado ningún modelo de flujo y transporte de masa del sistema acuífero del valle de Puebla, cuyo objetivo sea explicar el incremento en el ascenso y propagación de agua termal sulfhídrica en el acuífero libre.

Se recopilaron, 40 columnas lito-estratigráficas de pozos agua potable, ubicados en la ciudad de Puebla.

Para esta tesis se efectuó prospección por tomografía geoelectrica en la ciudad de Puebla, con el apoyo financiero de la Dirección de Estudios de Posgrado de la UNAM, y con equipo de la Facultad de Ingeniería.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- 1) Análisis.** En el centro histórico de la ciudad de Puebla, en la zona localizada entre las coordenadas UTM norte-sur 2104000-211500, este-oeste 579000-585000, se encuentra agua termal sulfhídrica en un área de aproximadamente 50 km². A partir de la década de los ochentas se ha incrementado la concentración de sólidos totales disueltos en el agua sulfhídrica, lo cual ha originado una degradación en la calidad del agua extraída por los pozos localizados en la denominada zona de agua termal sulfhídrica, la concentración de sólidos totales disueltos medida en los pozos de dicha zona varía de 800 a 3800 mg/l. En la zona de aguas sulfhídricas existen 36 pozos de agua potable con un gasto de extracción de 25 a 35 l/s cada uno, en algunas zonas la concentración de compuestos químicos provenientes del agua sulfhídrica ha rebasado las normas de potabilidad (NOM-127-SSA-1994).
- 2) Hipótesis.** El abatimiento del nivel estático del acuífero superior en la zona de la ciudad de Puebla, es la causa de la ruptura del equilibrio hidrodinámico entre las unidades hidrogeológicas.
- 3) Comprobación de hipótesis.** Se Proponen los siguientes pasos:
 - a) Construir un modelo geológico simplificado de la cuenca de Puebla.
 - b) Determinar el funcionamiento hidrodinámico de cada unidad hidrogeológica y su interacción con las demás unidades.
 - c) Analizar la evolución del nivel estático y sus efectos en el sistema acuífero.
 - d) Analizar la composición físico-química del agua en la ciudad de Puebla.

La metodología por aplicar es:

- a) Recopilación de estudios previos: hidrogeológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos, revisión bibliográfica.
- b) Con base en la interpretación de los parámetros hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, y profundidades del agua subterránea, determinar el estado del sistema acuífero.
- c) Reconocimiento geológico de la zona, y prospección geoelectrica.

- d) Análisis, reinterpretación, integración y sistematización de toda la información.
 - e) Realización de un modelo geológico tridimensional que integre toda la información previa.
 - f) Simular el comportamiento del acuífero por medio del software comercial VISUALMODFLOW. Los resultados obtenidos serán calibrados con valores observados en campo para diferentes años.
- 4) Construir un modelo hidrogeológico** de la cuenca de Puebla y su representación numérica, con base en las ecuaciones diferenciales de flujo y transporte de masa para comprender las causas que en la ciudad de Puebla originan el aumento y transporte de agua termal sulfhídrica a través del acuífero freático, y prever la evolución espacial y temporal del flujo y transporte del agua termal sulfhídrica.

CAPITULO II

PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

2.1 INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos de prospección eléctrica permiten determinar el espesor, profundidad e inclinación de los estratos de un sitio, en función de los valores de resistividad eléctrica presentados por los materiales.

La medición de la diferencia de potencial eléctrico en el terreno se hace mediante un dispositivo de electrodos en línea; dos por medio de los cuales la corriente entra y sale C_1 y C_2 , y los otros dos P_1 y P_2 entre los cuales se mide la diferencia de potencial o de voltaje creada al paso de la corriente eléctrica por el subsuelo.

El propósito del sondeo vertical eléctrico SEV es estimar la distribución vertical de resistividades eléctricas del subsuelo bajo un punto. La mayor eficacia del método corresponde al caso en que los SEV se efectúan sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad, y limitadas por planos paralelos a la superficie del terreno (medio estratificado). La experiencia demuestra que los resultados teóricos obtenidos para medios de esta clase, son válidos para estratos con buzamiento hasta de unos 30° (Orellana, 1972).

La especificación de espesores y de resistividades de cada medio estratificado del tipo descrito, recibe el nombre de corte geoelectrico.

2.2 ORIGEN DE LA INFORMACIÓN

La ejecución de la prospección geoelectrica y la interpretación de los datos de campo fue realizada por la compañía Geotecnología, S.A. en el año 1997, como parte del estudio intitulado "Actualización del estudio Geohidrológico de los

acuíferos del Valle de Puebla, Pue. Realizado para el Sistema Operador del Sistema de Agua Potable del Municipio de Puebla, (SOAPAP). Proporcionados gentilmente por la gerencia estatal del Estado de Puebla de la Comisión Nacional del Agua.

El autor de esta tesis, en algunos casos difiere de las correlaciones e interpretaciones del estudio antes mencionado, en las secciones geoelectricas originales aparecen estratos a 500 m de profundidad, lo cual no es posible debido a la distancia de abertura de los electrodos. La descripción de las capas geoelectricas se hace de la superficie hacia abajo.

Las resistividades eléctricas de los materiales se correlacionan con la columna litoestratigráfica de algunos pozos de agua potable, levantamientos geológicos y afloramientos de materiales en la zona.

2.3 PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA EN LA ZONA DE XOXTLA Y BARRANCA HONDA

En las zonas de San Miguel Xoxtla y Barranca Honda se efectuó un programa de exploración del subsuelo por medio de 37 Sondeos Eléctricos Verticales, distribuidos en doce perfiles geoelectricos, algunos SEV son comunes a dos perfiles eléctricos en los puntos de intersección. El método usado es el arreglo tetraelectródico Schlumberger, (Orellana, 1972), la separación entre electrodos AB/2 fue de 1000 metros, debido a la conductividad eléctrica de los materiales se alcanzó una profundidad de investigación del orden de los 300 m. En la Figura 2.1 se presentan en planta las secciones geoelectricas y su ubicación.

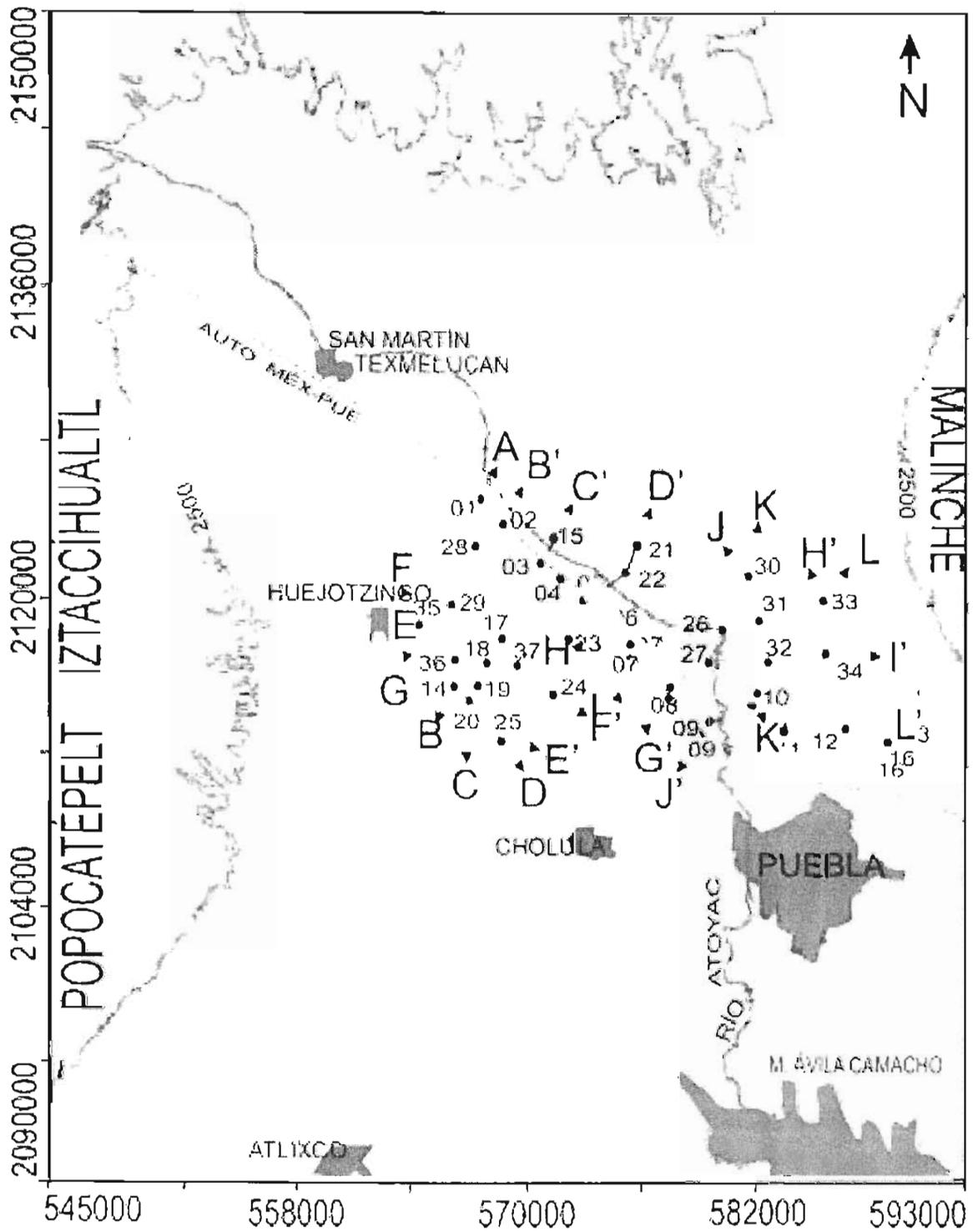


Figura 4.1. Ubicación en planta de los sondeos eléctricos verticales

2.3.1 Perfil geoelectrico A-A'

Tiene una longitud de 29.2 km, se construyó con los datos de 14 SEV; 1 a 13, y 16 ubicándose entre las poblaciones de Santa María Xalmimilulco, Pue., y San Pablo del Monte, Tlax. Los sondeos 1 a 9 se ubicaron a un costado de la autopista México-Puebla; los restantes 10,11,12,13,16, se ubicaron al norte de la ciudad de Puebla, (Figura 4.2). La profundidad del agua subterránea en esta sección varía de 10 m bajo el SEV 1, a 80 m abajo de los sondeos 10 a 13 ubicados al norte de la ciudad de Puebla en donde inicia la elevación del volcán la Malinche. La interpretación de los datos define las capas geoelectricas siguientes:

U_1 , presenta un rango de resistividad de 5 a 17 ohm-m, y un espesor aproximado de 15 m. Su resistividad eléctrica la clasifica como toba arcillo-arenosa.

U_1' , presenta un rango de resistividad de 36 a 128 ohm-m, tiene un espesor máximo de 80 m, registrada bajo los SEV 1-5, la profundidad del agua subterránea en esta capa es de 10 m, correlacionable con un estrato saturado de limos, arenas, y gravas del Cuaternario.

U_2 , presenta un rango de resistividad de 32 a 187 ohm-m, tiene un espesor máximo de 350 m abajo del SEV 12. La profundidad del agua subterránea es del orden de 80 m. Su composición básica son gravas saturadas de origen volcánico del Cuaternario.

U_3 , presenta una resistividad de 46 a 138 ohm-m, con un espesor máximo aproximado de 30 m registrada bajo el SEV 8, es correlacionable con arenas y gravas del Cuaternario.

U_3' , presenta una resistividad, entre 9 y 38 ohm-m, su máximo espesor es de 250 m, la profundidad del agua subterránea es de 10 a 30 m, se puede correlacionar con tobas limo-arenosas saturadas. A medida que se acerca a la sección geoelectrica U_4 disminuye su resistividad eléctrica.

U_4 , su resistividad varia de 3 a 12 ohm-m, se puede correlacionar con arcillas saturadas lacustres del Terciario y época Pliocénica Tpl. Su espesor es variable, y se infiere la presencia de fallas debido a la variación de profundidad de la sección geoelectrica definida.

U_5 , tiene un rango de resistividad entre 106 y 438 ohm-m correlacionable con materiales de edad Terciaria basaltos saturados fracturados, y materiales piroclásticos, aparece únicamente bajo los SEV 8-9.

U₇, su resistividad varía entre 1047 y 2582 ohm-m, se correlaciona con rocas calizas saturadas del Cretácico Ki, se registra únicamente abajo del SEV N0. 11. Debido al alcance de la investigación no se pudo determinar su espesor.

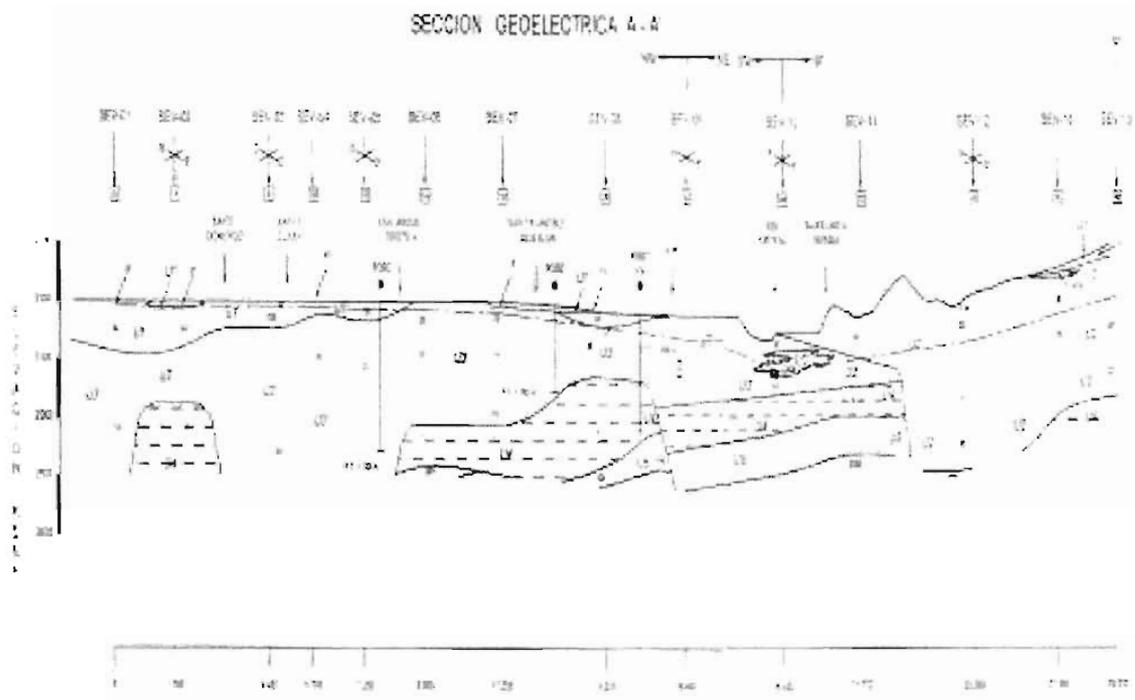


Figura 2.2. Sección geoelectrica A-A'.

2.3.2 Perfil geoelectrico B-B'

Es aproximadamente perpendicular a la sección geoelectrica A-A', se inicia en el SEV 14 al NW de la población de Santa María Zacatepec y termina en el entronque de la carretera federal México-Puebla a la entrada del aeropuerto Hermanos Serdán cerca de la ciudad de Huejotzingo, tiene una longitud de 11 km, La profundidad del agua subterránea es del orden de 20 m y está formada por los sondeos eléctricos verticales, 14, 36, 35, 29, 28 y 2, (Figura 2.3). Las capas geoelectricas determinada son:

U₁, se registró únicamente abajo del SEV 14, con un espesor aproximado de 70 m y un valor de resistividad de 22 ohm-m, por el valor de su resistividad eléctrica se

asocia con tobas arcillo-limosas del Cuaternario. Sin importancia desde el punto de vista geohidrológico.

U₁' , presenta un rango de resistividad de 17 a 21 ohm-m, tiene un espesor de 15-20 m, se registra bajo los SEV 28 y 2 se correlaciona con tobas arcillo-limosas de baja permeabilidad del Cuaternario, sin importancia desde el punto de vista geohidrológico.

U₃ , presenta resistividades de 44 a 153 ohm-m, presentando un espesor máximo de 150 m, correlacionable con arenas y gravas saturadas del Cuaternario.

U₃' , presenta resistividades de 16 a 25 ohm-m, se correlaciona con tobas arena, arcillo-limosas, saturadas su espesor medio es de 130 m.

U₄ , presenta un intervalo de resistividades entre 5-8 ohm-m, su profundidad es variable pero se encuentra a una profundidad mínima de 200 m, se correlaciona con arcillas saturadas lacustres del Plioceno Tpl.

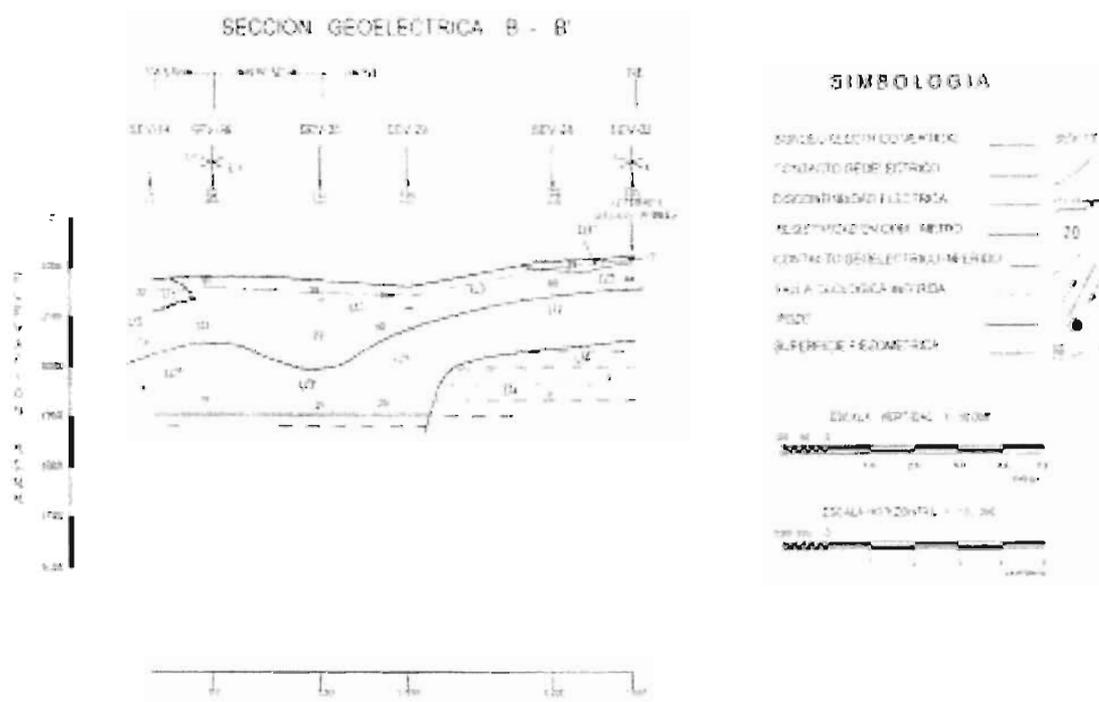


Figura 2.3. Sección geoelectrica B-B'.

2.3.3 Perfil geoelectrico C-C'

Tiene una longitud de 10 km, es perpendicular al perfil geoelectrico A-A' y paralelo al perfil geoelectrico B-B'. Se inicia en la poblacion de Santa Maria Zacatepec y termina 2.5 km al sur de la poblacion de Nativitas Tlax., intersectando al perfil geoelectrico A-A' en el SEV 3, se construyo con los sondeos 3, 15, 17 a 20.

La profundidad del agua subterranea en toda el perfil es de 10 a 20 m. (Figura 2.4). Las capas geoelectricas determinadas son:

U_1' , presenta un rango de resistividad de 17 a 49 ohm-m, correlacionable con materiales clasificados como limo-arenosos del Cuaternario, su espesor máximo es de 15 m, por su espesor y extension es de poca importancia desde el punto de vista geohidrológico.

U_3 , su resistividad eléctrica es de 34 a 128 ohm-m, su espesor máximo se estimó en 300 m abajo del SEV 3, correlacionable con depósitos de arenas y gravas saturadas del Cuaternario.

U_3' , su rango de resistividad es de 10 a 14 ohm-m, , tiene un espesor medio de 160 m, se correlaciona con tobas saturadas areno-arcillo-limosas del Cuaternario.

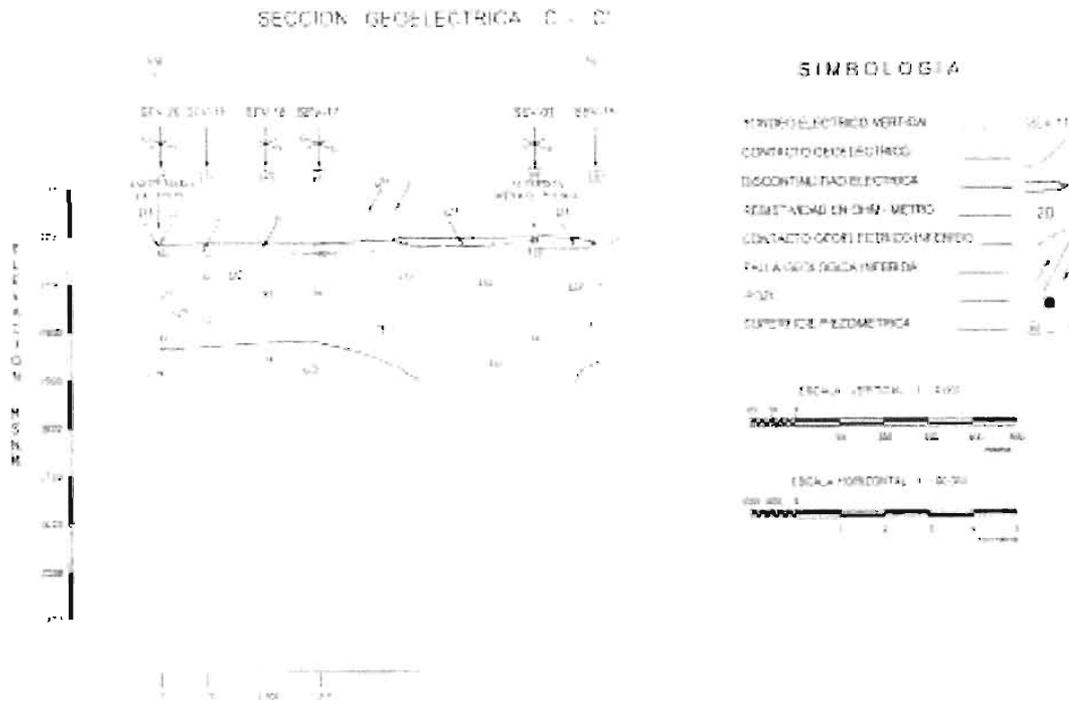


Figura 2.4. Sección geoelectrica C-C'.

2.3.4 Perfil geoelectrico D-D'

Este perfil geoelectrico se inicia en la Col. José Angeles y finaliza en la población de los Reyes, al SW de la población de Zacatelco Tlax., tiene una longitud de 12.95 km. Se construye con los SEV 25, 24, 23, 5, 22, 21. La profundidad del agua subterránea es de 10 a 20 m (Figura 2.5). Las capas geoelectricas determinadas son:

U_1' , se registró únicamente entre los SEV 23 al 21, con un intervalo de resistividad entre 25 y 75 ohm-m, tiene un espesor máximo de aproximadamente 90 m. Por el intervalo de su resistividad se correlaciona con gravas y arenas saturadas del Cuaternario.

U_3 , su intervalo de resistividad es de 31 a 100 ohm-m, se asocia con arenas y gravas saturadas del Cuaternario, tiene un espesor máximo de 110 m, abajo del SEV 25.

U_3' , es una variante de la unidad U_3 , presenta resistividades entre 11 y 30 ohm-m, y un espesor máximo de 220 m. Se correlaciona con tobas saturadas areno-limo arcillosas del Cuaternario.

U₃, presenta un intervalo de resistividad de 16 a 42 ohm-m. Su espesor máximo se estimó en 230 m abajo del SEV 35, se correlaciona con arenas y limos saturados del Cuaternario.

U₄, presenta un valor de resistividad de 6 ohm-m, correlacionable con sedimentos arcillosos saturados de origen lacustre Tpl del Plioceno.

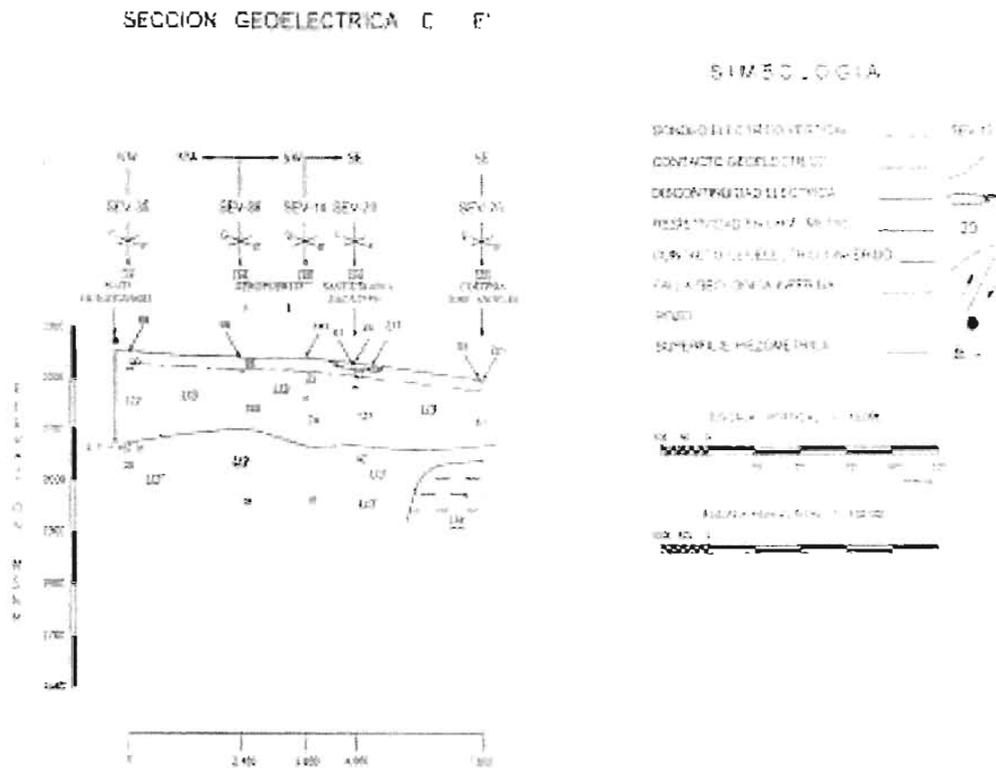


Figura 2.6. Sección geoelectrica E-E'.

2.3.6 Perfil geoelectrico F-F'

Se inicia al oriente de la ciudad de Huejotzingo y termina al SW de la población de San Antonio Mihuacan, su longitud es de 8.2 km. Se construyo con los SEV 35, 36, 18, 37,24. La profundidad del agua subterranea es de 20 a 30 m (Figura 2.7). Las secciones geoelectricas determinadas fueron:

U₃, presenta un intervalo de resistividad entre 41 y 53 ohm-m, y un espesor máximo de aproximadamente 170 m, se correlaciona con depósitos aluviales saturados del Cuaternario.

U₃', presenta un intervalo de resistividad entre 14 y 20 ohm-m, su espesor máximo es de aproximadamente 190 m, abajo del sondeo 35 y 36 acuñándose hacia el suroeste. Se correlaciona con tobas saturadas, arcillo-limosas del Cuaternario.

U₄, su resistividad es de 9 ohm-m, y es correlacionable con arcillas saturadas lacustres de edad Pliocénica Tpl.

U₅, presenta un intervalo de resistividades de 82-269 ohm-m; se correlaciona con rocas andesíticas saturadas, de edad Terciaria, se localiza a partir de 250 m de profundidad, únicamente aparece abajo del sondeo 24.

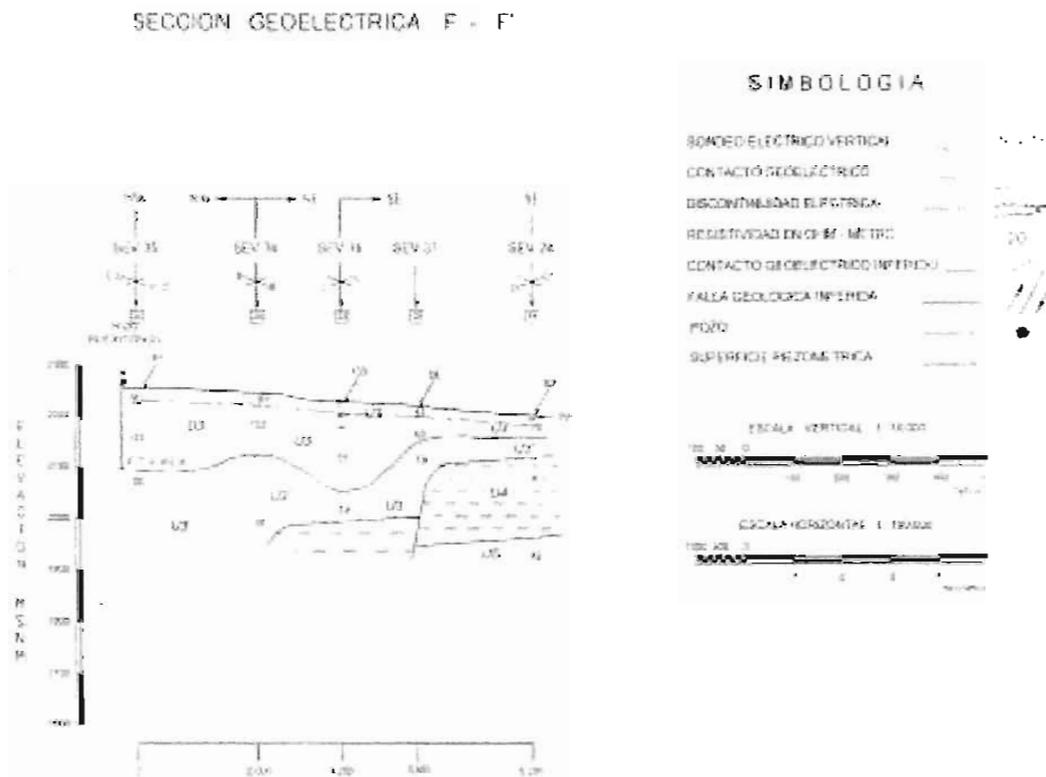


Figura 2.7. Sección geolétrica F-F'.

2.3.7 Perfil geoelectrico G-G'

Inicia al oriente de la poblaci3n de Huejotzingo y termina en la poblaci3n de San Francisco Ocotl3n, se construy3 con los sondeos 35, 17, 23, 6, 7, tiene una longitud total de 12.3 km. La profundidad del agua subterr3nea es de 10 a 20 m. identific3ndose cinco capas geoelectricas, (Figura 2.8).

U₃, su rango de resistividades es de 22 a 122 ohm-m, su espesor m3ximo es de 170 m detectado abajo del SEV 35. Es correlacionable con arenas y gravas del Cuaternario.

U₃', presenta un rango de resistividad de 16 a 42 ohm-m, correlacionable con tobas saturadas areno-limosas del Cuaternario.

U₄, presenta resistividades de 3 a 9 ohm-m, correlacionable con arcillas saturadas de origen lacustre del Plioceno Tpl.

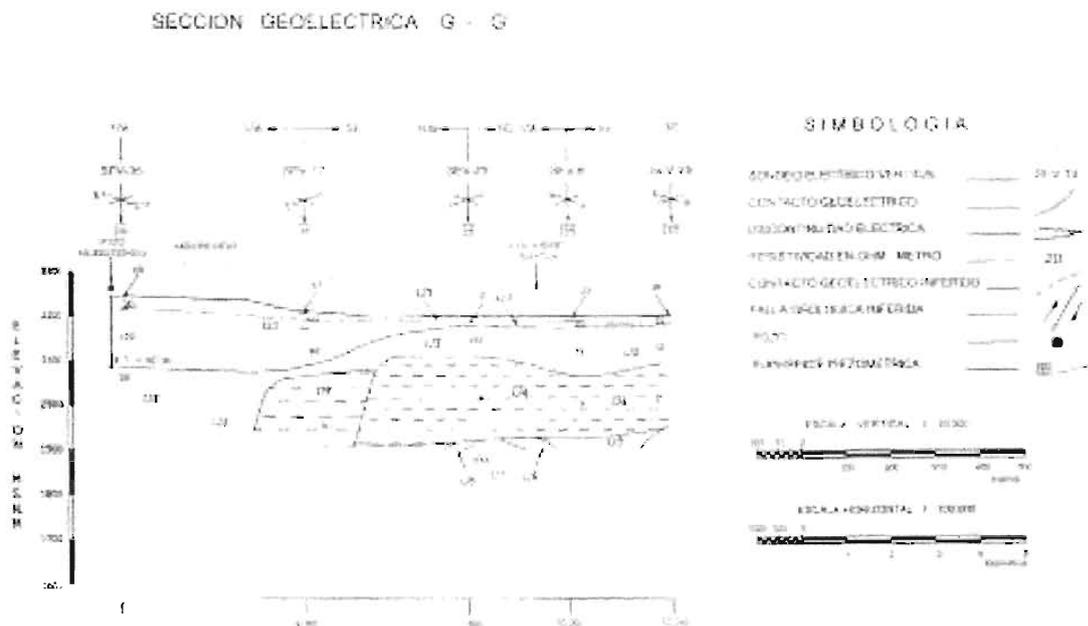


Figura 2.8. Secci3n geoelectrica G-G'.

2.3.8 Perfil geoelectrico H-H'

Esta sección se inicia en la población de San Francisco Ocotlán y termina al sur de la población de José María Morelos y Pavon, se construyo con los sondeos 7,26,31,33, longitud 10.35 km, la profundidad del agua subterránea es de 20 m excepto en el sondeo 31 que es de 70 m (Figura 2.9). Las secciones geoelectricas determinadas son:

U₁'. Se detectó bajo los sondeos 7, 26, 31, presentando resistividades entre 26 y 38 ohm-m, con un espesor máximo de 25 m. Se asocia con materiales limo-arcillosos, pertenecientes al Cuaternario.

U₂. Se detecto únicamente abajo de los SEV 31, 33, con resistividades entre 136 y 704 ohm-m; tiene un espesor máximo de 120 m. La resistividad más alta se ubica arriba del nivel freático. Por el valor de sus resistividades se asocia con basaltos y escorias volcánicas, secas y saturadas.

U₃'. Presenta resistividades entre 13 y 30 ohm-m, espesor mayor a 220 m. Se correlaciona con tobas arcillo-limosa saturadas del Cuaternario.

U₄. Presenta una resistividad de 3 ohm-m, se correlaciona con arcillas saturadas de origen lacustre del Plioceno Tpl, debido al alcance de la investigación no se pudo determinar su espesor.

U₅. Debido al alcance de la investigación solo se registra un pequeño espesor de aproximadamente 20 a 30 m, abajo del sondeo eléctrico vertical 07. Esta capa geoelectrica presenta un intervalo de resistividad de 104 a 395 ohm-m, correlacionable con gravas y boleos saturados de origen volcánico del Terciario.

U₄, presenta una resistividad de 7 ohm-m, por lo que se ha correlacionado con sedimentos arcillosos saturados de origen lacustre del Plioceno Tpl, su espesor es de aproximadamente 200 m.

U₅, presenta una resistividad del orden de 104 ohm-m, que se asocia con rocas fracturadas de tipo andesítico saturadas del Terciario, su espesor no se pudo determinar debido al alcance de la investigación.

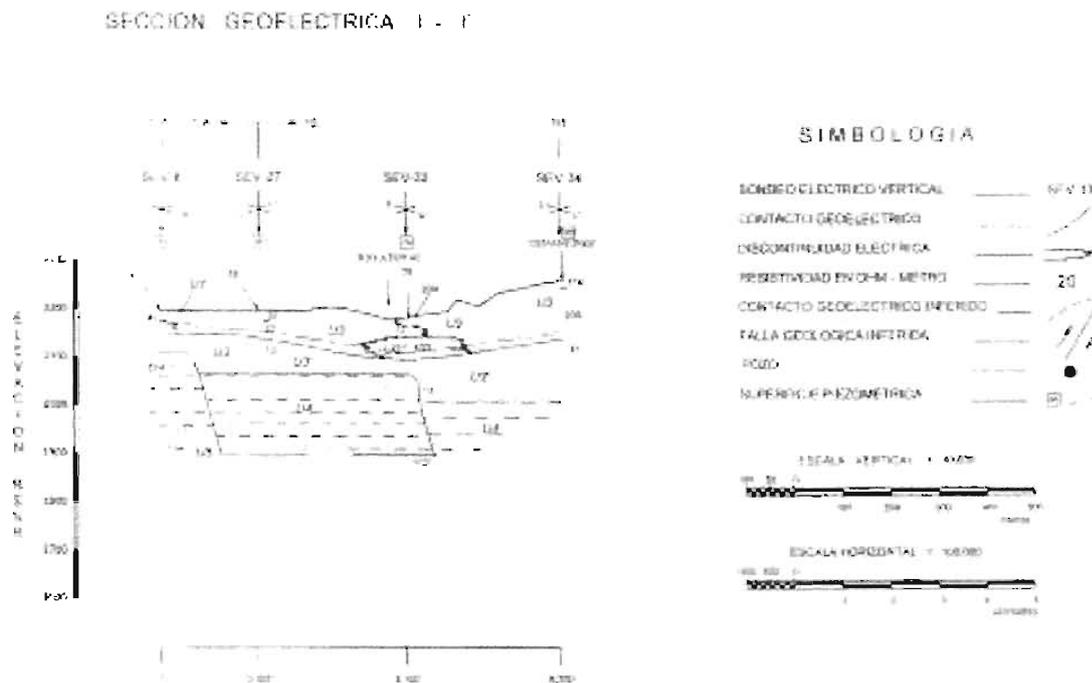


Figura 2.10. Sección geoelectrónica I-I'.

2.3.10 Perfil geoelectrónico J-J'

Esta sección se inicia desde Santo Toribio Xicotzingo y termina en la planta automotriz Volkswagen, tiene una longitud de 7.45 km, se construyó con los sondeos 09, 30, 26, 27. La profundidad del agua subterránea en toda la sección es de aproximadamente 50 m. (Figura 2.11). Las capas geoelectrónicas determinadas son:

U₁, presenta un intervalo de resistividad de 19 a 44 ohm-m, tiene un espesor máximo de 30 m. Se correlaciona con limos y arenas finas del Cuaternario.

U₃, presenta un intervalo de resistividad comprendido entre 9 y 14 ohm-m, se correlaciona con tobas arcillo-limosas saturadas del Cuaternario. Su espesor es variable de 100 a 300 m.

U₄, presenta un rango de resistividad de 4 a 8 ohm-m, correlacionable con sedimentos arcillosos saturados de origen lacustre del Plioceno Tpl.

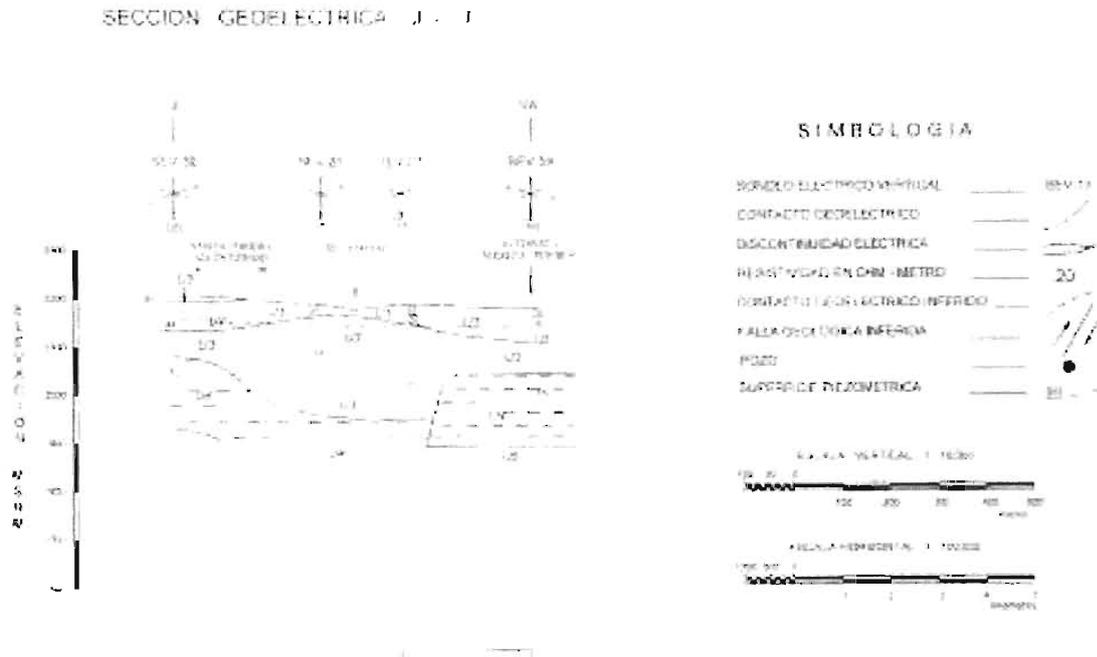


Figura 2.11. Sección geoelectrica J-J'.

2.3.11 Perfil geoelectrico K-K'

Se inicia en Santo Toribio Xicotzingo y termina en la población de Ignacio Zaragoza, tiene una longitud de 5.9 km. Se construyo con los sondeos 30, 31, 32, 10. La profundidad del agua subterránea es de 50 a 80 m (Figura 2.12).Las capas geoelectricas determinadas son:

U₂, presenta un intervalo de resistividad de 44 a 204 ohm-m, su espesor máximo es de 170 m y se registro abajo del SEV 31. La mitad de la capa se encuentra arriba del nivel del agua subterránea y la otra bajo el nivel del agua subterránea. No se observa diferencia entre la resistividad del material saturado y el seco. Se correlaciona con materiales como arenas, gravas y basaltos fracturados.

U₂’, se registro únicamente abajo del SEV 10, presenta una resistividad comprendida entre 432 y 1098 ohm-m misma que se correlaciona con travertino de origen hidrotermal.

U₃’, presenta un intervalo de resistividad de 13 a 25 ohm-m, correlacionable con tobas saturadas, y arcillas-limosas del Cuaternario.

U₄, presenta una resistividad de 4 ohm-m, y se correlaciona con sedimentos arcillosos saturados de origen lacustre, de edad Pliócenica Tpl.

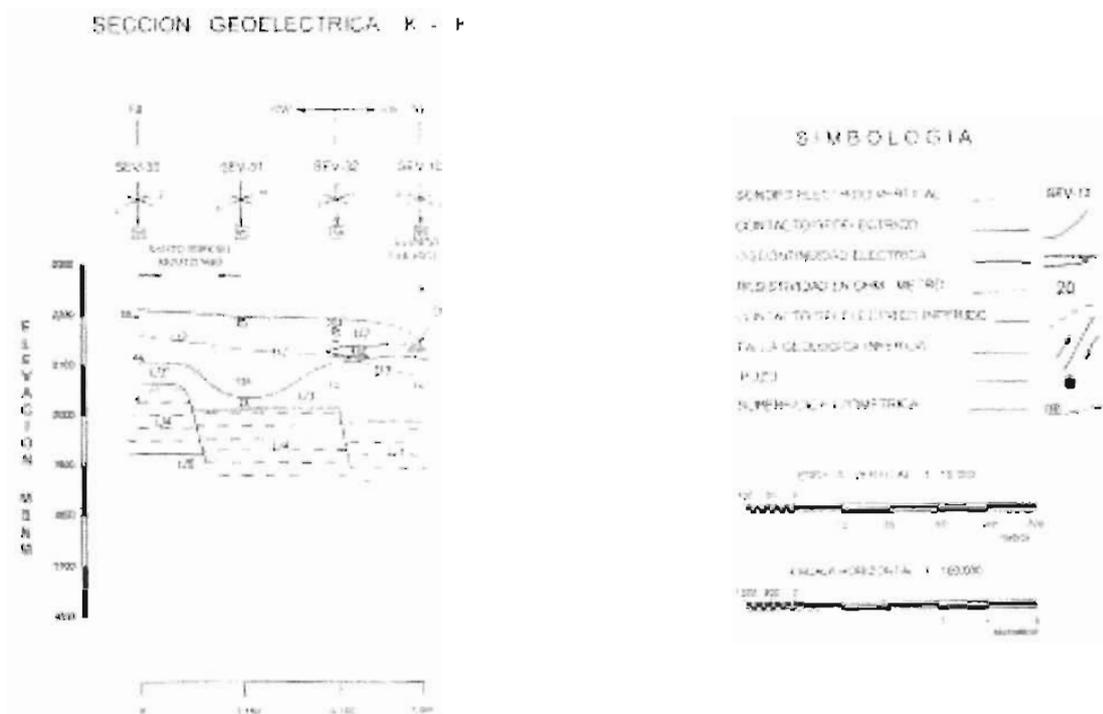


Figura 2.12. Sección geoelectrica K-K’.

2.3.12 Perfil geoelectrico L-L’

Esta sección se inicia al sur de la población José María Morelos y termina en San Sebastián de Aparicio se construyo con los sondeos 33, 34, 12, 16, su longitud es de 9.20 km. La profundidad del agua subterránea es de 80 a 100 m. Con base en los resultados de los SEV, se identificaron 2 capas geoelectricas, (Figura 2.13)

U₂, se identifica a lo largo de toda la sección presentando un rango de resistividad entre 36 y 1016 ohm-m, correlacionándose con arenas, gravas, boleos y basaltos fracturados del Cuaternario, su espesor es muy irregular, abajo del SEV 12 alcanza su máximo espesor aproximadamente de 300 m.

U₃, presenta resistividades comprendidas entre 29 y 48 ohm-m, correlacionándose con materiales saturados como limos-arcillosos y arenas finas del Cuaternario. Su espesor máximo es de aproximadamente 200 m.

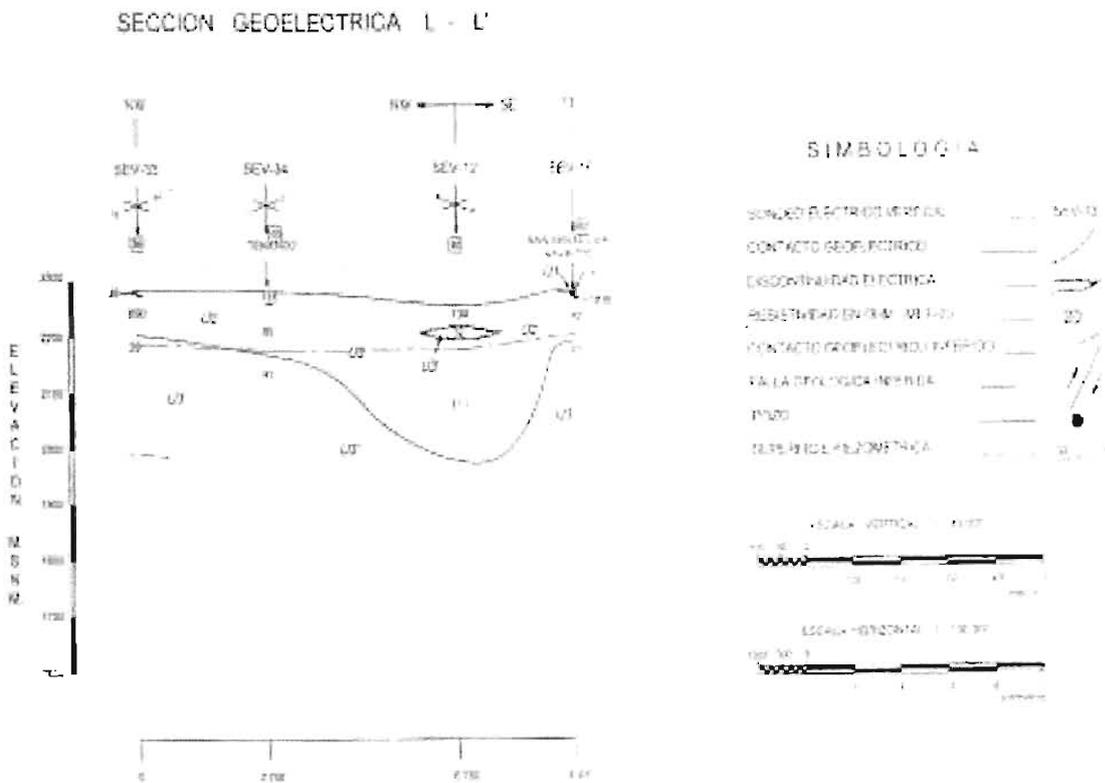


Figura 2.13. Sección geoelectrónica L-L'.

2.4 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

La asociación geología-resistividad-eléctrica permite asignar un intervalo resistivo eléctrico a las unidades estratigráficas, y proponer un perfil hidrogeológico simplificado y de carácter general para toda la zona.

El nivel del agua subterránea en donde se realizaron los sondeos eléctricos verticales en la zona central de la cuenca varía entre 5-30 m de profundidad.

Las capas geoeléctricas determinadas forman las siguientes unidades hidrogeológicas.

Acuífero libre. Su rango resistivo es de 5–221 ohm-m, lo forman las capas geoeléctricas U_1 , U_1' , U_2 , U_3 , U_3' correlacionables con depósitos aluviales del Cuaternario y productos volcánicos formados por gravas hasta arcillas y en algunos sitios basaltos fracturados, boleos y cantos rodados, su espesor es muy irregular, y alcanza hasta 250 m en las secciones geoeléctricas A-A' F-F', G-G', es de extensión regional. La litoestratigrafía de los pozos, Huejotzingo, Hylsa, Sn. Miguel Xoxtla, Sn. Francisco Ocotlan, Volkswagen, coinciden con las capas geoeléctricas que forman el acuífero libre.

En la zona central de la ciudad de Puebla aflora un estrato de Travertino en donde existe agua termal sulfhídrica, su rango resistivo es de 432-1098 ohm-m, se asocia con la capa geoeléctrica U_2' aparece únicamente en dos perfiles geoeléctricos, por medio de sondeos de mecánica de suelos, afloramientos, y la litoestratigrafía de pozos se ha comprobado su existencia.

Acuitardo. Su rango resistivo es de 3-9 ohm-m lo forman la capa geoeléctrica U_4 que es correlacionable con depósitos arcillo-limosos saturados de origen lacustre de edad Pliocénica.

Los siguientes pozos registran el acuífero libre y el acuitardo: al noroeste de la ciudad de Puebla el pozo Volkswagen, al noreste los pozos, Bosques de Sn. Sebastián, Capu, al suroeste Sn. Bartolo 2, la Carmelita, y la Victoria, al sureste el pozo Sn. Baltazar.

Acuífero medio. Formado por rocas volcánicas del Terciario su intervalo de resistividad es 81-438 ohm-m, se asocia con la capa geoeléctrica U_5 , se encuentra a partir de 300 m de profundidad. Al noreste de la ciudad lo registra el pozo oriente IV, al sureste lo registra el pozo San Ramón Castillotla.

2.5 Tomografía eléctrica

Tomografía eléctrica es la técnica de toma de datos con arreglos multielectrónicos que permite construir una imagen bidimensional. La tomografía eléctrica se puede dividir en dos etapas, la primera es con respecto a la toma de datos de campo y la segunda la inversión de los mismos.

En la ciudad de Puebla se efectuó tomografía eléctrica en la Avenida 31 Oriente (Avenida Manuel Espinosa Iglesias) entre el Bulevar 5 de mayo y la calle 16 sur, con una longitud total de 800 m y una profundidad total de 79.1 m. La elección de esta zona responde a la existencia de cuatro pozos que alumbran agua termal sulfhídrica, en esta zona se ubica el pozo Anzures que es el que mayor concentración de Sólidos totales disueltos registra.

Empleando el arreglo tetraelectrónico Schlumberger. Los trabajos de campo se efectuaron bajo la supervisión de: Dra. Elsa L. Flores M., Dr. René Chávez Segura, y la colaboración de M.I. Gabriel Jiménez Suárez, los trabajos de campo se hicieron por estudiantes de Ingeniería Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M. en diciembre de 2000.

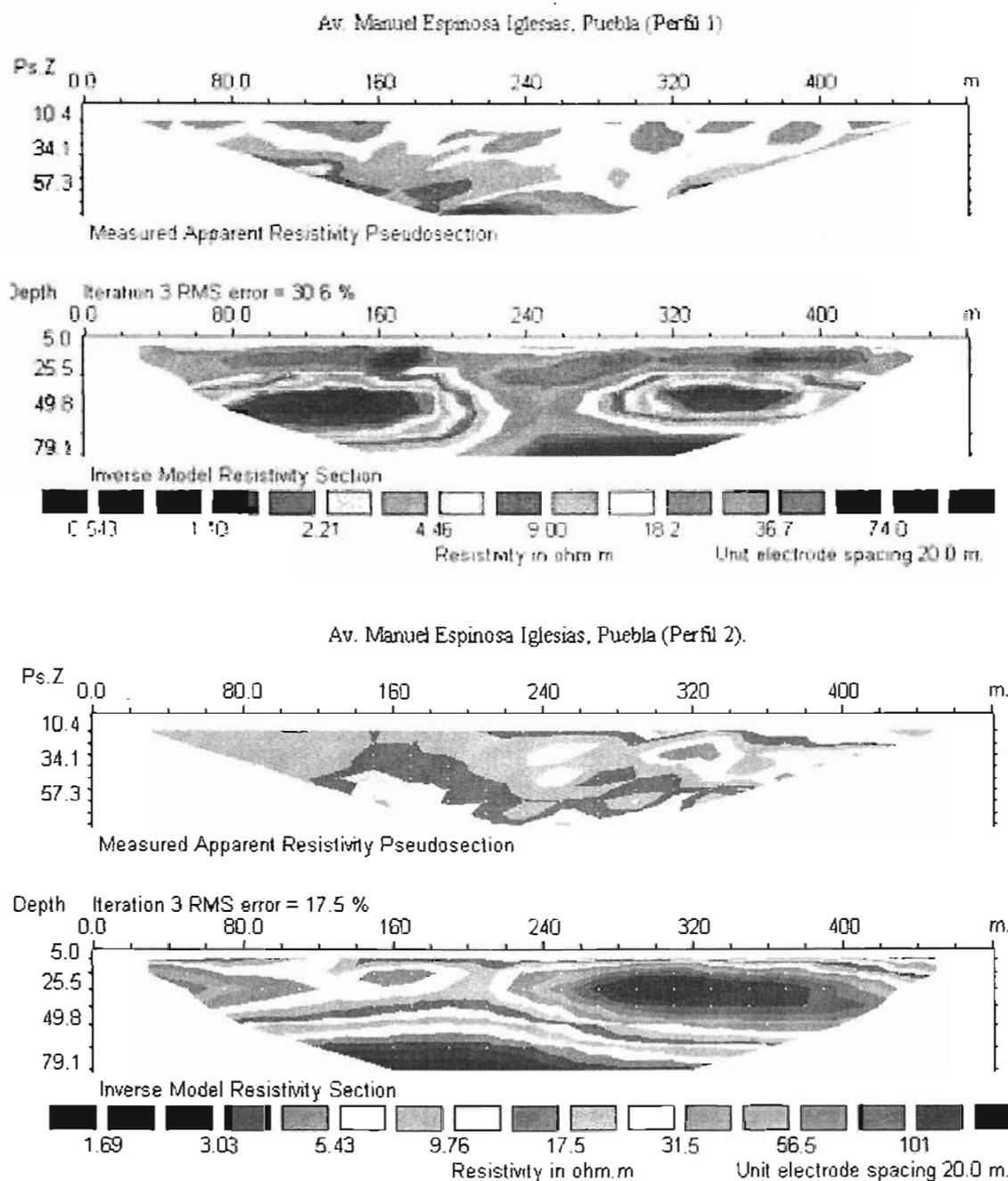


Figura 2.14. El primer esquema de los dos perfiles representa los datos de resistividad aparente medidos en campo el segundo esquema representa los datos calculados de resistividad obtenida por inversión de datos; Avenida Manuel Espinosa Iglesias (31 Ote.), a partir del bulevar 5 de Mayo longitud total 800 m.

Perfil geoelectrico 1-2. Profundidad alcanzada 79 m, su resistividad eléctrica esta en el intervalo de .5 a 150 ohm-m, la zona de resistividad de .5 a 2 ohm-m, se correlaciona con arenas limo arcillosas según lo registra la estratigrafía del pozo el

Cristo, la baja resistividad de estas capas geoelectricas se explica por la existencia de aguas termales sulfhidricas. El agua sulfhidrica rica en sulfatos que al unirse quimicamente con el calcio, sodio, magnesio, forma sales como sulfato de calcio CaSO_4 , sulfato de sodio NaSO_4 , que contenidas en el agua que satura materiales granulares hacen que descienda la resistividad electrica de dichos materiales. En el perfil geoelectrico 1 se identifican dos plumas de agua mineralizada de 25 a 75 m de profundidad. En el perfil geoelectrico 2 se identifica una sola pluma a partir de los 50 m de profundidad. Las zonas de resistividad de 9 a 37 ohm-m, se correlacionan con arcillas, las zonas de resistividad de 37 a 75 ohm-m se correlacionan con arcillas-limosas, las zonas de resistividad de 75 a 150 ohm-m, se correlaciona con arenas, gravas y boleas basalticos.

CONCLUSIÓN

Los valores de la resistencia electrica y su correlación con la columna litoestratigrafica de los pozos para extracción de agua potable, los afloramientos y la geología de la región permiten definir la secuencia estratigrafica de la cuenca en su zona central hasta la profundidad de 300 m.

CAPITULO III

GEOLOGIA DE LA REGIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

Se presentan los principales rasgos de la geología, y geomorfología de la cuenca de Puebla con la finalidad de determinar las condiciones hidrogeológicas del sistema acuífero.

3.2 FISIOGRAFÍA

La región en estudio se localiza en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transmexicano. El Eje es una franja volcánica formada por grandes sierras, coladas lávicas, y conos cineríticos. En total son treinta y dos volcanes, cuya formación se inició en el Cenozoico Superior (38 millones de años) y su actividad continua hasta nuestros días. Cubre una zona que varía de 20 a 150 km de ancho y aproximadamente 1000 km de largo (Verma, 1987) con una orientación aproximada este-oeste desde la ciudad de Veracruz, Ver., en las costas del Golfo de México, hasta la ciudad de Puerto Vallarta, en el estado de Jalisco, en las costas del Océano Pacífico a la altura del paralelo 20.

El origen del Eje Neovolcánico está relacionado con la subducción de la placa tectónica oceánica de Cocos en la placa continental Norteamericana, debajo de la corteza continental de la República Mexicana a la altura del paralelo 20, que al nivel de la astenósfera sufre fusión parcial y origina los magmas del Eje Neovolcánico (Mooser, 1975; Demant, 1978).

En regiones del Eje Neovolcánico se localizan importantes sistemas geotérmicos en explotación por la Comisión de Federal de Electricidad como los Azufres en el estado de Puebla y los Humeros en el estado de Michoacán.

3.3 GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA DE PUEBLA.

La geomorfología esta formada por cuatro tipos de relieve (Figura 3.1): Volcánico, Planicies, Mesetas y Sierras bajas.

El primero está formado, por la Sierra Nevada que comprende los volcanes Popocatépetl, Iztaccihuatl, Telapon, Tlaloc, y Tecama.

Entre la Sierra Nevada y la Malinche se encuentra una gran planicie de pendiente suave hacia el sur, con altitudes medias de 2300 m.s.n.m. en el norte y en las inmediaciones de los volcanes, en su parte central tiene altitudes del orden de 2200 m.s.n.m., en el sur la cuenca tiene altitudes de 2100 m.s.n.m.

En el norte de la cuenca en las inmediaciones de la ciudad de Tlaxcala se localiza un bloque elevado que constituye una meseta con una altitud media de 2300 m.s.n.m. resultado de movimientos tectónicos.

En el sureste de la cuenca de Puebla se encuentra un conjunto de lomas de origen sedimentario formadas por calizas masivas, que forman una sierra baja llamada sierra del Tentzo con alturas de 2100 a 2300 m.s.n.m. En la (Figura 3.2) se presentan los relieves la cuenca.



Figura 3.1. Geomorfología de la cuenca de Puebla, tipos de relieve, (V) volcánico Sierra Nevada y Malinche, (P) planicie la mayor parte de la cuenca, (S) sierra del Tentzo, (M) meseta de Tlaxcala.

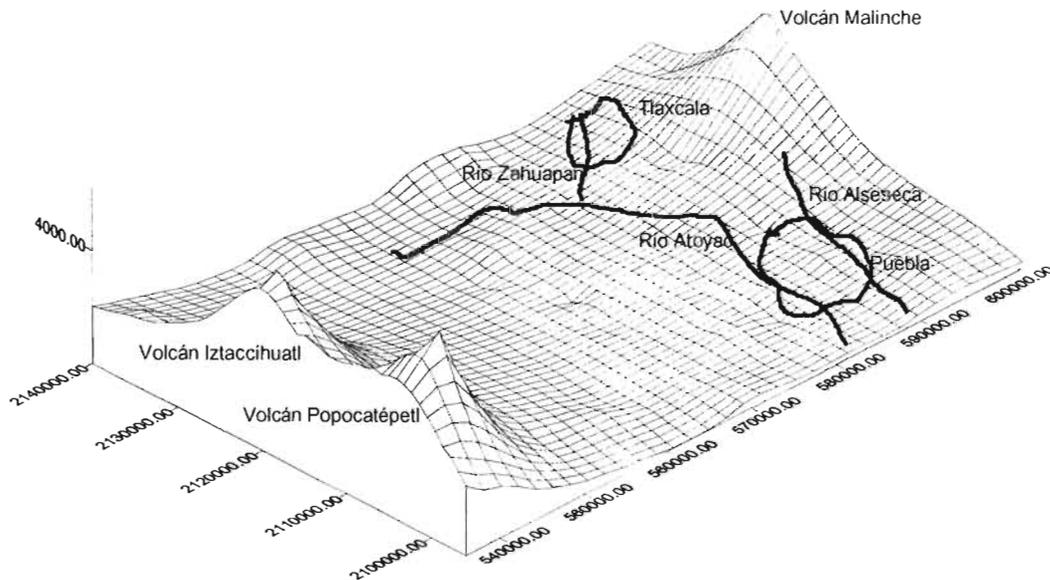


Figura 3.2. Topografía de la cuenca de Puebla.

3.4 GEOLOGÍA HISTÓRICA

Los procesos geológicos más importantes de la cuenca de Puebla se inician en el período Cretácico Inferior, en el piso Aptiano el 90 % del actual territorio de la República Mexicana estaba ocupado por el mar de Tethys (Viniegra, 1992) lo cual dió origen a la formación de extensos y profundos depósitos de material calcáreo (CaCO_3) que a fines de este período fueron sujetos a movimientos epirogénicos que levantaron gran parte de lo que hoy es Norteamérica trayendo como consecuencia la regresión de los mares.

La formación de los grandes estratovolcanes, como el Popocatepetl (5542 m.s.n.m.), Iztaccihuatl (5386 m.s.n.m.), y La Malinche (4461 m.s.n.m.) se inició a finales del Mioceno (UNAM-INEGI, 1984). La Malinche presenta un cráter en estado muy avanzado de erosión, indica el período más antiguo del volcanismo en Puebla. Dichos volcanes son de los más altos en el país y se levantan en medio de la gran planicie central de la cuenca de Puebla.

3.5 GEOLOGÍA GENERAL

El tipo de materiales superficiales es heterogéneo y presenta discontinuidades laterales, los más abundantes son depósitos aluviales, lacustres, flujos de lava, lahares, piroclásticos materiales de origen volcánico y calizas del Cretácico.

La tectónica de la cuenca de Puebla a la fecha no se ha estudiado detalladamente existe poca información acerca del tema, la publicación más reciente es la de

(Mooser, 1996) en la que identifica dos fallas tectónicas y dos fracturas. Las fallas se localizan en la parte norte de la cuenca con dirección este-oeste. Una de las fallas se transforma en fractura y se introduce en el centro del volcán la Malinche. Las fracturas tienen dirección noreste-suroeste y noroeste sureste, interceptándose aproximadamente a 90 grados en la ciudad de Puebla, (Figura 3.3).

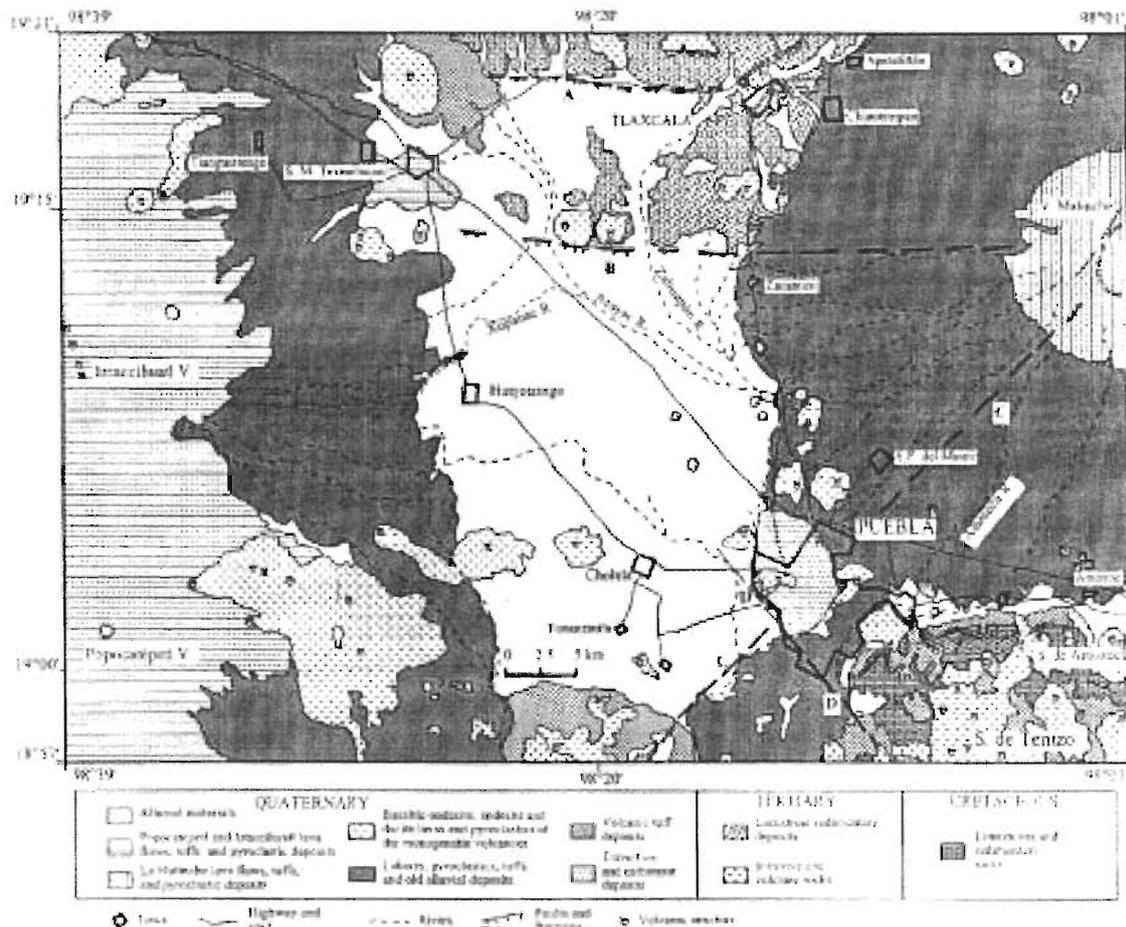


Figura 3.3 Plano geológico de la cuenca de Puebla, (Mosser et al, 1996).

Los depósitos de materiales mostrados en este trabajo son los que han sido identificados por sondeos directos con recuperación de muestras (perforación de pozos), sondeos geoelectrónicos, e identificación de materiales en campo.

La columna litoestratigráfica de la cuenca de Puebla pertenece a todos los orígenes geológicos: volcano-sedimentario y metamórfico, coherente con los eventos geológicos de la cuenca (Figura 3.4).

- a) **Complejo Acatlán corresponde al Paleozoico Inferior.** Las rocas más antiguas de esta provincia fisiográfica son esquistos verdosos de biotita con intervalos de cuarcita, metagabro diferenciado y esquisto pelítico formados por metamorfismo regional de bajo grado, con plegamientos intensos (Síntesis Geográfica, 1987), aflora en amplias zonas al sur del estado, y en las inmediaciones de la ciudad de Acatlan en la Mixteca Poblana. Los afloramientos de esquisto presentan intemperismo, y pliegues anticlinales y sinclinales del orden de decenas de metros, debido a su variedad litológica y estructural Ortega (1978), elevó esta unidad al rango de complejo. Existe una discontinuidad cronológica entre el complejo Acatlan y las calizas del Cretácico en la cuenca de Puebla, sin embargo la literatura no precisa acerca de la sucesión estratigráfica.
- b) **Depósitos calcáreos de origen marino del período Cretácico Inferior (ki) piso Aptiano.** Los depósitos del Cretácico Inferior se conocen como la formación Orizaba consta de calizas arrecifales, estratos de caliza densa. Estos depósitos forman paquetes estratigráficos del orden de 500-1000 m de espesor (UNAM, INEGI, 1984), los cuales debido a esfuerzos tectónicos formaron plegamientos y cabalgaduras durante la orogénia Laramídica de la época del Eoceno inferior.
- c) **Depósitos calcáreos de origen marino del período Cretácico Superior (Ks) formación Maltrata del Turoniano.** Se encuentran en la parte central de la cuenca de Puebla a partir de una profundidad de 300 m, formados por calizas compactas que forman estratos fracturados de espesor uniforme de 15 cm, los estratos están intensamente plegados, se calcula que su espesor es de 300 a 400 m, aflora en el sureste de la ciudad de Puebla (Fraccionamiento la calera, Sn. Francisco Totimehuacan), en la región de Amozoc y en la Sierra de Tepeaca. En general la literatura (UNAM, INEGI, 1984; Síntesis Geográfica, 1987; Geotecnología, 1997) las describe asociadas con lutitas y margas, pero en los lugares en donde aflora y en los pozos de agua potable en que alcanzaron estos depósitos no se registraron estratos de lutitas ni de margas, en la región de San Francisco Totimihucan, (sur de la ciudad de Puebla) existen intercalaciones de material arcilloso entre los estratos de caliza del orden de medio centímetro. El afloramiento de la caliza cretácica en el este de la ciudad y aproximadamente a 5 km de distancia aparece a 80 m de profundidad en el centro de la ciudad; en el centro de la cuenca no se ha registrado por medio de pozos de agua potable cuya profundidad es del orden de 250 m, por lo tanto, acusa una posible falla o un plegamiento con una pendiente muy grande.
- d) **Formación Balsas (Teob) del período Terciario de la época del Eoceno Tardío a la época del Oligoceno Temprano.** Sedimentos de rocas carbonatadas emergidos del piso oceánico, clasificados como areniscas, cantos rodados, conglomerados y clásticos calizos compactos con matriz limo arcillosa cementado por calcita y óxido de hierro. Debido a

que estos sedimentos se derivan de la erosión de montañas originadas por la orogenia Laramide se les ha designado como depósitos mollasse continentales (Cserna et al, 1988) post-orogenia Laramide.

- e) **Rocas volcánicas del período Terciario y época del Mioceno (Tm).** Están constituidas por emisiones de tobas y lavas que en algunos lugares se encuentran estratificadas con brechas volcánicas. Las lavas son andesitas de lamprobolita o de augita, de textura porfirítica-afanítica.
- f) **Rocas volcánicas del período Terciario y época del Mioceno-Plioceno (Tlx).** Su origen se sitúa en la actividad volcánica de todo el Plioceno y están formadas por gravas, arenas, limos y arcillas. Se intercalan con depósitos lacustres y fluviales debido a períodos de calma en los volcanes del área.
- g) **Depósitos lacustres del Plioceno (Tpl).** En el Plioceno medio en la cuenca de Puebla debido a la actividad volcánica del período Terciario se desarrolló una cuenca endorreica que proporcionó las condiciones para la formación de un gran lago intervolcánico que dio origen a arcillas lacustres de espesor y profundidad muy variable.
- h) **Formación Popocatepetl del período Cuaternario (Qp).** Edifica el estratovolcan Popocatepetl, esta formada por materiales piroclásticos, brechas de avalancha, cubiertas por una alternancia de lavas con pómez, flujos de ceniza, su composición varía de andesítica-basáltica a dacítica lo que indica una mezcla de magmas. El espesor total se desconoce, pero se infiere un espesor máximo de 3500 m (Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).
- i) **Formación Iztaccíhuatl del período Cuaternario (Qiz).** Edifica el estratovolcan Iztaccíhuatl, está constituida por secuencias efusivas cuya composición varía de andesita-basáltica a dacítica, las secuencias se inician con derrames lavicos y finalizan con intrusiones dómicas, el espesor total se desconoce no obstante los afloramientos en el volcán Iztaccíhuatl exponen un espesor aproximado de 2500 m (Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Las edades isotópicas sugieren distintos períodos eruptivos entre 0.6 a 0.08 millones de años (Mooser et al, 1974).
- j) **Depósitos del Cuaternario Reciente (Qiv, Qla, Qal T).** Vulcanitas del Cuaternario Inferior basaltos, andesitas, dacitas, piroclásticos producto de volcanes monogenéticos, (Qiv), depósitos lacustres (Qla), rellenos aluviales Qal. Ellos constituyen un paquete estratigráfico formado por la alternancia de estratos de origen lacustre, aluvial, y materiales volcánicos. Materiales de la formación Tarango (T) constituida por abanicos aluviales que se encuentran en el entorno de las corrientes o escurrimientos que se originan en las partes altas de los volcanes, conglomerados, pómez, piroclastos del Plioceno. Los materiales de mayor abundamiento superficial

en la cuenca de Puebla son arenas finas limosas eólicas de origen volcánico y depósitos aluviales, que deben su origen a la erosión de los volcanes, y su transporte a los ríos Atoyac y Zahuapan y otras corrientes superficiales. El espesor medio de los estratos del Cuaternario es de 250 m.

- k) Depósitos del Cuaternario de rocas carbonatadas y suelos lacustres (Qtr, Qcal).** Se localizan y afloran en el área central de la ciudad de Puebla. Los depósitos de travertino tienen su origen en la precipitación del CaCO_3 , disuelto en el agua que proviene de un sistema hidrotermal que circula por las calizas de edad Cretácica. El espesor de estos depósitos no se ha definido con precisión, en algunos lugares es del orden de 120 m; se encuentran interestratificados con estratos de caliza, sedimentos lacustres, y volcánicos (Jiménez, 1997). Estos depósitos se encuentran rodeados por tobas andesíticas. La caliza se encuentra en estratos de 4 a 8 m de espesor con un porcentaje de CaCO_3 del 97 % y el 3 % de otros minerales (recuperación de núcleos Jiménez, 1985-2004; Cementos Atoyac, 1988).

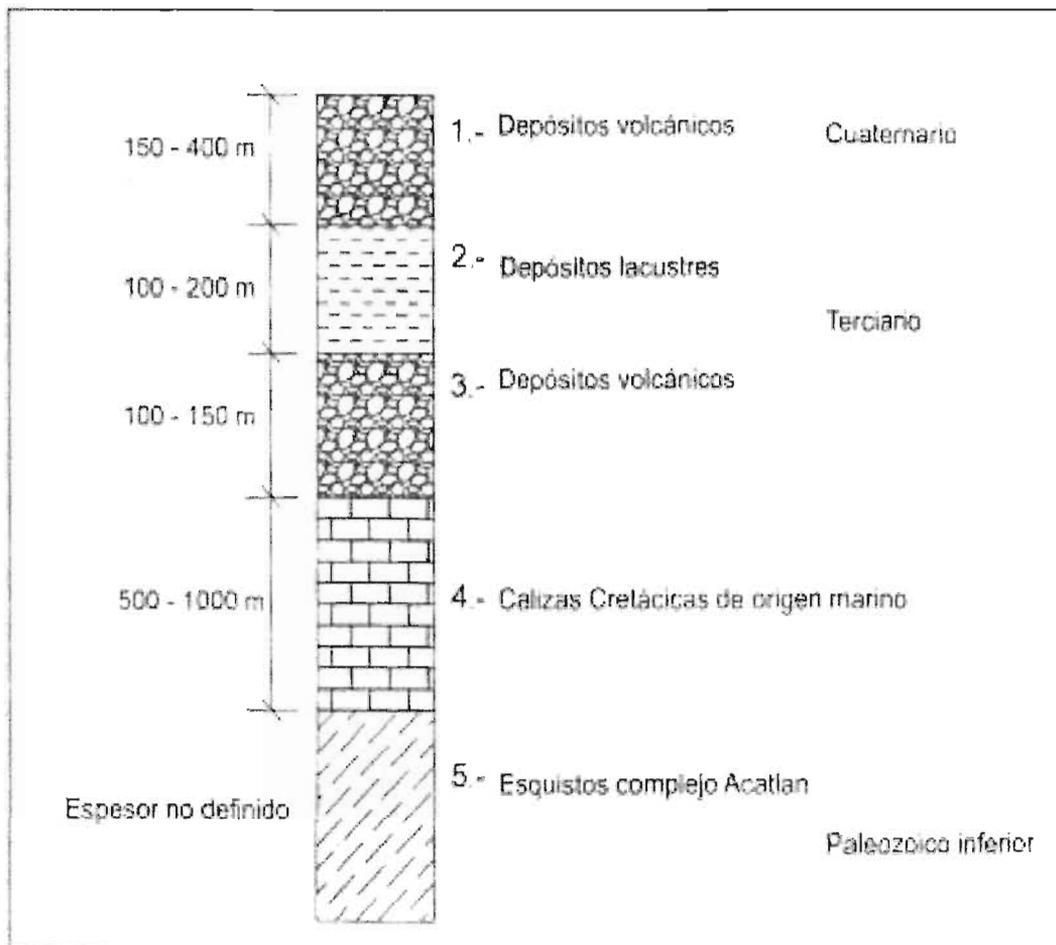


Figura 3.4. Columna estratigráfica de la cuenca de Puebla

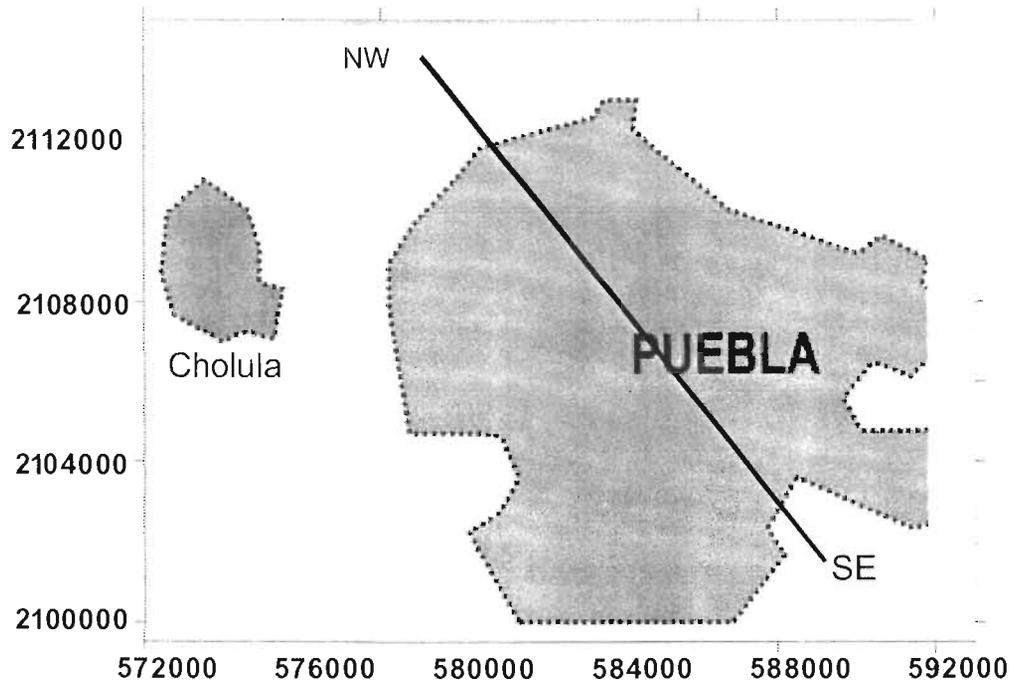


Figura 3.5 Sección NW- SE en la ciudad de Puebla

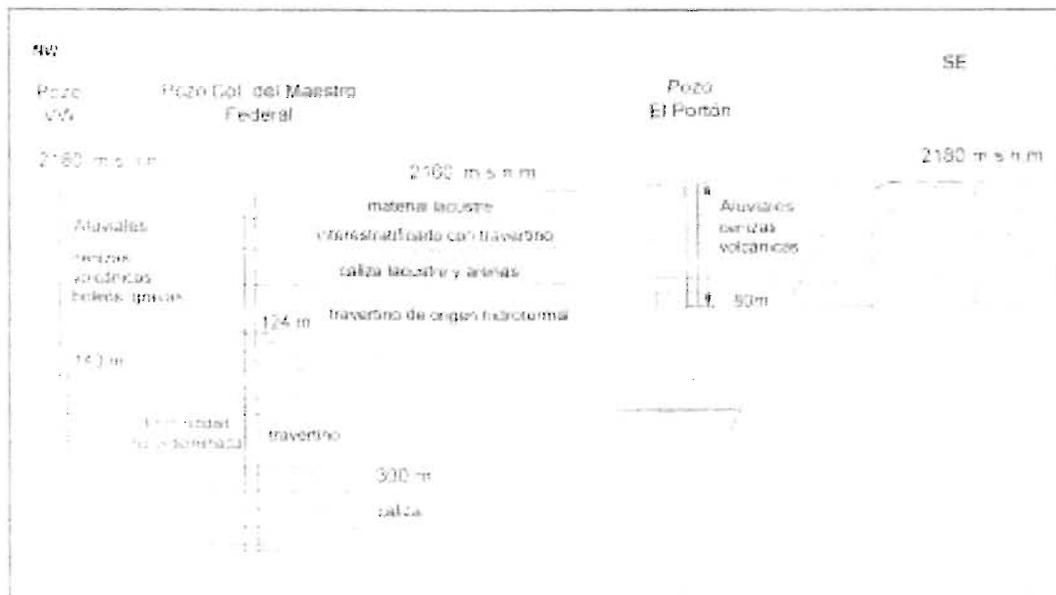


Figura 3.6. Corte estratigráfico noreste-sureste longitud aproximada 12 kms, los pozos alumbran agua termal sulfhídrica y presentan artesianismo.

SISTEMA ACUÍFERO DE LA CUENCA DE PUEBLA

4.1 INTRODUCCIÓN

Se presenta un resumen de datos climatológicos que influyen en la hidrología superficial y subterránea del sistema acuífero de la cuenca de Puebla. Así como los monitoreos potenciométricos y físico-químicos del acuífero de la cuenca de Puebla realizados por la Comisión Nacional del Agua (C.N.A.) y el Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla (S.O.A.P.A.P). en diferentes años.

Por medio de análisis físico-químicos del agua subterránea en la ciudad de Puebla se define la existencia de dos hidroestratos uno de agua dulce de buena calidad y otro de agua termal sulfhídrica.

4.2 CONCEPTOS BÁSICOS

Con base en los conceptos de la hidrogeología y la experiencia práctica del autor de este trabajo se presenta la definición de los siguientes conceptos.

Cuenca hidrológica. Es el área acotada por las partes altas del relieve en la cual las precipitaciones por medio de corrientes superficiales fluyen hacia una zona denominada de descarga. La cuenca superficial puede o no coincidir con la cuenca subterránea ya que la influencia de la geología, puede hacer que las fronteras de infiltración de aguas subterráneas hacia la cuenca y las fronteras de salida no coincidan con las de la cuenca superficial.

Unidad hidrogeológica, es el conjunto de estratos que tienen propiedades similares como la porosidad efectiva, conductividad hidráulica, granulometría y que pueden representarse por un valor medio.

La unidad hidrogeológica dependiendo de la magnitud de su conductividad hidráulica equivalente o media se puede clasificar como acuitardo, acuícludo, o acuífero.

Sistema acuífero o sistema hidrogeológico es el conjunto de unidades hidrogeológicas como acuitardos, acuícludos, acuíferos que tienen interacción hidráulica y que a través de este se lleva a cabo un segmento del ciclo hidrológico.

Manantial. Es una zona de discontinuidad en la superficie terrestre en la que brota agua en forma natural debido a la carga hidráulica. En cuanto al origen del agua actualmente la opinión más común es que salvo en algunos casos de manantiales termales, todas las aguas de los manantiales proceden de la infiltración de aguas meteóricas, (Custodio, 1996).

Agua mineralizada. La disolución de sustancias minerales y gases de las rocas, por las que se almacena y circula el agua subterránea se denomina proceso de mineralización. El agua subterránea con una concentración de sólidos totales disueltos mayor a 1000 mg/l se considera agua mineral (Davis & De Wiest, 1966).

Agua termal. El agua que tiene una temperatura mayor a 4 °C a la media anual de un sitio (Schoeller, 1962).

Agua termomineral. Es la que tiene las características del agua mineral y termal, típica de fenómenos volcánicos u orogénicos, (Nicholson, 1993).

Hidroestrato. Las variaciones verticales u horizontales en la composición físico-química del agua se designan como estratificación del agua o hidroestrato, (Custodio, 1996).

Sólidos totales disueltos. Las características físicas, químicas del agua están determinadas por el tipo y cantidad de partículas suspendidas y disueltas en ella. Los sólidos totales disueltos son el resultado de evaporar la fracción de la muestra de agua que pasa a través de un filtro, también se le conoce como residuo filtrable seco.

4.3 CLIMA

La cuenca de Puebla cuenta con 17 estaciones climatológicas, la más antigua inicia su funcionamiento en el año 1921 y está localizada en la ciudad de Puebla.

Clima se define como: el estado atmosférico de un lugar durante determinado período. De acuerdo con la carta de climas propuesta por Wilhen Köppen Carta Mundial de Climats (1937), y modificada para la República Mexicana (Atlas del agua, 1976). El clima de la región se clasifica como templado, subhúmedo, con lluvias en verano. La temporada de lluvias manifiesta condición de canícula, o sea una pequeña temporada de nula o casi nula precipitación dentro de la estación de lluvias, aproximadamente en la segunda quincena del mes de julio denominada sequía de verano.

4.4 PRECIPITACIÓN PLUVIAL

La precipitación media en la cuenca de Puebla para el período 1950-1997, presenta variaciones significativas; en la zona del volcán la Malinche es de 1000 mm/año, en la estación Río Frío representativa de las precipitaciones de la Sierra Nevada registra valores de 1053 mm/año, en la ciudad de Puebla 850 mm/año (año 2000), en la parte norte de la

cuenca 739 mm/año, en la parte sur en la zona de la presa de Valsequillo es de 770 mm/año.

La temporada de mayor precipitación pluvial en la cuenca se presenta de mayo a octubre, la época de estiaje es del mes de noviembre al mes de abril. El mes más seco es diciembre con una precipitación media mensual de 6.6 mm y el de mayor precipitación pluvial media mensual es junio 146.2 mm.

4.5 TEMPERATURA

La temperatura media anual en la cuenca de Puebla tiene fluctuaciones que dependen de la altitud del terreno, según el Boletín Meteorológico de la Comisión Nacional del Agua, en las partes altas de la Malinche se registra una temperatura media anual de 4 °C, aumentando hacia sus partes bajas hasta 12 °C. En la ciudad de Tlaxcala la temperatura media anual es de 16 °C.

La estación Puebla la más representativa de la región, registra una temperatura media anual de 17 °C, y máxima de 21.3 °C en mayo y mínima de 10.8 °C en el mes de enero.

4.6 CORRIENTES SUPERFICIALES

La cuenca de Puebla, con base en la regionalización hidrológica del país elaborada por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, actualmente Comisión Nacional del Agua, se encuentra en la región hidrológica del Río Balsas. Esta región tiene un área de 20,328.17 km²: abarca las zonas centro, oeste, y suroeste del estado. Tiene como cuenca principal la del río Atoyac, que da origen al río Balsas y es considerada la más importante. En esta región hidrológica el caudal medio aproximado de las corrientes es de 9 m³/s. (Síntesis Geográfica, 1987).

El río Atoyac es un río perenne que escurre en dirección noroeste-sureste, se origina por los deshielos del flanco oriental del volcán Iztaccíhuatl y precipitaciones pluviales de los volcanes monogenéticos Tlaloc, Telapón y Tecama. Entre las corrientes que descargan en el cauce del río Atoyac en sus primeros kilómetros son: el río Tlahuapan, Turín, Otlali, Atotonilco y San Jerónimo. Adopta el nombre de río Atoyac a partir de la integración de los ríos Turín y Tlahuapan.

El río Zahuapan fluye de norte a sur, es el principal tributario del río Atoyac, nace en la serranía de Tlaxco, a unos 40 kilómetros al norte de la ciudad de Tlaxcala, a una altitud de 3418 m.s.n.m. Aguas abajo atraviesa la ciudad de Tlaxcala, más adelante recibe la afluencia de los ríos Jilotepec, San Juan y Soledad.

El río Atoyac y el río Zahuapan son dos importantes corrientes para los estados de Puebla y Tlaxcala y se unen a 10 kilómetros al norte de la ciudad de Puebla. A partir de esta unión el río Atoyac fluye en dirección norte sur cruzando la ciudad de Puebla y descargando su caudal en la Presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo), aguas abajo de la presa, continua su curso hacia la cuenca del río Balsas.

El río Alseseca, se origina por las precipitaciones en el lado sur del volcán la Malinche, su cauce se desarrolla en gran parte de la ciudad de Puebla, escurre de norte a sur aproximadamente paralelo al río Atoyac del cual es afluente, desemboca en la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo).

El río Atoyac en el sur de la ciudad de Puebla, es un río efluente debido al abatimiento del nivel estático que actualmente se encuentra muy por abajo de su cauce. El río recibe en gran parte de la ciudad de Puebla, aguas negras domésticas e industriales.

4.7 COMPOSICIÓN DEL SISTEMA ACUIFERO

De acuerdo con estudios geológicos, sondeos eléctricos verticales SEV arreglo Schlumberger (Geotecnología,1997), la columna litoestratigráfica de 44 pozos de agua potable, y la reinterpretación hecha por el autor de este trabajo de toda la información previa, se concluye que el sistema acuífero de la cuenca de Puebla indica la existencia de cuatro unidades hidrogeológicas (Figura 4.1).

Tabla 4.1 Unidades hidrogeológicas

| Escala de tiempo Geológico | Depósito | Espesor Medio (m) | Unidad Hidrogeológica | Funcionamiento |
|-------------------------------|--|----------------------|--------------------------|-------------------|
| Cuaternario | Qal, rellenos aluviales | 250 | Acuífero | Acuífero freático |
| | Qiv, vulcanitas del cuaternario inferior | | | |
| | Qiz Formación Iztaccihuatl, flujos piroclásticos, tobas, brechas | | | |
| | Qp Formación Popocatepetl, flujos de ceniza, arena | | | |

| | | | | |
|------------------------------|---|------------|-------------------|------------------------|
| | Qla lacustres clásticos y piroclásticos de los volcanes del área | | | |
| | Qtr , Qcal travertino de origen hidrotermal, interestratificado con caliza lacustre | | | |
| Plioceno | Arcillo-limosa | 150 | Acuitardo | confinante |
| Eoceno-Mioceno Oligoceno | Teob, clásticos, areniscas, conglomerados calizos con matriz arcillosa | 100 | Acuífero medio | Acuífero semiconfinado |
| | Tm, tobas y lavas interestratificadas con brechas volcánicas | | | |
| | Tla, piroclastos intercalados con sedimentos lacustres | | | |
| Cretácico Inferior, superior | Calizas de origen marino Ks, Ki | 900 | Acuífero Profundo | Acuífero semiconfinado |
| Paleozoico inferior | Esquistos | Indefinido | Basamento | Frontera |

Acuífero freático. Es un acuífero formado por materiales sedimentarios y volcánicos todos originados en el Cuaternario, superficialmente se encuentran depósitos aluviales, arenas eólicas, subyaciendo se encuentran tobas areno-limo arcillosas, gravas de origen volcánico, boleos, basaltos fracturados, horizontes de arena y grava pómez. Su espesor mínimo registrado es de 80 m en la ciudad de Puebla, su máximo espesor es del orden de 400 m al norte de la ciudad de Puebla, en donde inicia su elevación el volcán la Malinche. En la ciudad de Puebla, en el acuífero freático afloran aguas termales sulfhídricas que pertenecen a un sistema hidrotermal que influye en la calidad del agua en una amplia zona de la ciudad. El acuífero freático en la ciudad de Puebla presenta una discontinuidad litológica formada por materiales carbonatados producto de la precipitación de los minerales disueltos en el agua termal sulfhídrica.

Acuitardo. Es la frontera inferior del acuífero freático y la frontera superior del acuífero medio, esta formado por depósitos lacustres arcillo-limosos del Plioceno; en algunos sitios se presenta como la matriz envolvente de gravas y arenas volcánicas, su profundidad y espesor es variable según la columna litoestratigráfica de pozos ubicados al suroeste de la ciudad de Puebla (Pozos: San Bartolo 2, Carmelita, Victoria, etc.) y noreste (Pozo Volkswaguen, Centro Escolar Morelos, Etc.). En el noroeste (Fraccionamiento Maravillas) la columna litoestratigráfica de los pozos (Maravillas 1 y 2, Oasis, Parque Industrial Puebla 2000) no la registraron. En el centro de la cuenca se identificó por medio de sondeos eléctricos verticales. Esta unidad hidrogeológica, en algunas zonas de la ciudad de Puebla muestra artesianismo y termalismo, al perforarla.

Acuífero medio. Es un acuífero semiconfinado, está formado por materiales de la formación Balsas, rocas volcánicas del Mioceno (Tmca), y rocas volcánicas del Plioceno. Es más difícil registrar este acuífero por medio de pozos debido a su profundidad media del orden de 250 m. La columna litoestratigráfica de pozos en el noroeste de la ciudad de Puebla no la registraron (pozo Oasis, Parque industrial Puebla 2000, etc). En el sureste de la ciudad el pozo San Baltasar registra el acuífero medio.

Acuífero profundo. Está formado por depósitos de caliza de origen marino del Cretácico aflora en el este de la ciudad de Puebla, y se registra por medio de la columna litoestratigráfica de pozos a 80 m de profundidad y en el centro de la cuenca por medio de sondeos eléctricos verticales a 300 m,

Una posible explicación a la ausencia de sedimentos lacustres del Plioceno y rocas volcánicas del terciario en algunas zonas del noreste de la ciudad de Puebla es la siguiente: la región se vio sujeta a un intenso plegamiento en el que ascendieron hasta la superficie las arcillas Pliocénicas y los materiales volcánicos del Terciario, y que posteriormente fueron objeto de un intenso proceso de intemperismo y erosión.

Basamento Hidrogeológico. Es un esquisto del complejo Acatlan, no se tienen parámetros hidrogeológicos determinados. Es un hecho muy conocido que las rocas metamórficas tienen porosidades generalmente menores al 1% y la porosidad efectiva es prácticamente cero. En consecuencia las rocas del complejo Acatlan pueden considerarse por su naturaleza prácticamente impermeables.

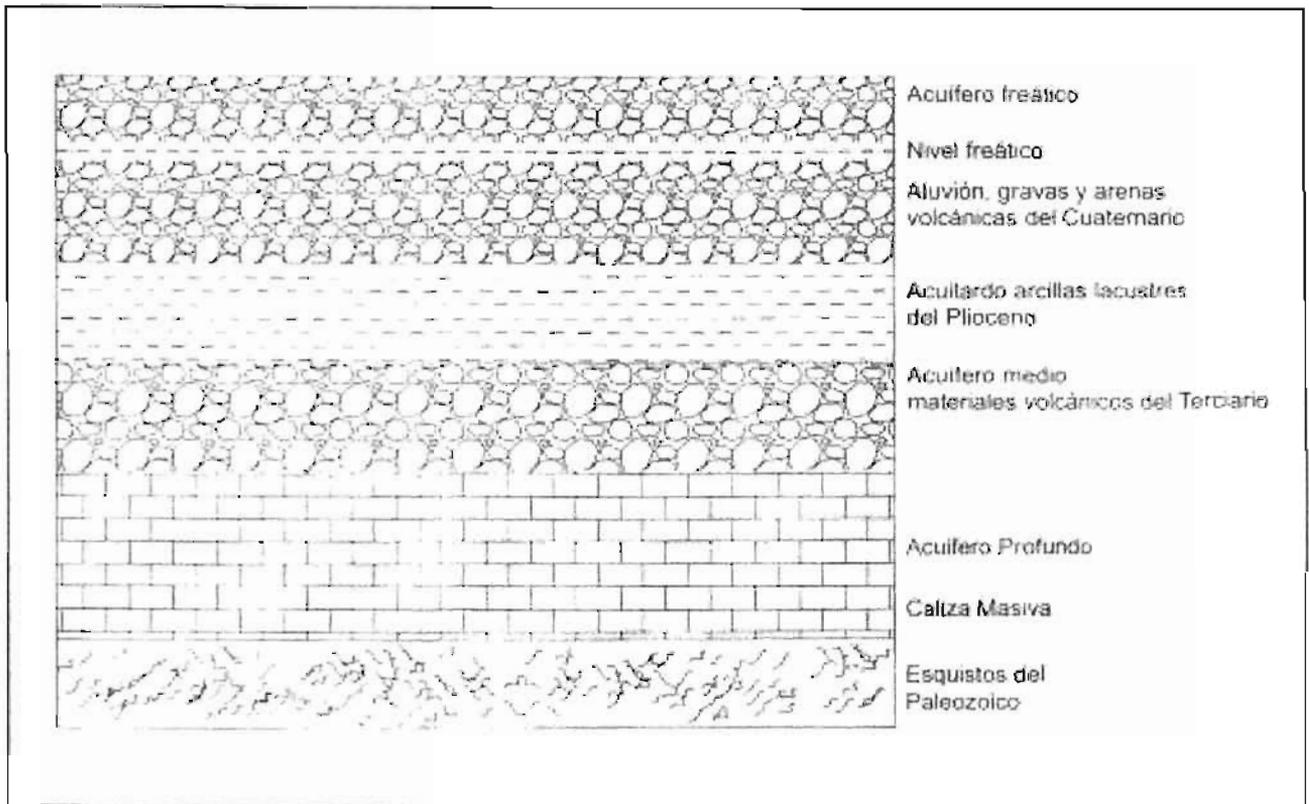


Figura 4.1. Unidades hidrogeológicas de la cuenca de Puebla

4.8 HIDRODINÁMICA DEL SISTEMA ACUÍFERO

En este trabajo se entiende por hidrodinámica del sistema acuífero, la interacción hidráulica de las unidades hidrogeológicas, las rutas de flujo del agua subterránea desde su infiltración en las zonas de recarga, hasta su salida del sistema acuífero en las zonas de descarga. Para definir las rutas de flujo, se toma como base la topografía, los iones disueltos y el contenido de sólidos totales disueltos (analizados más adelante), el primer parámetro indica el medio en el cual se almacenó y circuló el agua y el segundo se puede asociar con zonas de recarga, tránsito o descarga.

Una sistema acuífero está formado por tres zonas: de recarga, tránsito y descarga (Freeze and Cherry,1979) quien determina el funcionamiento de las zonas es la altura y precipitación pluvial media anual del terreno, un sistema acuífero cuya topografía tiene grandes contrastes en el relieve tiene la capacidad de formar sistemas de flujo regionales, intermedios y locales, como es el caso de la cuenca de Puebla. La zona de recarga es la de mayor altura, precipitación, e infiltración, y colinda con el parteaguas que es la línea imaginaria que separa dos cuencas hidrogeológicas; además se caracteriza porque el flujo de agua es hacia abajo y tiene la mayor cantidad de energía mecánica de todo el sistema acuífero. La zona de tránsito es de altura intermedia y la dirección del flujo subterráneo tiende a ser horizontal, su papel es transportar masa y energía. La zona de descarga es la de menor elevación y menor energía mecánica de ahí la razón porque se deposita masa en ella.

4.8.1 Identificación de los sistemas de flujo del acuífero

Zonas de recarga

Existen tres zonas de recarga del sistema acuífero de la cuenca de Puebla.

- a) La Sierra Nevada, precipitación media anual de 1050 mm.
- b) El volcán la Malinche, precipitación media anual de 1000 mm.
- c) La meseta de Tlaxcala al norte de la cuenca, precipitación media anual 817 mm.

La Sierra Nevada en el oeste y el volcán la Malinche al este son los límites superficial y subterráneo de la cuenca Puebla.

La zona de recarga de los volcanes Iztaccíhuatl, Telapón y Tlaloc origina sistemas de flujo regionales con dirección NW-SE. Los sistemas de flujo en el acuífero freático coinciden aproximadamente con el curso del río Atoyac, dren superficial y subterráneo de la cuenca; pasa por la ciudad de San Martín Texmelucan y se une con el flujo proveniente del volcán Popocatepetl que tiene un rumbo NW-SE.

La zona de recarga del Popocatepetl origina sistemas de flujo subterráneo regionales en dirección NW-SE pasando por las poblaciones de San Nicolás de los Ranchos San Andrés Calpan, y Huejotzingo; y Cholula, su corriente se une con las otras corrientes de recarga que provienen de la Sierra Nevada y se dirige hacia el sur y sureste que es la zona de descarga natural de la cuenca.

La recarga en la Malinche origina un flujo subterráneo regional con dirección NE-SW desde la ciudad de Tlaxcala, coincidiendo en forma aproximada con el río Zahuapan que es también un dren subterráneo y superficial de la cuenca. El sistema de flujo de la Malinche converge en la ciudad de Puebla con el proveniente de la zona Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Los volcanes Iztaccíhuatl y Malinche originan flujos subterráneos hacia el noroeste y noreste de la cuenca debido a la mayor altitud de dichos volcanes con respecto a la meseta de Tlaxcala.

La zona de recarga de la meseta de Tlaxcala origina sistemas de flujo hacia el río Atoyac y Zahuapan antes de que se junten sus causas.

La ciudad de Puebla es la zona de descarga de sistemas de flujo profundos que tienen sus orígenes en la Sierra Nevada, según lo acusa el alto contenido de carbonatos de calcio (1000 mg/l) que tienen su origen en la disolución de la caliza de edad Cretácica que forma el acuífero profundo y la concentración de sólidos totales disueltos (1500 mg/l); en los pozos del sistema Atlixcayotl (nueve pozos) ubicados al suroeste y en algunos pozos ubicados en el oeste sistema la Carcaña, recta a Cholula.

ZONAS DE DESCARGA SE UBICAN EN EL SUR DE LA CUENCA

La cuenca de Puebla tiene de dos formas de descarga:

- 1) En forma subterránea.
- 2) Por el drenado de sus aguas freáticas a través de los ríos más importantes, el Atoyac y Alseseca.

4.8.2 Zona de agua termal sulfhídrica

En la ciudad de Puebla se presenta una zona de agua sulfhídrica procedente de un sistema hidrotermal. Las condiciones hidrogeológicas que generan el ascenso de agua sulfhídrica al acuífero superior son:

- a) **Artesianismo.** Se manifiesta cuando se perfora el acuitardo o el acuífero profundo, posiblemente cuando se penetra alguna fractura. Se han perforado 3 pozos: Volkswaguen, colonia del Maestro Federal, Centro Escolar Morelos, el portón que alumbran agua termal sulfhídrica con una fuerte presión hidráulica ascendente a partir de los 160 m de profundidad.
- b) El descenso del nivel estático en el acuífero freático disminuye la presión hidrostática sobre el acuitardo, y debido a la presión ascendente facilita que a través de fallas, fracturas, o cualquier tipo de discontinuidad ascienda agua termal sulfhídrica hacia el acuífero freático
- c) **Abatimiento del nivel freático en el acuífero libre (hipótesis por comprobar).** En la ciudad de Puebla existen tres manantiales de agua sulfhídrica, en las inmediaciones de estos el nivel estático coincide con el nivel del terreno y en general se localiza a menos de 5 m de profundidad (Jiménez, 1997), a medida que desciende el nivel estático en zonas de agua dulce cercanas a la zona sulfhídrica, se forma una pendiente hidráulica entre el agua sulfhídrica y el agua dulce, produciéndose un gradiente hidráulico lo cual genera un flujo de agua sulfhídrica

por unidad de área en las direcciones de abatimiento, el cual se puede expresar matemáticamente como:

$$\vec{q} = -K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \hat{i} - K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \hat{j} - K_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \hat{k} = -K \nabla \varphi \quad 4.1$$

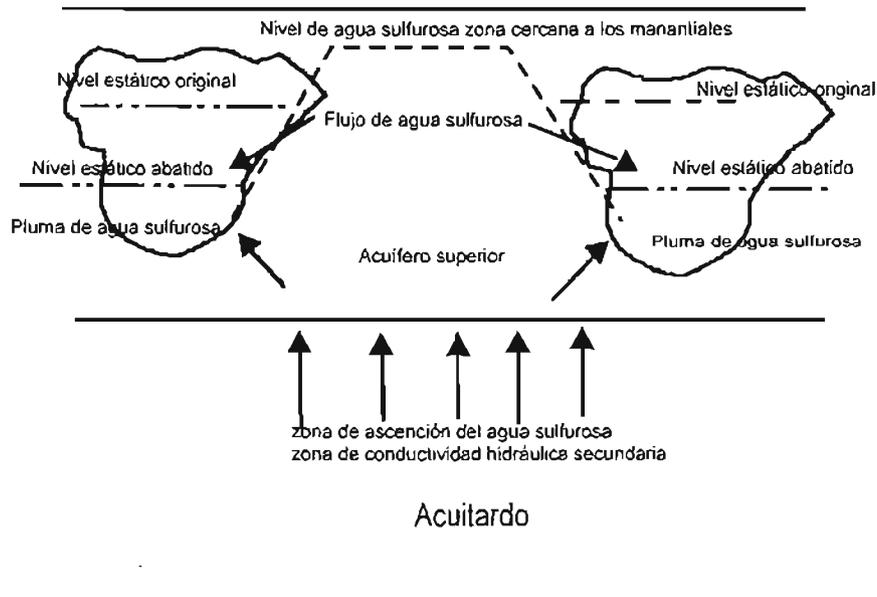


Figura 4.2 Flujo de agua sulfúrica hacia las zonas de agua dulce.

b) Pozos que penetran fallas.

Otra condición de trabajo que facilita el ascenso de agua sulfúrica termal hacia el acuífero freático son los pozos de agua potable que penetran posibles fracturas en el acuitardo o en el acuífero profundo alumbrando aguas termales sulfúricas. No todos los pozos que penetran el acuitardo o las calizas cretácicas alumbran agua sulfúrica. La alineación de los pozos que alumbran agua sulfúrica coincide con las fallas definidas en el plano geológico.

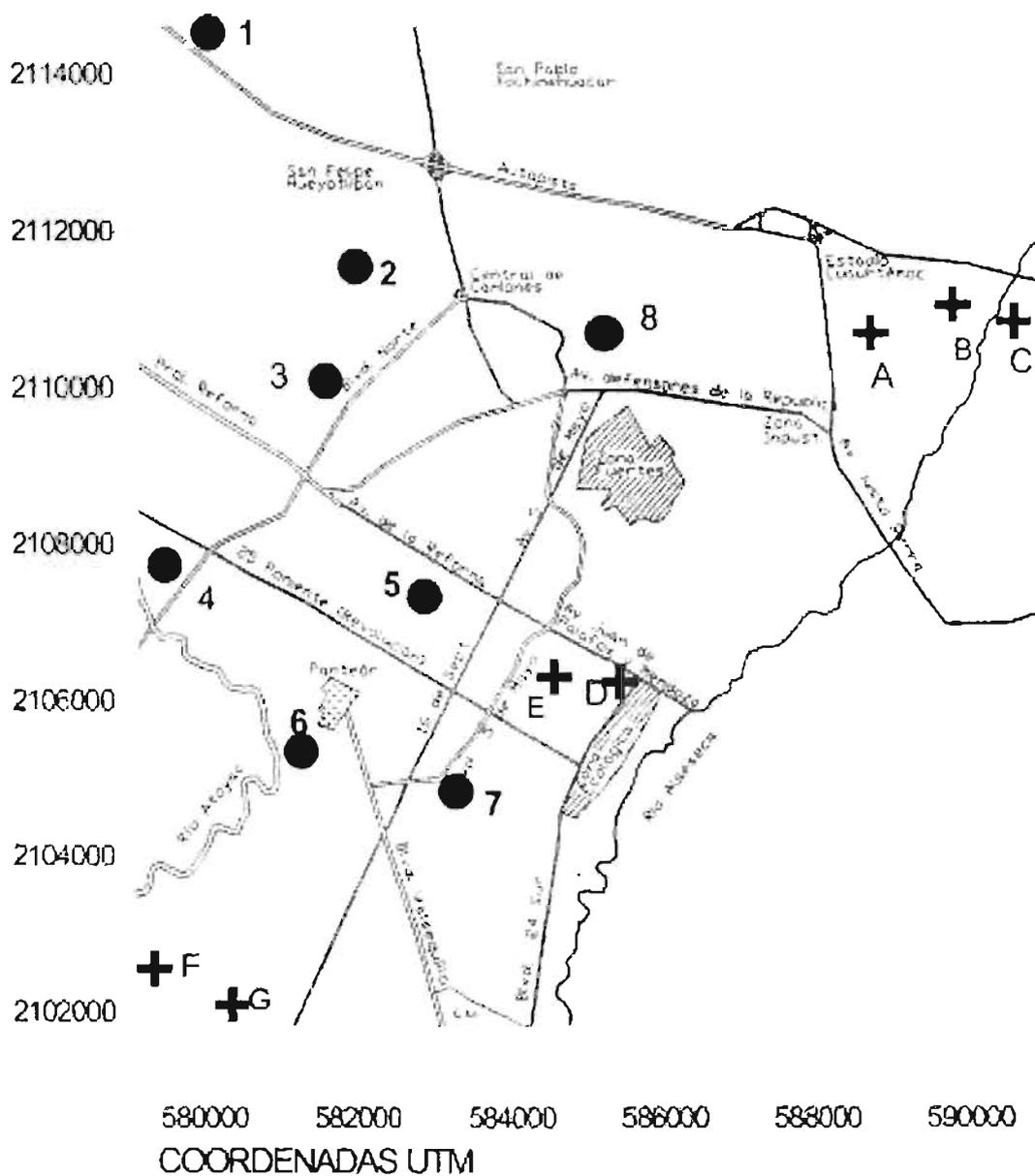


Figura 4.3. 1 Pozo Volkswaguen (artesianismo y termalismo); 2 pozo Centro Escolar Morelos (artesianismo y termalismo); 3 pozo sulfuroso Col. Del maestro (artesianismo y termalismo); 4 pozo CNIC; 5 pozo Alpha (1); 6 pozo Agua Azul; 7 pozo el portón (artesianismo termalismo); 8; pozo Conelec (clausurado por alta concentración de sulfuros). El círculo negro indica pozos productores de agua termal sulfhídrica. La + indica pozos que penetran el acuitardo o las calizas del Cretácico y producen agua dulce de buena calidad. +A pozo Maravillas 2, +B pozo oasis, +C pozo Parque Industrial 2000, +D pozo el Cristo. +F pozo loma Bella, +G pozo Sn. Bartolo

Pozo parcialmente penetrante en el Acuitardo.

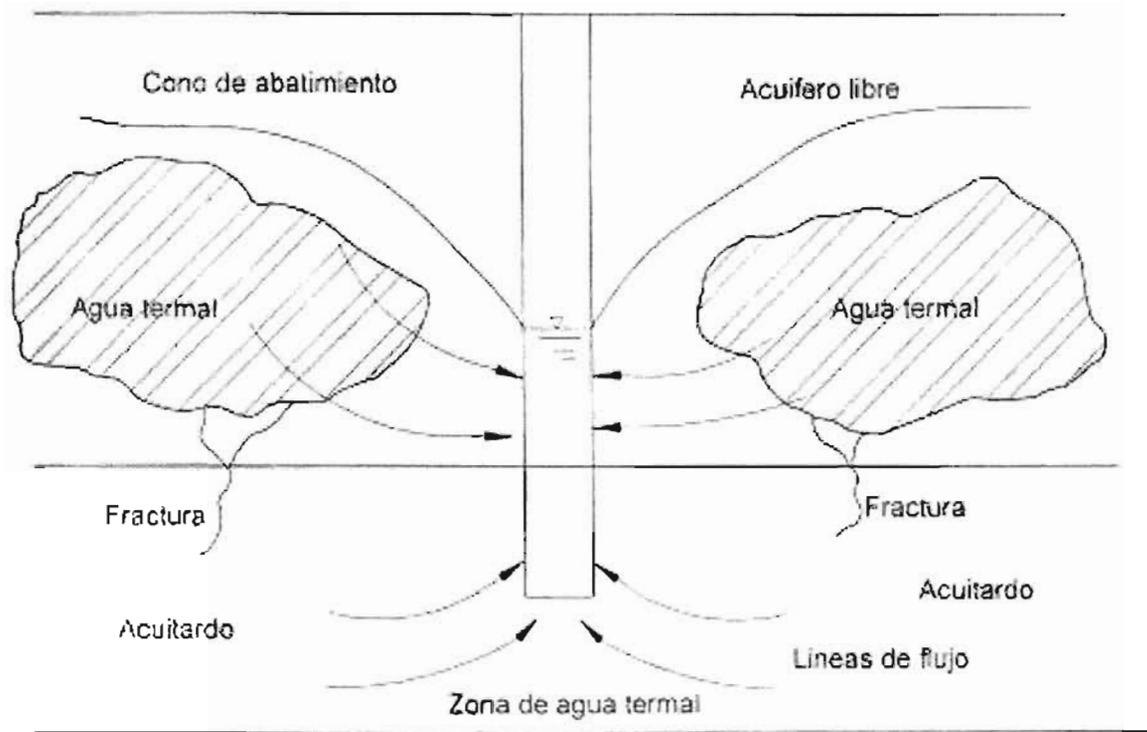


Figura 4.4 Pozo parcialmente penetrante en el acuitardo o en el acuífero profundo en la zona de agua termal sulfhídrica.

La existencia de los volúmenes de agua sulfhídrica termal en el acuífero freático fueron identificadas por medio de tomografía eléctrica en la Avenida 31 oriente entre el bulevar 5 de mayo y 16 sur (Capítulo II).

4.9 NIVEL ESTÁTICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El nivel estático o nivel de aguas freáticas (N.A.F) se define como el lugar geométrico de los puntos de saturación en que la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica. La presión atmosférica es la presión de referencia, para cuantificar el estado de presiones en un acuífero. El nivel estático es un concepto válido solo para acuíferos libres.

La profundidad del nivel estático o freático depende de los siguientes factores: precipitación pluvial anual, temperatura, evapotranspiración, espesor del estrato permeable superficial, lagos, ríos, volumen de extracción de agua por unidad de tiempo, topografía local y regional. El nivel freático debido a que depende de varios factores tiene fluctuaciones diarias, estacionales, anuales o de período largo que abarcan años.

El término superficie potenciométrica fue propuesto por el Servicio Geológico de los Estados Unidos de América para sustituir el término superficie piezométrica, y ha sido adoptado por la literatura moderna (Fetter, 1994, Price, 2003); puede ser aplicado a acuíferos libres o confinados; por ejemplo el nivel freático es una superficie potenciométrica.

Debido a que la carga hidráulica puede variar con la profundidad en un acuífero debido a flujo vertical ascendente o descendente cada nivel del acuífero podrá tener su propia superficie potenciométrica. Un pozo que penetre todo o la mayor parte del acuífero, y que reciba agua de todos sus niveles, tendrá una carga hidráulica media.

Superficie potenciométrica es la representación de la cantidad de energía mecánica del agua subterránea por unidad de peso de una parte o de todo un acuífero confinado o libre con respecto a un plano de referencia arbitrario.

La superficie potenciométrica de un acuífero confinado es la superficie representativa del nivel a que ascenderá el agua en un pozo que penetre el acuífero.

La profundidad media del nivel freático en un acuífero está dada por:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{(b_2 - b_1)} \int_{b_1(x,y,t)}^{b_2(x,y,t)} \phi(x, y, z, t) dz \quad 4.2$$

donde $b_2 = b_2(x, y, t)$ y $b_1 = b_1(x, y, t)$ son las fronteras superior e inferior del acuífero freático (Bear, 1972). Mediante una adecuada interpretación de la superficie potenciométrica en un sistema acuífero se pueden determinar, zonas de recarga y descarga, límites de cuencas subterráneas, dirección del flujo, estimación de las reservas de agua etc.

4.9.1 Evolución del nivel estático en la cuenca de Puebla

Los registros más antiguos del nivel potenciométrico datan del año 1973, posteriormente en forma no periódica se realizaron registros en los años 1980, 1990, 1996, 2002. Registros hechos por la antigua Secretaría de Recursos Hidráulicos, actualmente Comisión Nacional del Agua

Las (Figuras 4.5-4.9) muestran las curvas de igual elevación del nivel estático, en donde se puede analizar su evolución espacial y temporal a través de estos años.

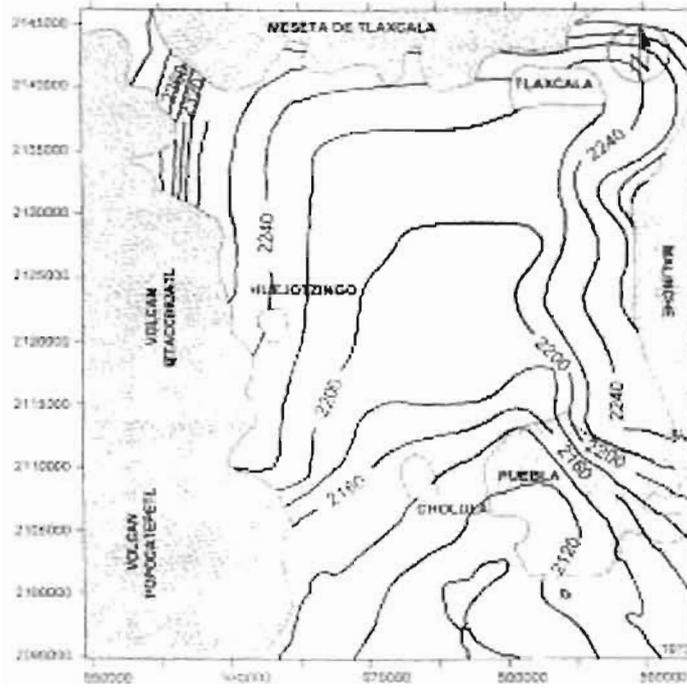


Figura 4.5. Curvas de igual elevación del nivel estático, C.N.A., 1973

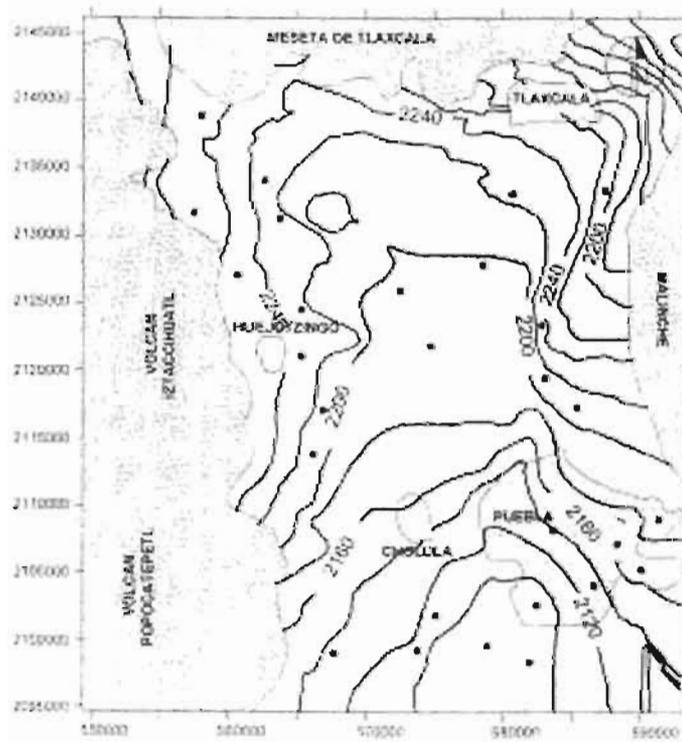


Figura 4.6. Curvas de igual elevación del nivel estático, C.N.A., año 1980

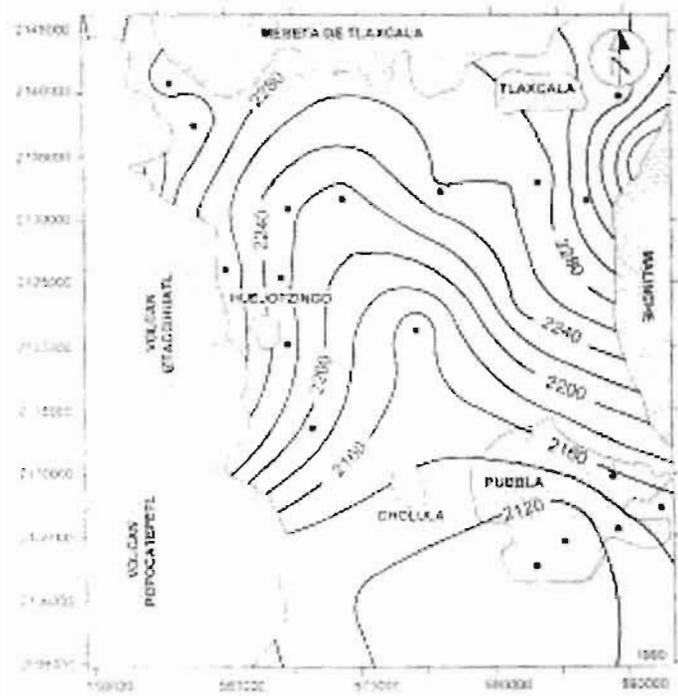


Figura 4.7 Curvas de igual elevación del nivel estático, C.N.A., año 1990.

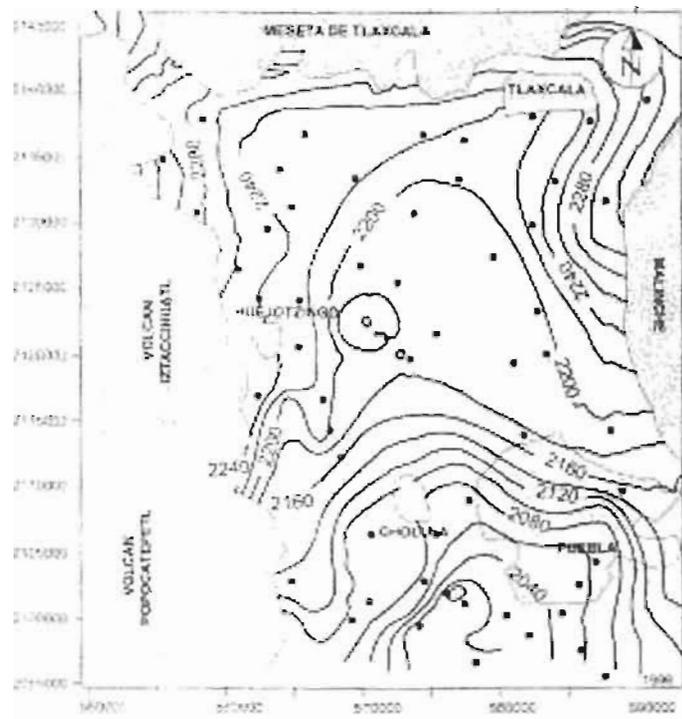


FIGURA 4.8. Curvas de igual elevación del nivel estático C.N.A., año, 1996

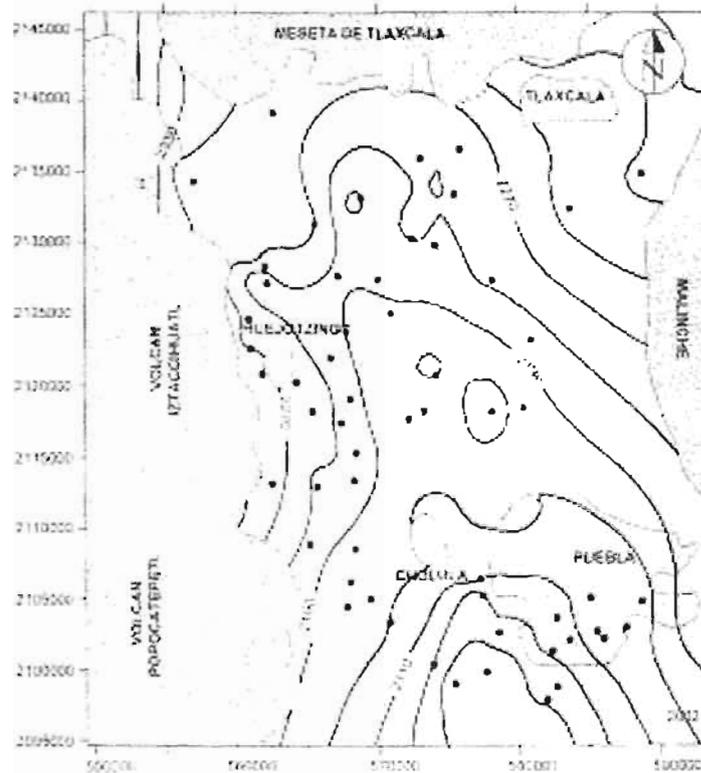


FIGURA 4.9. Curvas de igual elevación del nivel estático, C.N.A., 2002

Las curvas de igual elevación del nivel estático en la zona central de la cuenca, representan realmente el nivel estático en el acuífero libre y no el nivel potenciométrico medio que involucra a unidades hidrogeológicas de mayor profundidad. Los argumentos que hacen verdadera la afirmación anterior son:

- a) La profundidad del agua subterránea en la zona central de la cuenca es de 10 a 30 m, por lo cual no existe necesidad de excavar pozos muy profundos.
- b) El espesor del acuífero freático en la zona central de la cuenca es de 250 a 300 m de profundidad, y la profundidad de los pozos registrados en la zona es de 80 a 150 m.

La forma y espaciamento de las superficies equipotenciométricas es producto de las condiciones geomorfológicas, hidrogeológicas y propiedades del acuífero como porosidad, y conductividad hidráulica. La variación espacial y temporal de las superficies potenciométricas a corto plazo es debido a la extracción de agua.

Por la forma que tienen las líneas equipotenciométricas se identifican tres zonas de recarga, el norte de la cuenca, la Sierra Nevada en el oeste, y el volcán la Malinche en el este, la zona de descarga se identifica en el sur principalmente entre las coordenadas E-W 57000-59000 la zona en la cual se ubica el río Atoyac. Los ríos Atoyac y Zahuapan y en menor escala el río Alseseca debido a su carácter de dren de la cuenca también

contribuyen a la forma de las líneas equipotenciométricas, ya que las líneas de flujo convergen hacia ellos.

En las curvas de igual elevación del nivel estático del año 1973 (que son las más antiguas que se tienen registradas y que se toman como estado inicial en este trabajo); se observa lo siguiente: en la parte central de la cuenca la curva equipotenciométrica con valor de 2200 m, se encuentra muy separada de las otras curvas lo cual indica que el nivel estático es casi plano y por lo tanto el gradiente hidráulico es muy pequeño. Por la profundidad del estrato y el espesor saturado el centro de la cuenca es la que mayor reserva de agua de buena calidad tiene, también en el centro de la cuenca es en donde el nivel freático es muy superficial se encuentra a profundidades del orden de 5-10 m. A partir del norte de la ciudad de Puebla y en dirección sur, la distancia entre las líneas equipotenciales disminuye lo cual indica que existe un gradiente hidráulico grande, como consecuencia de una disminución del espesor saturado del acuífero superior ya que esta zona debido a la alta concentración de la población e industrias es la de mayor extracción de agua subterránea de toda la cuenca.

Los mayores abatimientos del nivel estático de la cuenca se registran en el sur, entre las ciudades de Cholula y Puebla y en el centro de la cuenca de Puebla, en el año 1973 en la zona sur el valor de la línea equipotenciométrica era de 2100 m, en el año 2002 tiene un valor de 2040 m, en el centro de la ciudad en el año 1973 la línea equipotenciométrica era de 2160 m en el 2002 es de 2110 m.

4.10 BALANCE HIDROLOGICO AÑO, 1973, 2002

El área del sistema acuífero de la cuenca de Puebla en donde se va a calcular el balance hidrológico se encuentra entre las coordenadas UTM norte-sur 2098185-2138212, este-oeste 557873-5920040 y tiene una superficie aproximada 1300 km², que es el área que va a ser modelada en este trabajo.

Los parámetros estadísticos necesarios para calcular el balance hidrológico son las medias anuales correspondientes a: precipitación, temperatura, caudal, estos datos se obtuvieron de publicaciones (C.N.A., 1990) y los anuarios climatológicos editados por la Comisión Nacional del Agua.

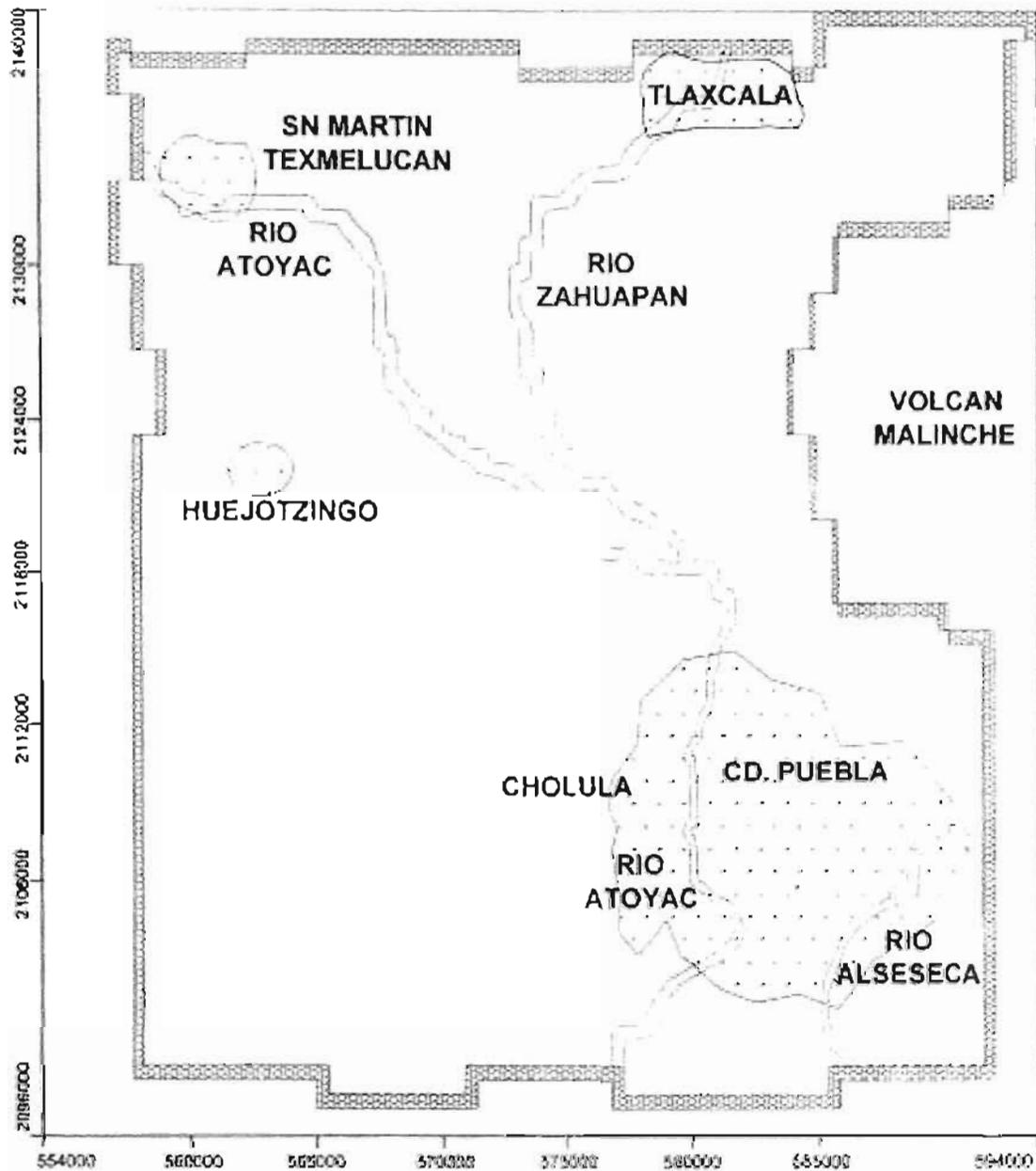


FIGURA 4.10. Área del balance hidrológico

Variables del balance hídrico global:

Precipitación (P). Cualquier estado físico del agua como granizo, nieve, escarcha, lluvia, que debido caiga sobre la superficie terrestre se denomina precipitación. Se mide mediante un aparato denominado pluviómetro. La Precipitación es el elemento más importante del balance.

Infiltración (I). Es el proceso y cuantificación de la penetración de agua desde la superficie del terreno hacia el interior del subsuelo. El agua de lluvia es la principal recarga de los acuíferos, secundariamente el agua de retorno del riego agrícola, la parte de la precipitación que alcanza el nivel estático se denomina recarga, debido a que contribuye a la renovación del agua subterránea.

La velocidad máxima a la que el agua puede infiltrarse en el suelo o roca se denomina capacidad de infiltración del terreno y varía dependiendo del grado de saturación del suelo. Si la precipitación es muy intensa, el suelo no tiene la capacidad para que se infiltre toda el agua, en esta situación la capacidad de infiltración fue rebasada por la intensidad de la lluvia. El volumen de agua que no se infiltra llena las irregularidades del terreno y con una pendiente topográfica se presenta flujo superficial.

El volumen de infiltración anual depende de múltiples factores entre los principales se pueden citar los siguientes: distribución de la lluvia en el año, temperatura media anual, conductividad hidráulica del terreno, tipo de vegetación, grado de saturación del terreno al iniciarse la precipitación. Debido a lo anterior existen varias opiniones acerca del volumen anual infiltrado Castany (1963) expresa que el volumen anual de infiltración varía de 12 % al 23 % de la precipitación, mientras que (Kessler, 1965) opina que el volumen anual de filtración es del 7 % al 70 %.

La medida directa de la infiltración para un área grande es difícil, en áreas pequeñas se mide por medio de infiltrómetros. En general la infiltración se obtiene por diferencia de los demás elementos del balance hidrológico (Castany, 1975).

Evapotranspiración (EVT). Es el proceso por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso a través de las plantas y regresa a la atmósfera en forma de vapor. Depende de dos factores muy importantes, el contenido de agua del suelo, y la clase de vegetación. Las medidas directas de la evapotranspiración real determinadas por lisímetros o evapotranspirómetros son representativas de la zona que tenga la misma vegetación, tipo de terreno, temperatura y el intervalo de medidas se hace para un día. Para áreas grandes como en el caso de la cuenca de Puebla en que se tienen microclimas y por ende diferente vegetación, tipo de terreno y variaciones muy grandes en la profundidad del nivel freático. Es mejor aplicar formulas empíricas, son más fáciles de aplicar debido a que las variables climatológicas usadas son más fáciles de obtener en las estaciones de registro. Sin embargo los valores obtenidos tendrán poca validez si no son comparados con medidas directas de la zona en que se aplican. Para calcular la evapotranspiración en este trabajo se aplicara la fórmula empírica de L. Turc debido a que se ha aplicado a mas de doscientas cuencas en todo el mundo con una gran variedad de climas (Custodio et al,1996), en toda Francia es muy usada por los hidrogeólogos con resultados satisfactorios (Castany, 1975).

Escorrentía superficial. Es la parte de la precipitación sobre una cuenca que descarga a través de causas superficiales. Las variables que influyen en la escorrentía son: intercepción de la precipitación por cubierta vegetal, almacenamiento por depresión y la capacidad de infiltración del suelo.

Intercepción por la capa vegetal. La intercepción por la cubierta vegetal depende del tipo de vegetación y cultivos. En áreas grandes la existencia de microclimas influye, otros factores que también influyen son la duración e intensidad de la tormenta. El porcentaje de intercepción de la precipitación media anual varía entre el 10 y 20 %. (Linsley et al, 1994).

Almacenamiento por depresión. Es la parte de la precipitación retenida en pozos y zanjas y otras depresiones del terreno. Cuando la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración del terreno, la lluvia empieza a llenar las depresiones superficiales al llenarse empieza el flujo de superficie hacia un cause natural. El agua al final de la lluvia se infiltra o se evapora.

Caudal de las corrientes superficiales. El caudal de un río es el volumen de agua que pasa a través de una sección en una unidad de tiempo, para medirlo se mide el área transversal y se multiplica por la velocidad del agua. El caudal de un río depende de la precipitación, de la escorrentía superficial, de la capacidad de infiltración del terreno circundante, y de la profundidad del nivel freático que convierte a un río en influente o efluente.

El Balance hidrológico de una cuenca se basa en la ley de la conservación de la masa y se expresa por:

$$\text{Precipitación} = \text{salidas} \pm \text{variación de almacenamiento en el acuífero}$$

Esta ecuación es aplicable a una región o unidad cualquiera en un período de tiempo cualquiera, en hidrogeología se conoce como ecuación de balance.

A continuación se presentan las formulas para calcular cada uno de los conceptos involucrados en el balance hidrológico de la cuenca de Puebla.

Fórmula de balance para el agua subterránea:

$$V_e - V_s = \pm \Delta v \quad 4.3$$

V_e = Volumen de entradas

V_s = Volumen de salidas

Δv = Variación en el almacenamiento en el acuífero

El volumen de entradas en el sistema acuífero se expresa por la fórmula

$$V_e = P + V_{es} + A_r + V_{er} \quad 4.4$$

donde:

P = Precipitación

V_{es} = Volumen de entrada flujo subterráneo

Ar = Volumen aguas de retorno

Ver = Volumen de entrada ríos provenientes de la Sierra Nevada y de La sierra de Tlaxco

El volumen de salidas del sistema acuifero incluye los siguientes conceptos y se expresa por la fórmula:

$$V_s = V_{ss} + V_{sr} + V_{sb} + EVT \quad 4.5$$

donde:

V_{ss} = Volumen de salidas subterráneas

V_{sr} = Volumen de salidas por ríos Atoyac y Alseseca

V_{sb} = Volumen de salidas por bombeo

EVT = Volumen de salidas por evapotranspiración

4.10.1 BALANCE HIDROLÓGICO AÑO 1973

Evapotranspiración

Depende de las condiciones climáticas, tipo de vegetación, y precipitación, profundidad del fleco capilar y el nivel estático, para calcular la evapotranspiración se utiliza la fórmula de L. Turc (Custodio et al, 1996)

$$ETR = \frac{P^2}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} = \frac{900.8}{\sqrt{0.9 + \frac{(900.8)^2}{(739.45)^2}}} = 585mm \quad 4.6$$

donde:

ETR = Evapotranspiración real en (mm/año)

P = Precipitación en (mm/año)

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

t = temperatura media anual de la zona en °C

Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial está determinado por la pendiente del terreno, la capacidad de infiltración de campo y los demás factores que afectan los términos de la ecuación de precipitación

$$P = E + I + R \quad 4.7$$

donde

P = Precipitación (mm/año)

E = Evapotranspiración (mm/año)

I = Infiltración en el terreno (mm/año)

R= Escurrimiento superficial

$$R = P - (E + I) \quad 4.8$$

$$R = 1171,040,000.00 - (760,5000,000.00 + 257,500,000.00) = 153,040,000.00$$

Tabla 3.2 Balance hidrológico del área modelada año 1973

| Volumen de entradas m ³ /año | | Volumen de salidas m ³ /año | |
|---|-----------------|--|----------------|
| Precipitación | 1,171,040,00.00 | EVT | 737,100,000.00 |
| Ves | 99,683,430.30 | Vsb | 297,262,953.87 |
| Ar | 35,735,847.00 | Vss | 22,451,594.02 |
| Ver | 124,560,000.00 | Vsr | 381,585,000.00 |
| $\Sigma Ve = 1,436,019,277.30$ | | $\Sigma Vs = 1,435,400,147.89$ | |

Variación en el volumen de almacenamiento

$$\Delta V = \Sigma Ve - \Sigma Vs$$

$$1,436,019,277.30, \text{ m}^3/\text{año}$$

$$- 1,435,400,147.89 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\Delta V = 619,129.41.00 \text{ m}^3/\text{año}$$

4.10.2 BALANCE HIDROLÓGICO AÑO 2002

Calculo de la evapotranspiración año 2003

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} = \frac{840.75}{\sqrt{0.9 + \frac{(840.75)^2}{(739.45)^2}}} = 567.76 \text{ mm}$$

escurrimiento superficial

$$R = P - (E + I)$$

$$R = 1,092,975,000.00 - (737,100.00 + 257,500,000.00) = 98,375,000.00$$

Variables hidrogeológicas medias anuales

Área de la cuenca considerada en el balance 1300 km²

Volumen precipitación media anual 1,092,975,000.00 m³

Precipitación media anual año 1944-1997 = 900.8 mm 1997-2002 = 840.75 mm

Temperatura media anual 17 °C

Ver 124,560,000.00

Caudal medio del río Atoyac 12.1 m³/s, año 1973

Caudal medio del río Atoyac 9.15 m³/s, año 2002

Caudal medio del río Alseseca 0.9 m³/s, para todo el período considerado

Evapotranspiración real 585 mm/año año 1973

Evapotranspiración real 567 mm/año año 2002

Tabla 3.3 Balance hidrológico del área modelada año 2002

| Volumen de entradas m ³ /año | | Volumen de salidas m ³ /año | |
|---|------------------|--|----------------|
| Precipitación | 1,092,975,000.00 | EVT | 737,100,000.00 |
| Ves | 99,683,430.30 | Vsb | 339,465,393.00 |
| Ar | 40,735,847.00 | Vss | 19,451,594.02 |
| Ver | 124,560,000.00 | Vsr | 315,360,000.00 |
| $\Sigma Ve = 1,355,954,277.30$ | | $\Sigma Vs = 1,411,376,987.02$ | |

Variación en el volumen de almacenamiento

$$\Delta V = \Sigma Ve - \Sigma Vs$$

$$1,411,376,987.30 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\underline{1,355,954,277.02 \text{ m}^3/\text{año}}$$

$$\Delta V = 55,422,710.28 \text{ m}^3/\text{año}$$

En la cuenca de Puebla no existe equilibrio hidrológico entre la recarga y la descarga desde el año 1973 intensificándose este desequilibrio en el año 2003, lo cual se manifiesta

en el descenso del nivel estático en la zona central de la cuenca y principalmente en la ciudad de Puebla.

En el año 1973 se tenía un equilibrio hidrológico en la cuenca de Puebla, lo cual se manifestaba en la existencia de lagunas, manantiales en la ciudad de Puebla, y un mayor caudal del río Atoyac y del río Alseseca.

Las dos causas principales que han generado el desequilibrio hidrológico en la cuenca de Puebla son la disminución de la precipitación media anual, y el aumento en las tasas de extracción de agua subterránea.

4.11 HIDROGEOQUÍMICA CONCEPTOS BÁSICOS

El agua es una sustancia químicamente muy activa que tiene capacidad de disolver y reaccionar con sustancias orgánicas e inorgánicas. La gran capacidad de disolución del agua y su elevada capacidad de reacción explica la gran cantidad de sustancias disueltas presentes en el agua natural y que forma parte de la composición química de muchas sustancias. El agua puede disolver sólidos, líquidos, y gases.

Las sustancias disueltas en el agua se presentan en forma molecular o en forma iónica, en las aguas subterráneas la forma iónica es la más importante.

Soluciones saturadas y no saturadas. Una sustancia soluble en contacto con el agua se va disolviendo hasta alcanzar un valor límite, la concentración disuelta máxima de equilibrio se llama **producto de solubilidad** (Custodio et al, 1996) y se expresa en g/l o en g/kg. Si no se alcanza la solubilidad la solución esta subsaturada y mientras exista una fase no disuelta se encuentra en régimen dinámico hacia la saturación. Si se rebasa la solubilidad, la solución está sobresaturada y tiende a precipitar sustancias disueltas.

El agua adquiere iones del medio en que circula y se almacena, algunos de los gases, líquidos y sólidos adquiridos se disuelven pero conservan sus características químicas, otros reaccionan con el agua para formar otras sustancias químicas.

La reacción del agua con su medio, depende de su pH, potencial redox, alcalinidad, gases disueltos como CO₂, oxígeno disuelto O₂, sólidos totales disueltos, y variables de estado como presión y temperatura.

La composición química del agua subterránea depende de:

1. El aerosol atmosférico en la zona en que ocurra la lluvia.

El aerosol atmosférico está formado en mayor proporción por partículas sólidas y en menor proporción por líquidas. El radio de las partículas varía de 0.2 μ m a 1 μ m, a estas partículas se les conoce como núcleos. El aerosol atmosférico está formado por sal marina emitida a la atmósfera por el rompimiento de las burbujas de las olas, (la concentración de la sal marina depende de la distancia al océano), polvo procedente del suelo levantado por el viento constituido principalmente por silicatos, partículas de erupciones volcánicas, humos procedentes de la quema de combustibles fósiles, y

compuestos químicos, fundamentalmente, sulfatos y nitratos derivados de reacciones químicas entre los componentes de la atmósfera. Las concentraciones de los núcleos expresadas en número por centímetro cúbico son, cerca de la superficie de los océanos de mil, en los continentes de diez mil, en las grandes ciudades y zonas industriales de cien mil (Font, 1991).

2. La composición química de la roca en donde se almacena y circula.

La evolución físico-química del agua subterránea en un sistema acuífero se debe principalmente a los sistemas de flujo regional, e intermedio y a la longitud recorrida que va alterando químicamente mediante disolución, hidrólisis, hidratación, oxidación, y reducción, rocas de distinta composición mineralógica a diferente profundidad. Estos sistemas de flujo tienen sus repercusiones en la composición físico-química del agua subterránea debido a que se incorporan iones de rocas más profundas y se van sumando a la composición iónica del agua en las zonas de descarga, en consecuencia la concentración de sólidos totales disueltos se incrementa en la dirección del flujo.

Al aumentar la profundidad disminuye la conductividad hidráulica de la roca y disminuye la velocidad del agua subterránea y en consecuencia aumenta el tiempo de contacto agua-roca dando tiempo para una mayor disolución de minerales, paralelamente al aumentar la profundidad aumenta la presión y la temperatura, el incremento de temperatura debido a la circulación profunda del agua puede incrementar o disminuir la solubilidad de algunos minerales, por ejemplo la calcedonia viene siendo más soluble a mayor temperatura resultando un incremento en la concentración del sílice, inversamente la solubilidad de la calcita decrece con el aumento de temperatura (Thomas et al, 1996).

4.11.1 Breve descripción química del acuífero freático en la cuenca de Puebla

Los análisis físico-químicos más antiguos del agua subterránea de la cuenca de Puebla se que se tienen se remontan al año de 1990. En los años de 1996-97 se hicieron análisis físico-químicos del agua de 78 pozos localizados en toda la cuenca de Puebla (Tabla A.1). En el anexo (A) se presentan las tablas referentes a los análisis físico-químicos del acuífero freático y del acuífero de agua termal sulfhídrica. Dichos análisis reportan la concentración de los iones fundamentales en el agua subterránea que son: Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3H^- , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , el CO_2 , pH y otros iones como SiO_2 , CaCO_3 , NO_3 , además de los parámetros físicos como conductividad eléctrica, y sólidos totales disueltos.

La concentración de sólidos totales disueltos en el agua subterránea depende de la longitud recorrida y tiempo de contacto agua-roca, por lo tanto se puede asociar con la zona de recarga o de descarga del acuífero o con sistemas de flujo profundos, intermedios o locales.

En las zonas de recarga del acuífero el agua tiene la más baja concentración de sólidos totales disueltos debido a que es agua de reciente infiltración con poco recorrido y tiempo de contacto con la roca, por lo cual no ha disuelto minerales ni transportado iones, en las zonas de descarga el agua se caracteriza por un alto contenido de sólidos totales disueltos debido a un mayor recorrido y tiempo de contacto con la roca.

La evolución espacial y temporal del contenido de STD en el agua subterránea a través de una adecuada correlación con la topografía y las rocas por las que circuló, proporciona los elementos suficientes para identificar rutas de flujo, los parteaguas subterráneos, áreas de mayor o menor conductividad hidráulica, e incluso algunas anomalías como fuentes puntuales de contaminación o de mineralización.

En la cuenca de Puebla con la concentración de sólidos totales disueltos medidos se definen cuatro zonas de agua subterránea:

1. En las zona de recarga, del volcán Popocatepetl e Iztaccíhuatl y el volcán la Malinche, los sólidos totales disueltos son del orden de 200 mg/l, es agua meteórica de reciente infiltración.
2. En la región central de la cuenca que tiene el papel de zona de tránsito los sólidos totales son del orden de 500 mg/l, perteneciente a sistemas de flujo intermedios.
3. En la zona centro-norte de la cuenca 850 mg/l, esta concentración tan alta se debe a la velocidad de flujo que es muy lenta a través de sedimentos lacustres de baja conductividad hidráulica dando tiempo suficiente para la mineralización del agua.
4. En la ciudad de Puebla, varía de 200 mg/l en el este a 1000 mg/l, se analizarán con mas detalle estos valores en el (Párrafo, 4.11.2)

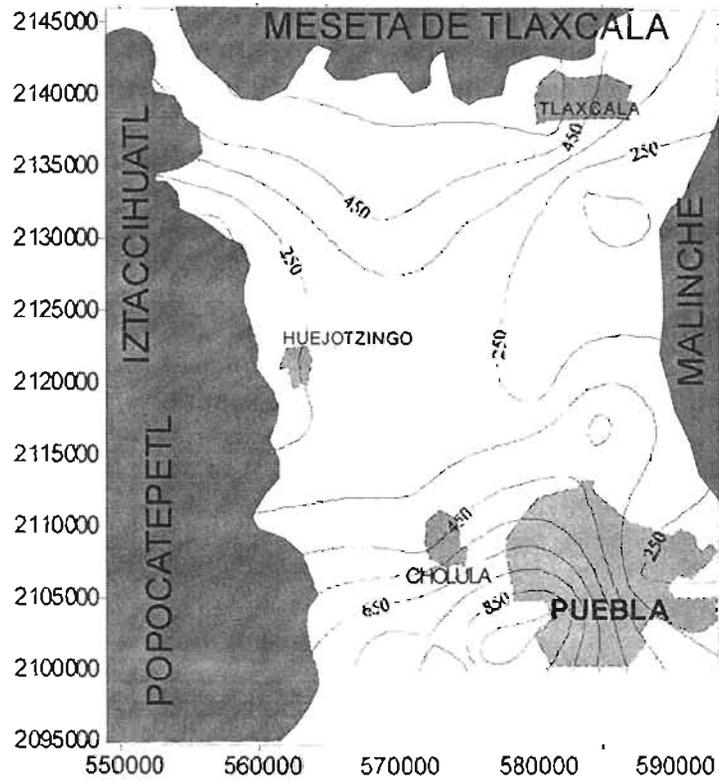


Figura 4.11 Curvas de isoconcentración de sólidos totales disueltos mg/l, año 1990

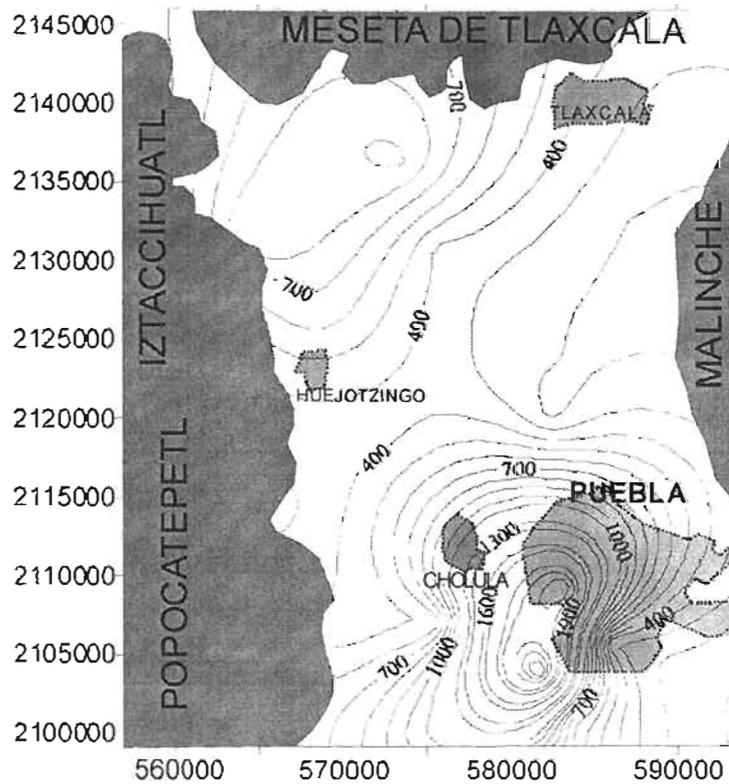


Figura 4.12 Curvas de isoconcentración sólidos totales disueltos mg/l, año 1997

Se observa que existe un incremento aproximado de 300 mg/l en la concentración de sólidos totales disueltos del año 1990 al año 1997 en la zona centro-norte de la cuenca, en el suroeste de la ciudad de Puebla el incremento es del orden de 1000 mg/l. Lo anterior es posible que se deba a dos causas:

- a) Los pozos perforados después del año 1990 tengan mayor profundidad y extraigan agua de mayor recorrido y tiempo de contacto con la roca y en consecuencia con mayor concentración de sólidos totales disueltos.
- b) Los pozos a mayor profundidad penetran el acuitardo formado por arcillas lacustres del Plioceno producto de una cuenca endorreica, cuya única vía de desfogue fue la evaporación, y por lo tanto se concentraban sales en el fondo. En consecuencia el agua que se almacena y circula por el acuitardo tiene elevadas concentraciones de sólidos totales disueltos.

4.11.2 Breve descripción química del acuífero freático en la ciudad de Puebla

En la ciudad de Puebla se han identificado por medio de análisis físico-químicos dos hidroestratos, el primero es de agua dulce de buena calidad contenida en el acuífero freático, el segundo es de agua termal sulfídrica proveniente del acuífero profundo que en algunos puntos está contenido a partir de los 160 m de profundidad.

En las (Figuras 4.13, 4.14), se muestran las curvas de isoconcentración de STD de los años 1990, 2002, de los análisis de estas curvas se puede concluir lo siguiente:

1. La concentración de sólidos totales disueltos en el este de la ciudad en los años 1990, 2000, 2002 es del orden de 200-300 mg/l, esto se debe a que alumbran agua meteórica de reciente infiltración y corto recorrido de la zona del volcán la Malinche. Al suroeste de la ciudad el contenido de STD es del orden de 1200-2000 mg/l. (sistema Atlixcayotl 9 pozos, sistema recta Cholula 5 pozos, sistema la Carcaña, sistema Momoxpan) aunque no se tienen medidas con piezómetros es muy posible que en esta zona asciendan flujos regionales profundos cuyo origen es la sierra Nevada y que circularon a través del acuífero profundo formado por calizas del Cretácico. Las evidencias son de tipo hidrogeoquímico: y son la concentración tan alta de STD 1200-2000, calcio 100-200 mg/l y magnesio 70-135 mg/l, los cloruros de 20 a 80 mg/l indican un largo recorrido (Tablas A.2,-A.3, A-4, Anexo A). Por el contenido de STD puede pensarse que esta agua esté relacionada con el agua termal sulfhídrica. Un parámetro que indica un origen no volcánico del agua de la zona sureste es el contenido de cloruros que es menor al contenido de cloruros de los pozos de agua sulfhídrica y el contenido sulfatos es mucho menor, (Tabla A.5-A.7). Pero, se necesitan más estudios de química isotópica para determinar si estas aguas están relacionadas con el agua termal sulfhídrica. En el centro de la ciudad en donde se localiza la zona de aguas termales sulfhídricas el contenido de STD es del orden de 2400 mg/l.
2. Tomando como referencia las curvas de STD del año 1990 se observa que en el año 2002 en la parte central y sureste de la ciudad se registra un aumento considerable en la concentración de STD de aproximadamente 400 mg/l. Este incremento se debe a la propagación de agua termal sulfhídrica en el acuífero freático. (En el capítulo V la afirmación anterior de demostrará por medio de un modelo de flujo y transporte).
3. La concentración de STD disminuye en la dirección norte y este de la ciudad.

Con base en el contenido de Sólidos Totales Disueltos y en lo expuesto en los puntos anteriores en la ciudad de Puebla se identifican tres sistemas de flujo de agua subterránea con características físico-químicas diferentes:

- a) Sistema de flujo regional cuyo origen es la infiltración de las precipitaciones pluviales en la Sierra Nevada y es alumbrada por pozos ubicados en el suroeste de la ciudad de Puebla, contenido de STD 2000 mg/l.
- b) Sistema de flujo local cuyo origen es la infiltración de las precipitaciones en el volcán la Malinche contenido de STD de 200 mg/l.
- c) Sistema de flujo hidrotermal su contenido de STD en la superficie presenta un valor máximo del orden de 4000 mg/l.

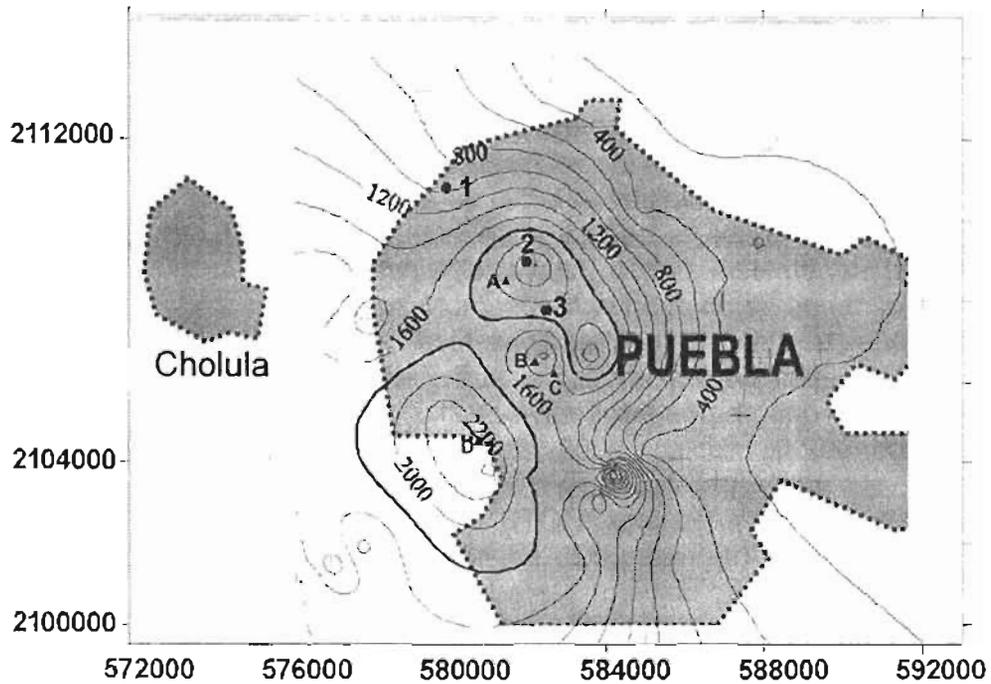


Figura 4.13 Curvas de isoconcentración de sólidos totales disueltos mg/l, Cd. de Puebla, año 1990

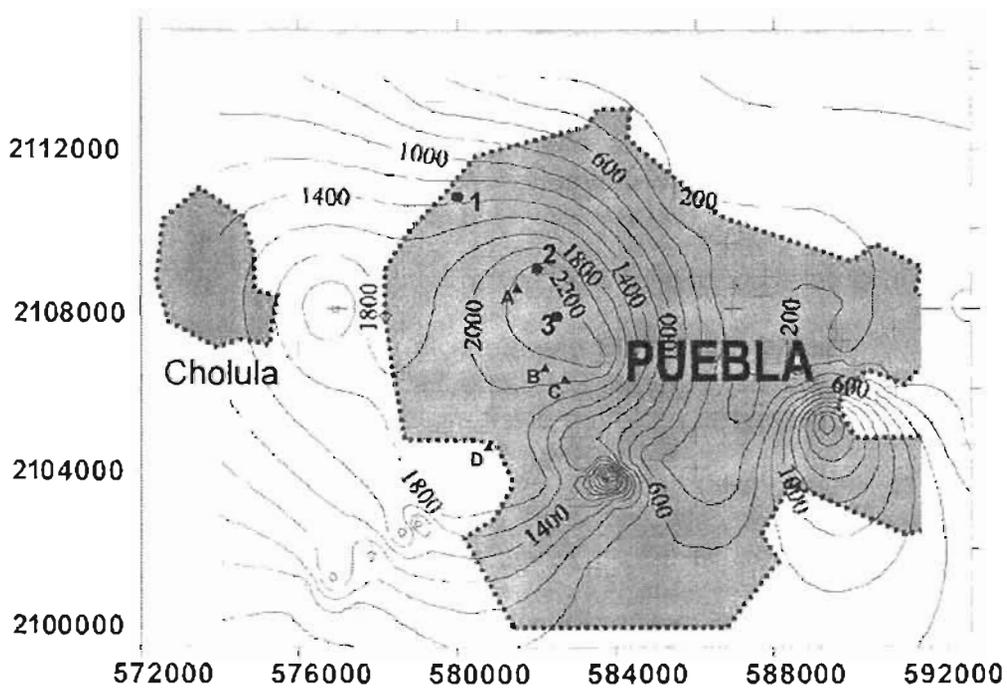


Figura 4.14. Curvas de isoconcentración de sólidos totales disueltos mg/l, Cd. de Puebla, año 2002

4.11.3 Breve descripción química del agua termal sulfhídrica en la ciudad de Puebla

Los límites en el acuífero superior de la zona de aguas sulfhídricas termales se establecen con base en los siguientes parámetros: la presencia de materiales como el travertino producto de la precipitación de CaCO_3 disuelto en el agua geotermal, la alta concentración de sólidos totales disueltos y la presencia de iones típicos de ambientes geotermales en altas concentraciones como sulfatos SO_4^{-2} , sulfuros solubles S^{-2} y sulfuro de hidrogeno H_2S (muy tóxico), boro (B). Los valores de concentración de sólidos totales disueltos del agua termal sulfhídrica son de 2200-3893 mg/l. También aumenta notablemente la concentración de calcita y magnesio con respecto al agua del acuífero freático en toda la cuenca.

Se han realizado varios análisis en la zona de aguas sulfhídricas, con el objetivo de determinar la calidad del agua por medio de los elementos físico-químicos presentes (Prieto, 1993). Los análisis físico-químicos de los pozos localizados en la zona de agua termal sulfhídrica se presentan en (Tablas A.5-A.7, Anexo A).

En la zona de agua termomineral existen 36 pozos de agua potable con un gasto de extracción de 25-35 l/s, 3 pozos con artesianismo y termalismo y tres manantiales de agua termal sulfhídrica, Agua Azul, Rancho Colorado, La Paz (Figura 4.16).

El agua dulce en la vecindad de la zona de agua termal sulfhídrica debido a la propagación por convección del soluto presenta un notable aumento en la concentración de sulfatos y de STD, lo anterior ha provocado la clausura de cuatro pozos (Prieto, 1993) debido a que el agua no cumplía las normas de calidad.

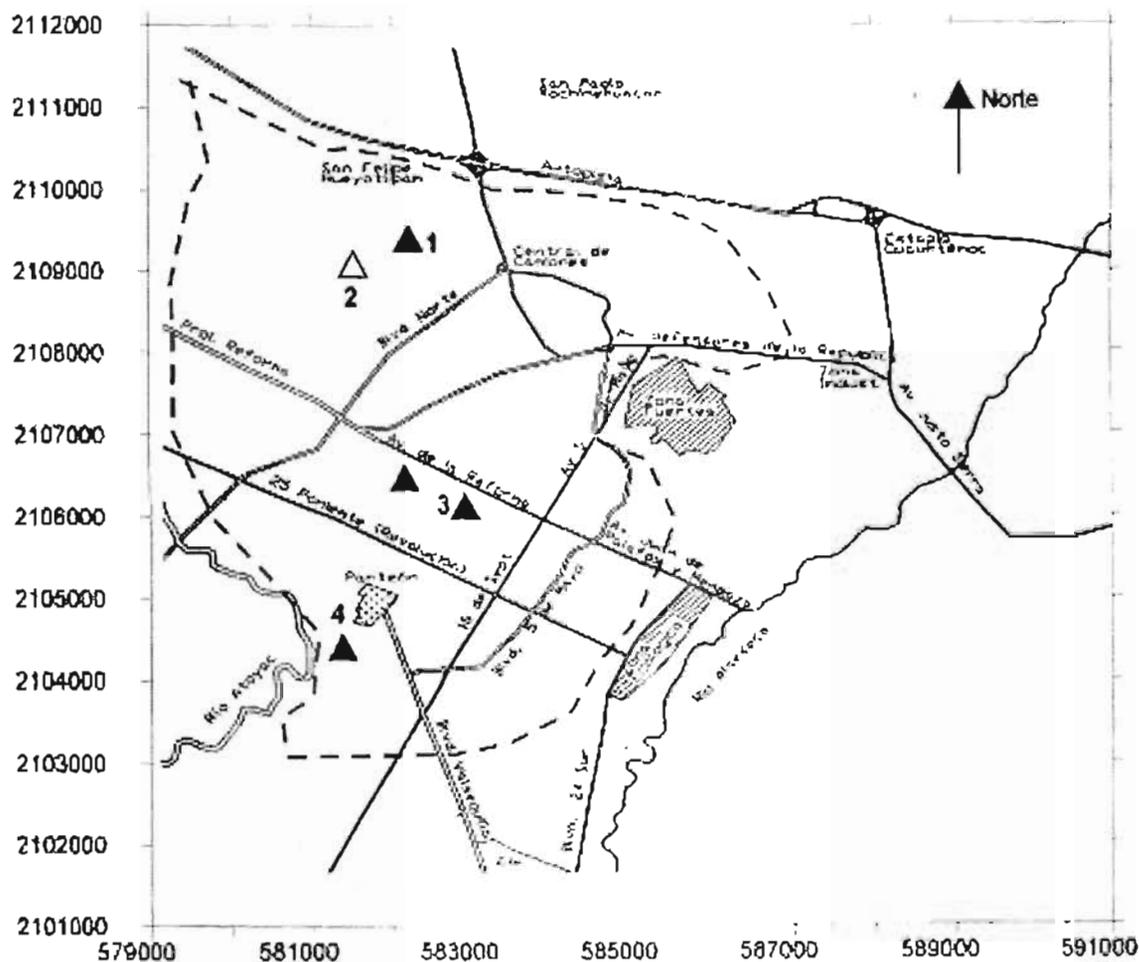


Figura 4.15. Zona de aguas termales sulfídicas, ubicación de manantiales ▲ 1 manantial Rancho Colorado, Δ 2 manantial seco (hace aproximadamente 20 años), ▲ 3 manantiales La Paz, ▲ 4 manantial Agua Azul.

En las (Figuras 4.16-4.18), se presentan las curvas de isoconcentración de sólidos totales de la zona de agua sulfídica; tomando como referencia el año 1990, se observa que, para año 2002 existe un aumento considerable en la concentración de sólidos totales disueltos en toda la zona de agua sulfídica, en el sureste es de 600 mg/l, en el resto de la zona es del orden de 400 mg/l. En la zona de agua sulfídica hay aproximadamente 20 pozos que alumbran agua con iones típicos del agua sulfídica y la concentración de sólidos se encuentra en el intervalo de 1300-3800 mg/l.

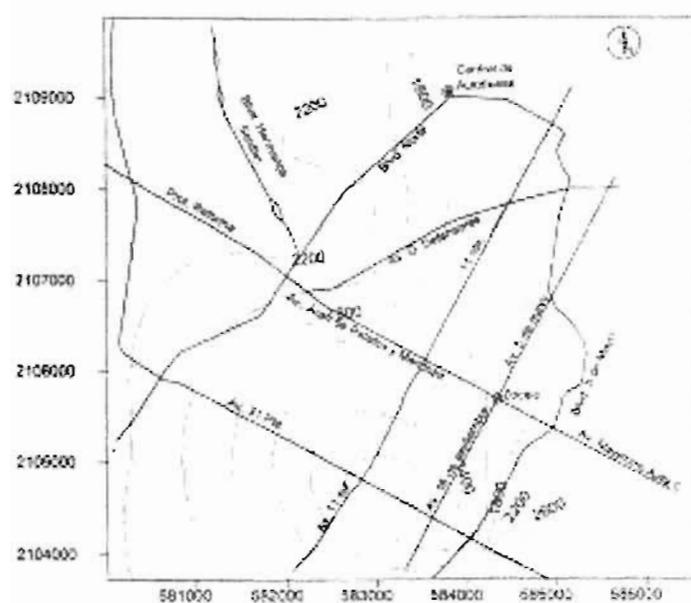


Figura 4.16. Curvas de isoconcentración de sólidos totales disueltos, zona de agua termal sulfídrica año 1990.

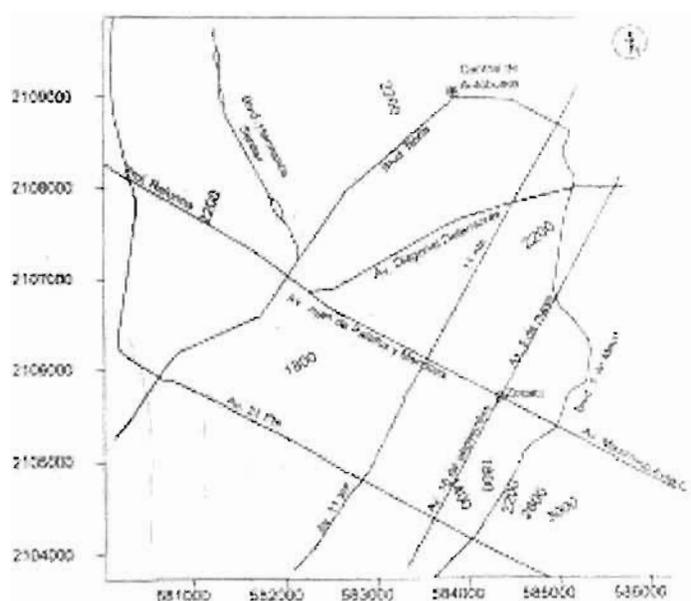


Figura 4.17. Curvas de isoconcentración de sólidos totales disueltos, zona de agua termal sulfídrica año 1996.

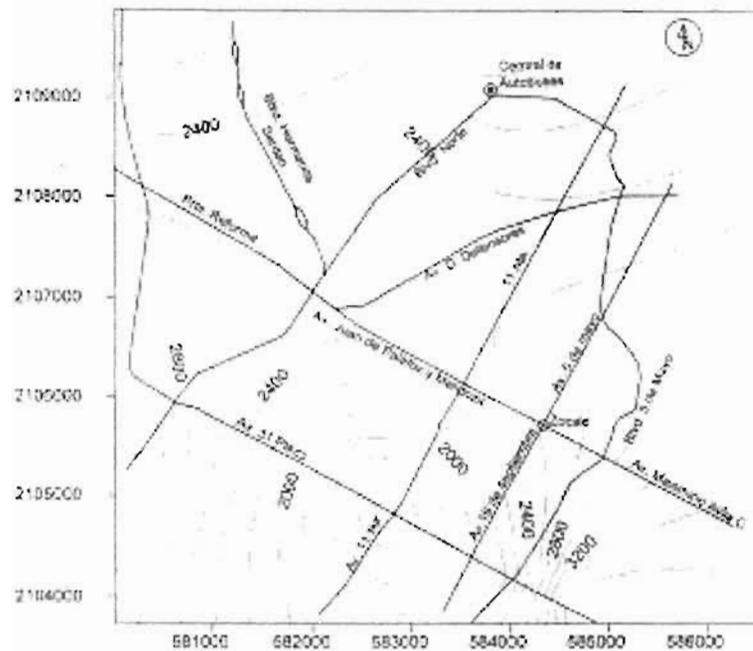


Figura 4.18. Curvas de isoconcentración de sólidos totales disueltos, zona de agua termal sulfídrica año 2002

En los pozos que alumbran agua sulfídrica el intervalo de la temperatura del agua es de 25 °C a 28 °C, temperatura muy superior a la media anual en la ciudad de Puebla (17 °C). De acuerdo con la clasificación de Schoeller (1962), el agua sulfídrica se clasifica como termal ya que cumple la desigualdad

$$t > t_m + 4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 4.8$$

donde

t = Temperatura del agua analizada.

t_m = Temperatura media anual del lugar.

La interpretación de los análisis físico-químicos del agua termomineral permite concluir lo siguiente:

El agua dulce de los pozos localizados en la zona sulfídrica, no contiene compuestos sulfurosos y disminuye notablemente su concentración de calcita y magnesio, pero es mayor en comparación a la del resto de la cuenca. La diferencia de temperaturas y composición iónica del agua de la zona sulfídrica indica la existencia de dos tipos de agua. Una de origen (volcánico) hidrotermal y el otro de origen meteórico, aunque estén contenidas en unidades hidrogeológicas independientes existe una mezcla de agua en la

vecindad de los pozos sulfhídricos lo cual se corrobora por el aumento en la concentración de sólidos totales disueltos del agua dulce.

Los cuerpos magmáticos, al disminuir su temperatura y presión liberan gases compuestos por azufre, boro, nitrógeno, potasio, anhídrido carbónico y otros elementos. El boro (B) es un elemento que sirve como un indicador del origen del agua subterránea, ya que el agua meteórica lo contiene en una concentración de 0.01 a 1 mg/l, es decir es un elemento traza. En concentraciones mayores a 1 mg/l en el agua subterránea indica procedencia volcánica.

El agua de sistemas geotermales a altas temperaturas tienen un pH neutral un anión dominante el cloruro, más de 50 mg/l de Cl⁻, (Nicholson, 1993; Custodio et al, 1996). El agua de la zona sulfhídrica tiene concentraciones de cloruro del orden de 80 a 100 mg/l, lo cual indica un origen magmático.

En la (Tabla A.7) se presentan los pozos en donde el agua tiene una concentración de boro mayor a 1 mg/l, o el cloruro se encuentra en una concentración mayor a 50 mg/l.

La pérdida de gases disueltos, el paso de un medio reductor a un medio oxidante, y el enfriamiento de las aguas termominerales, son causas que cambian el ambiente químico del agua termomineral cuando alcanza la superficie del terreno, en consecuencia se genera la precipitación de CaCO₃ que forma depósitos de travertino.

4.12 PRINCIPALES RESULTADOS DEL CAPITULO

El máximo abatimiento del nivel potenciométrico desde el año de 1973 hasta el año 2002 de toda la cuenca se registra en la zona sur de la ciudad de Puebla y tiene un valor estimado de 80 m.

En la ciudad de Puebla con base en la concentración de sólidos totales disueltos y en los iones presentes en el agua subterránea, afloran tres sistemas de flujo de agua subterránea: flujos regionales que tienen su origen en la Sierra Nevada, flujos de origen geotermal, y flujo local proveniente del volcán la Malinche, la composición físico-química del agua de dichos flujos es muy diferente y en algunas zonas no (sistema Atlixcayotl) cumple la norma de calidad para consumo humano.

En la zona central de la ciudad de Puebla existe un hidroestrato de agua termal sulfhídrica; que tiene una concentración de sólidos totales disueltos del orden de 2000-4000 mg/l, y temperatura media de 28 °C.

El agua termal sulfhídrica en cuatro pozos presenta artesianismo a partir de 160 m de profundidad.

El agua termal sulfhídrica alcanza la superficie en varios puntos de la ciudad a través de los manantiales, Agua azul, Rancho colorado, La Paz. El nivel estático en las inmediaciones de la zona de aguas sulfhídricas fluctúa de 1 a 5 m de profundidad y es constante todo el año.

Existe un déficit entre la descarga y la recarga de agua en el sistema acuífero de la cuenca de Puebla, lo cual se manifiesta en el descenso del nivel estático principalmente en el este y sur de la ciudad de Puebla.

4.13 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

El origen del agua sulfhídrica es geotermal según se desprende de la concentración del boro mayor a 1 mg/l y el cloruro mayor a 50 mg/l, además de la presencia de sulfuros y la alta concentración de sólidos totales disueltos, todos ellos elementos típicos de sistemas geotermales. La cercanía del volcán la Malinche a la ciudad de Puebla (aproximadamente 20 km) indica que el sistema geotérmico está relacionado con el magmatismo de este volcán.

Debido al abatimiento del nivel estático en el acuífero freático en la zona de aguas sulfhídricas; la diferencia de presiones entre el acuífero libre y el acuitardo se incrementa, esta desigualdad de presiones genera que el flujo profundo circule hacia la superficie para alcanzar el equilibrio de presiones generando un aumento de flujo de agua sulfhídrica hacia el acuífero freático.

Con base en la columna litoestratigráfica de pozos para extracción de agua potable y en sondeos de prospección geoeléctrica, geología de campo, el sistema acuífero de la cuenca de Puebla está formado por cuatro unidades hidrogeológicas:

1. Acuífero freático.
1. Acuitardo.
2. Acuífero medio.
3. acuífero profundo.
4. Basamento geohidrológico.

4.14 DISCUSIÓN

La presencia de agua termal sulfhídrica en superficie y en profundidad se presenta únicamente en una zona de la ciudad de Puebla con excepción del pozo Volkswaguen que se encuentra aproximadamente a 6 km al noroeste de la zona de agua termal sulfhídrica, dicho pozo a 160 m de profundidad al perforar las arcillas del Plioceno alumbro agua sulfhídrica y se presentó artesianismo. Fuera de esta zona no se presentan aguas sulfhídricas según lo demuestran los pozos en la ciudad de Puebla cuya profundidad alcanza las arcillas del Plioceno (acuitardo) y/o las calizas del Cretácico, Pozo maravillas, Oasis, al norte de la ciudad, en el sur el pozo San Bartolo 2, Loma Bella no. 3 entre otros. Es de importancia citar el pozo Analco de 170 m de profundidad situado a 1.5 km de la zona de agua sulfhídrica y es productor de agua dulce de buena calidad ligeramente dura.

Con base en los argumentos anteriores se puede afirmar que el agua sulfhídrica contenida en cualquiera de las unidades hidrogeológicas no constituye un acuífero de carácter regional.

MODELO NÚMÉRICO DE FLUJO Y TRANSPORTE DE MASA EN EL ACUÍFERO DE LA CUENCA DE PUEBLA

5.1 INTRODUCCIÓN

Los modelos numéricos de flujo de agua subterránea y transporte de masa permiten simular un sistema acuífero o parte de él bajo las más diversas condiciones hidrogeológicas. Los modelos numéricos tienen la ventaja de ser flexibles, “fáciles de calibrar”, y pueden representar procesos como, reacciones químicas, transferencia de calor o decaimiento radioactivo. La solución de los modelos numéricos permite conocer y predecir la evolución temporal y la variación espacial de las variables y parámetros de un acuífero.

5.2 CONCEPTOS BÁSICOS

El medio poroso es un material de dos fases, la matriz sólida y los espacios vacíos, ambas fases tienen características geométricas microscópicas aleatorias, los espacios vacíos pueden estar intercomunicados o aislados.

Los principales parámetros del medio poroso para el estudio del flujo de agua subterránea y transporte de masa son: porosidad volumétrica, porosidad efectiva, granulometría, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento específico y geometría del medio.

Fase α

El medio poroso puede contener en sus espacios vacíos materia en fase líquida o gaseosa, cada fase se denomina fase $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$. En el medio poroso puede haber varias fases líquidas inmiscibles cada una separada por su frontera y ocupando una porción del espacio vacío, en esta condición es un medio poroso multifásico.

$$V_{\alpha_1} \cap V_{\alpha_2} \cap V_{\alpha_3}, \dots, \cap V_{\alpha_n} = 0 \quad 5.1$$

donde

V_{α_n} = Volumen de cada fase

Grado de saturación de una fase es la relación entre el volumen de una fase y el volumen de vacíos:

$$G_{s\alpha} \% = \frac{V_{\alpha}}{V_v} (100) \quad 5.2$$

En un medio poroso pueden existir varias fases líquidas: agua, aceite, gasolina, petróleo, o también puede existir una sola fase producto de la mezcla de varios líquidos miscibles.

Cada fase α puede tener varios componentes, un componente es una especie con estructura química homogénea identificable. Ejemplo, el agua puede contener bicarbonatos, gases disueltos como el sulfuro de hidrogeno H_2S etc.

La porosidad efectiva o cinemática es en donde ocurren los procesos de flujo de agua y transporte de masa, determina la velocidad de filtración, la cual controla el transporte advectivo, se define por:

$$n_e = \frac{V_{vi}}{V_i} \% \quad 5.3$$

V_{vi} = Volumen de vacíos comunicados.

V_i = Volumen de la muestra.

La porosidad efectiva es menor o igual que la porosidad volumétrica $n_e \leq n$

Volumen Elemental Representativo (VER) de un medio poroso

Para determinar las propiedades hidrogeológicas medias del medio poroso se debe seleccionar un volumen elemental representativo (VER). El VER es el volumen mínimo en que las propiedades hidrogeológicas de interés son constantes. El tamaño del volumen elemental representativo puede variar de acuerdo al tipo de roca o suelo en estudio, también puede variar de acuerdo a la propiedad o propiedades de interés que se estén midiendo. Para seleccionar la magnitud del VER no existe un volumen determinado para cada tipo de medio poroso sino que, el tamaño mínimo del VER para que no varíe ninguna propiedad intensiva debe cumplir (Bear, 1991):

$$\frac{\partial n(x, y, z)}{\partial V} = 0 \quad (x \in V), (y \in V), (z \in V) \quad 5.4$$

donde:

n = Porosidad volumétrica.

V = Volumen elemental representativo.

Conductividad hidráulica del medio poroso

En un medio poroso isotrópico la conductividad hidráulica es un escalar, en un medio poroso heterogéneo y anisotrópico es un tensor de segundo orden K_{ij}

$$K = K(x, y, z)$$
$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad 5.5$$

debido a que es un tensor simétrico $K_{ij} = K_{ji}$ sólo se necesitan conocer seis componentes, para conocer el tensor de conductividad hidráulica. Un tensor se dice que es simétrico si la matriz de sus componentes cartesianas es simétrica $T_{ij} = T_{ji}$ (Malvern, 1969).

$$K_{ij} = K_{ij} \delta_{ij}, \text{ donde } \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } i = j \\ 0, & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Para el caso en que los ejes coordenados coincidan con los ejes principales de conductividad hidráulica

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad 5.6$$

Es importante enfatizar que la heterogeneidad y la anisotropía en un medio poroso son dos conceptos independientes (Freeze R. and Cherry J. 1979; Cheng, 2000), y pueden haber diversas combinaciones, a saber:

- Homogéneo e isotrópico K es un escalar constante.
- Heterogéneo e isotrópico $K = K(x, y, z)$
- Homogéneo y anisotrópico K_{ij} son constantes
- Heterogéneo y anisotrópico $K_{ij} = K_{ij}(x, y, z)$

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Coeficiente de almacenamiento específico

La simulación de flujo transitorio requiere datos sobre el coeficiente de almacenamiento específico para acuíferos confinados y de la porosidad efectiva para acuíferos no confinados.

Cuando se tiene una sucesión estratigráfica, es más conveniente trabajar con propiedades homogéneas equivalentes que representan a la sucesión estratigráfica en su conjunto, el coeficiente de almacenamiento específico promedio equivalente para un medio formado por n capas (Cheng, 2000), está dado por:

$$S_s = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^n S_{s(i)} b_i \quad 5.7$$

donde b es el espesor total del acuífero

Coeficiente de transmisividad

El coeficiente de transmisividad para un acuífero homogéneo se define por:

$$T = Kb \quad 5.8$$

donde

b = Espesor saturado del acuífero

K = Conductividad hidráulica

En un medio poroso formado por n capas horizontales el coeficiente de transmisividad equivalente se determina por:

$$T = Kb = \sum_{i=1}^n b_i K_i = \sum_{i=1}^n T_i \quad 5.9$$

5.3 PROPIEDADES INTENSIVAS Y EXTENSIVAS DE UN MEDIO CONTINUO

Para su modelación el medio poroso se considera un medio continuo o macroscópico. A los elementos de un medio macroscópico o continuo se les denomina partículas. Considérese un medio continuo para un tiempo t cualquiera, cada partícula $X \in B$ ocupa una posición en el espacio R^3 .

Las coordenadas x de la partícula i ésima X están dadas en un tiempo t por

$$x_i = p(X_i, t) \quad 5.10$$

Las propiedades que identifican a un sistema macroscópico se dividen en extensivas e intensivas. Las propiedades extensivas son aquellas cuyo valor depende de la cantidad de materia presente, como masa, peso y cantidad de calor entre otras. Las propiedades intensivas son aquellas cuyo valor no depende de la cantidad de materia presente, ejemplo presión, temperatura. Una propiedad intensiva Π , está definida para cada tiempo y para cada partícula y puede ser escalar o vectorial. Las propiedades intensivas pueden ser descritas de dos maneras diferentes; en términos Lagrangianos o en términos Eulerianos. Sea un medio continuo con una propiedad Π , si la función $\Phi(X_i, t)$ representa el valor de la propiedad Π en la partícula X y en el tiempo t . Entonces la función $\Phi(X_i, t)$ es la descripción Lagrangiana de la propiedad Π .

Si la función $\psi(x_i, t)$ representa el valor de la propiedad Π en el punto x y en el tiempo t . Entonces la función $\psi(x_i, t)$ es la descripción Euleriana de la propiedad intensiva Π . Si se considera una partícula X en la coordenada x en un tiempo t , entonces la descripción Lagrangiana y Euleriana deben ser iguales y se expresan como:

$$\Phi(X_i, t) = \Psi(p(X_i, t), t) \quad 5.11$$

En todo tiempo existe una correspondencia biunívoca entre puntos materiales y puntos del espacio físico. La condición necesaria y suficiente para la existencia de funciones inversas es que el determinante Jacobiano, cuyos elementos son:

$$J_{ij}(x, t) = \frac{\partial p_i}{\partial X_j}(X, t) \quad 5.12$$

sea no singular es decir

$$J = \left. \frac{\partial x_i}{\partial X_i} \right| \neq 0 \quad 5.13$$

5.4 CONSERVACIÓN DE LA MASA

El principio de la conservación de la masa es un concepto esencial para la comprensión y diseño de modelos de flujo y transporte de masa en agua subterránea. Considérese un volumen arbitrario V fijo en el espacio, acotado por una superficie S como se muestra en la (Figura. 5.1).

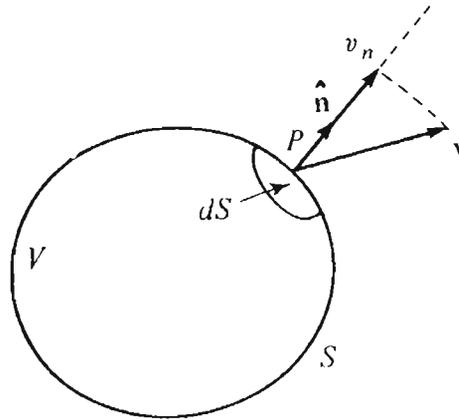


Figura 5.1 Volumen de referencia en el espacio.

Si un medio continuo de densidad ρ llena el volumen en el tiempo t , la masa total en el volumen V es

$$M = \int_V \rho dV \quad 5.14$$

La densidad de masa ρ es una función continua que depende de la posición y el tiempo.

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad 5.15$$

La variación de la masa total con respecto al tiempo, en el volumen es

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad 5.16$$

si la masa no se crea ni se destruye dentro del volumen V , esta deberá ser igual a la cantidad de masa que entra a través de la superficie S . La cantidad de masa que sale a través del elemento ds de superficie en P es $(\rho v_n ds)$ donde $v_n = \vec{v} \cdot \hat{n}$ es la componente normal exterior de la velocidad. Entonces la cantidad de flujo que entra a través de la superficie S esta dada por

$$\int_S (-\rho v_n) ds = - \int_S \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dS = - \int_V \nabla \cdot (\rho \vec{v}) dV \quad 5.17$$

donde la ultima integral proviene de la aplicación del teorema de la divergencia de Gauss. La **ley de la conservación de la masa** establece que la masa de una parte específica de un medio continuo permanece constante y por lo tanto la derivada material de (5.16) es cero. La variación de M en (5.16) es

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) dV = 0 \quad 5.18$$

puesto que esta ecuación se conserva para un volumen arbitrario V cualquiera, el

integrando ha de ser nulo, esta ecuación se denomina **ecuación de la continuidad**

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho(\nabla \cdot v) = 0 \quad 5.19$$

5.5 MARCO TEÓRICO

Un modelo matemático es la representación simplificada de un sistema natural por medio de las ecuaciones que representan el fenómeno.

En las siguientes secciones se analizan e interpretan físicamente los términos que forman las ecuaciones de flujo y transporte, así como también las condiciones necesarias y suficientes para su solución numérica.

5.5.1 Ecuaciones diferenciales parciales de flujo

La deducción de las ecuaciones de flujo y transporte están basadas en las leyes generales de balance de los medios continuos. Estos principios para flujo transitorio, requieren que la cantidad de masa, momento, energía, que entra o sale de un volumen especificado de un acuífero durante un intervalo de tiempo sea igual al cambio en el almacenamiento de esa cantidad. Para flujo uniforme requiere que la cantidad que entra a un volumen de acuífero menos la cantidad que sale sea igual a cero. La deducción de las ecuaciones es abundante en la literatura, por ejemplo (Istok, 1989).

La ecuación para flujo uniforme, considerando el medio poroso saturado y la densidad del agua $\rho = f(x_i, t)$ constante es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad 5.20$$

Si se considera un medio poroso homogéneo e isotrópico con respecto a la conductividad hidráulica la ecuación es:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad 5.21$$

denominada ecuación de Laplace, ecuación de tipo elíptico de segundo orden homogénea que representa procesos estacionarios.

Ecuación de flujo transitorio de agua subterránea en una unidad hidrogeológica confinada considerando el medio poroso saturado y la densidad del agua constante,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad 5.22$$

Si el medio poroso es homogéneo e isotrópico con respecto a la conductividad hidráulica

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{S_s}{k} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad 5.23$$

La ecuación anterior es conocida en hidrogeología como ecuación de difusión, cuando la ecuación de flujo subterráneo considera fuentes y sumideros tiene la forma

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - q_s = S_s \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad 5.24$$

donde

ϕ = Es la carga hidráulica (L);

K_x, K_y, K_z = Conductividad hidráulica en las direcciones x, y, z del sistema cartesiano, las cuales se supone son paralelas a las direcciones principales de conductividad hidráulica del medio poroso (LT^{-1}). En consecuencia la conductividad hidráulica se representa por

$$K_{ij} = K_{ij} \delta_{ij}, \text{ donde } \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } i = j \\ 0, & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

δ_{ij} es la delta de Kronecker

q_s = Es el volumen por unidad de tiempo (L^3T^{-1}) en que el agua es añadida por fuentes o extraída por sumideros por unidad de volumen de acuífero.

S_s = Coeficiente de almacenamiento específico (L^{-1}).

5.5.2 Ecuación de transporte de masa por advección-dispersión

La ecuación diferencial parcial tridimensional del transporte de masa sin considerar reacciones químicas a través de un medio poroso multifásico en forma vectorial es

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (vC) + \frac{q_s C_s}{n_e} \quad 5.25$$

para su deducción puede consultarse por ejemplo (Zheng, 1995).

en forma indicial es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial (v_i C)}{\partial x_i} + \frac{q_s C_s}{n_e} \quad 5.25a$$

donde

C = Concentración de contaminantes disueltos en el agua, (ML^{-3}).

t = Tiempo.

x_i = Ejes coordenados en las tres direcciones (L).

D_{ij} = Tensor de dispersión hidrodinámica (L^2T^{-1}).

v_j = Velocidad lineal promedio a través de los poros (LT^{-1}).

q_s = Flujo volumétrico por unidad de tiempo (T^{-1}) de agua inyectada (+) o extraída (-).

C_s = Concentración de solución inyectada o extraída al acuífero por medio de fuentes o saliendo por sumideros (ML^{-3})

n_e = Porosidad efectiva.

La solución numérica de las ecuaciones de flujo (5.20-5.24) y transporte (5.25) debe satisfacer los siguientes requisitos:

- a) La solución debe existir (**existencia**).
- b) La solución debe ser única (**unicidad**).
- c) La solución depende en forma continua de los datos (**estabilidad**)

Cualquier problema que satisface los tres requisitos anteriores se considera un problema bien planteado.

En los apartados siguientes se analiza e interpreta la función de cada uno de los términos que forman la ecuación de transporte de masa en medios porosos.

Fuentes y sumideros de agua

El término $\frac{q_s C_s}{n_e}$ de la ecuación de transporte representa la masa de soluto que entra o sale al acuífero a través de fuentes o sumideros. Las fuentes y sumideros se clasifican como puntuales, (pozos, manantiales) o distribuidos por unidad de área, como la evaporación, infiltración.

El tamaño forma y ubicación exacta de la fuente de soluto en un sistema hidrotermal es muy difícil de determinar debido a que son profundidades del orden de 1000-1500 m o más, (White, 1970).

La concentración de soluto que entra al sistema acuífero generalmente es desconocida y difícil de estimar, debido a la ubicación de la fuente; cuando la fuente se localiza arriba del nivel freático son difíciles de estudiar los procesos biológicos, físicos y químicos, que ocurren en la zona no saturada del subsuelo y que disminuyen la concentración de soluto antes de alcanzar el agua subterránea.

La concentración de soluto que entra al sistema acuífero varía en función del tiempo, en un sistema acuífero existen fuentes con distinta concentración en función del tiempo.

Es de importancia comentar que la concentración del soluto en la fuente en algunos casos es uno de los objetivos del proceso de calibración del modelo.

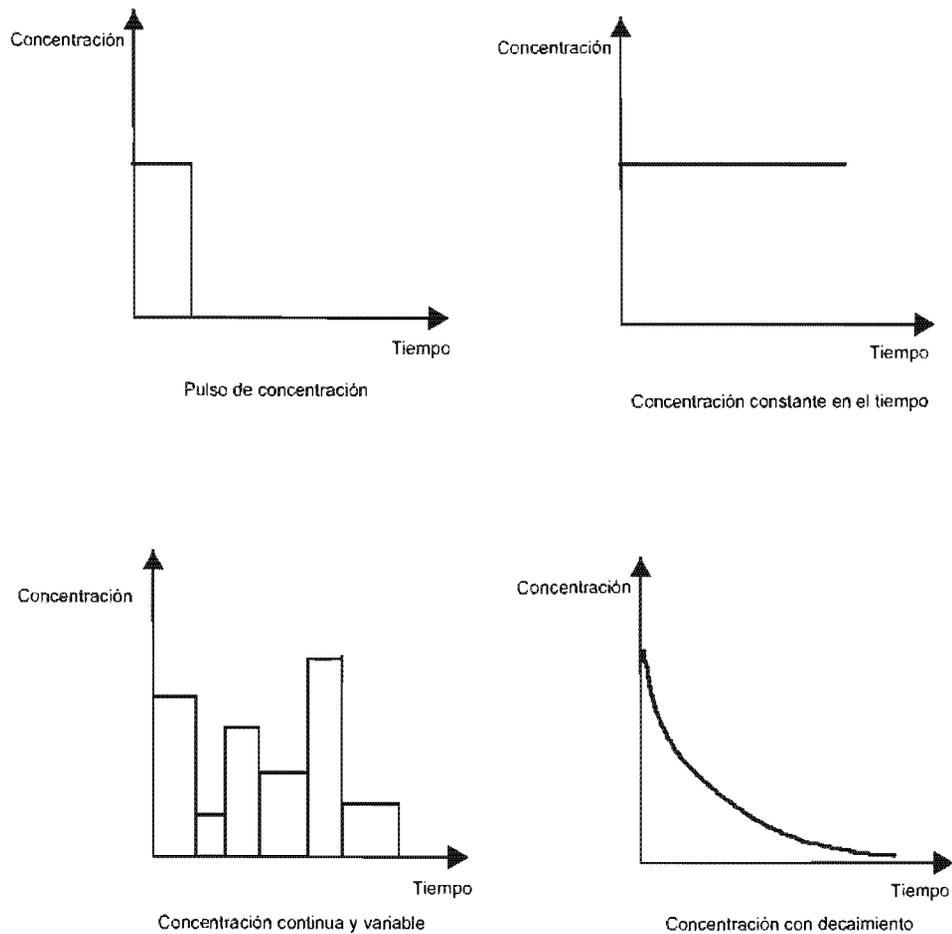


Figura 5.2 Magnitud de la concentración en función del tiempo (Zheng, 1995; Domenico, 1995).

Advección

Advección es el transporte de solutos debido a la velocidad del agua subterránea.

El término $\frac{\partial(v_i C)}{\partial x_i}$, de la ecuación (5.25), representa la advección. Físicamente representa la variación del flujo de masa con respecto a las tres direcciones espaciales. El término advección describe el movimiento de sustancias miscibles a la misma velocidad que el agua subterránea. Este término en materiales de conductividad hidráulica alta como gravas y arenas es el más importante proceso de transporte de sustancias miscibles, (miscibilidad es la capacidad de un líquido de disolverse en otro). La velocidad lineal de transporte v se calcula por medio de

$$\vec{v} = \frac{\vec{q}}{n_e} \quad 5.26$$

donde $\vec{q} = K_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i}$,

Dispersión hidrodinámica del soluto

Bear (1972), establece que la dispersión hidrodinámica es un proceso de propagación de partículas que actúan como trazadores individuales de manera que conservan las propiedades intensivas del soluto ante su separación. La dispersión hidrodinámica es la manifestación macroscópica de dos procesos básicos la dispersión mecánica, y la difusión (iónica y molecular). La dispersión hidrodinámica en el medio poroso es un proceso no reversible.

Dispersión mecánica

Es la propagación del soluto debido a los cambios aleatorios de dirección y la partición de los canales de flujo de un medio poroso, también contribuyen los cambios de velocidad en magnitud y dirección a través de los canales microscópicos de flujo.

El efecto de difusión molecular es despreciable comparado con la dispersión mecánica y solo adquiere importancia si la velocidad lineal promedio cumple la condición siguiente (Werner, 1996):

$$v < 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} (0.4 \text{ m/d})$$

Así, también, cuando son grandes los gradientes de concentración.

El transporte por dispersión mecánica de la ecuación de transporte se representa por el término:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)$$

Coefficiente de dispersión hidrodinámica

El coeficiente de dispersión hidrodinámica D_{ij} de un medio poroso isotrópico representa físicamente el flujo de masa por unidad área en la unidad de tiempo. Para flujo tridimensional, se define mediante las expresiones siguientes (Bear, 1972), que son utilizadas en esta forma por el programa MT3D acoplado en el visual MODFLOW:

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{v} + \alpha_T \frac{v_y^2}{v} + \alpha_T \frac{v_z^2}{v} \quad 5.27$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_z^2}{|v|} \quad 5.28$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_y^2}{|v|} \quad 5.29$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x v_y}{|v|} \quad 5.30$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x v_z}{|v|} \quad 5.31$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_y v_z}{|v|} \quad 5.32$$

Si la difusión molecular no es despreciable, al tensor del coeficiente de dispersión hidrodinámica se le debe de sumar el coeficiente de difusión molecular.

Si los ejes coinciden con la dirección de la velocidad promedio de flujo $v_x = |v|$ y $v_y = v_z = 0$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_L v & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T v & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_T v \end{bmatrix} \quad 5.33$$

Para un medio poroso anisotrópico (Bear y Verruijt, 1987), se requiere de cinco coeficientes de dispersión independientes. Debido a que no es fácil obtener las cinco dispersiones en un problema real, se supone que el coeficiente de dispersión hidrodinámico para medios porosos isotrópicos también es aplicable a medios porosos anisotrópicos. Burnet y Frind (1987) sugieren que la ecuación de transporte se resuelva con tres dispersividades:

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{v} + \alpha_{TH} \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{v} + D^* \quad 5.34$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \quad 5.35$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_y^2}{v} + D^* \quad 5.36$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_x v_y}{|v|} \quad 5.37$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_x v_z}{|v|} \quad 5.38$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_y v_z}{|v|} \quad 5.39$$

$$D_{ij} = (L^2/T)$$

α_L = Dispersividad longitudinal del medio poroso (L).

α_{TH} = Dispersividad transversal horizontal (L).

α_{TV} = Dispersividad transversal vertical I (L).

v_x, v_y, v_z = Componentes cartesianas del vector velocidad.

$|v| = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2}$ magnitud del vector velocidad, (LT^{-1}) .

La dispersividad medida en laboratorio es del orden de cm, en cambio la macrodispersión medida en campo es de centenares de metros.

El coeficiente de dispersión hidrodinámica depende de:

- 1) La dispersividad.
- 2) Gradientes de concentración.
- 3) Fuerzas externas actuando sobre el medio poroso que contiene al líquido, como ruido sísmico ambiental, bombeo, sismos, esfuerzos de superficie permanentes etc.
- 4) Dirección del flujo, presión, y temperatura de la fuente que introduce el soluto al sistema.
- 5) Granulometría, orientación tamaño y forma de las partículas minerales del medio poroso.
- 6) Conductividad hidráulica del estrato en que se encuentra la fuente de masa, y de los estratos que sobreyacen y subyacen.
- 7) Cementante natural entre los granos del medio poroso.
- 8) Porosidad efectiva.

Resultados experimentales muestran que en suelos la dispersión longitudinal α_L depende del tamaño medio del grano mineral y el coeficiente de uniformidad

$C_v = \frac{D_{60}}{D_{10}}$. Gelhar et al, (1992) encontraron que los más grandes valores de α_L son de 250 m, también establecen que en sus experimentos la dispersividad transversal vertical es menor que dispersividad transversal horizontal, Klotz et al (1980) determinaron que la dispersividad transversal es de 6 a 20 veces menor que la dispersividad longitudinal. Lallemand-Barrès, *et al*, (1978) determinaron que la dispersividad transversal es menor de 1/5 a 1/100 de la dispersividad longitudinal.

Dispersión por capilaridad

En suelos de grano fino como arcillas y limos en que se forman conductos de radio muy pequeño $r \rightarrow 0$, denominados vasos o conductos capilares se presenta la ascensión capilar del agua. La altura de ascensión capilar del agua depende del radio del conducto de acuerdo a la formula

$$h_c = \frac{4T_s \cos \alpha}{\rho g d} \quad 5.40$$

T_s = Coeficiente de tensión superficial 0.000074 Kn/m

α = Ángulo de contacto entre el agua y el suelo, aproximadamente $\alpha = 0$

d = Diámetro del conducto capilar, en arcillas los diámetros de los poros están comprendidos entre 0.1 a .001 de micra.

La franja de saturación capilar se inicia a partir del nivel freático, su altura es irregular y depende de la distribución granulométrica del suelo.

Para determinar la altura de ascensión capilar por medio de las propiedades del medio poroso existen varias expresiones, la más conocida es la de K. Terzaghi (1956):

$$h_c = \frac{C}{eD_{10}} \quad 5.41$$

$$10 \leq C \leq 40 \text{mm}^2$$

e = Relación de vacíos.

D_{10} = Diámetro efectivo del suelo, se obtiene de la curva granulométrica.

La propagación vertical del soluto depende solamente del radio del conducto, la velocidad de ascensión del agua es independiente del gradiente hidráulico del medio poroso.

El movimiento del agua por capilaridad también se presenta en sentido horizontal por lo tanto la dispersión por capilaridad horizontal es un hecho presente en todos los procesos de propagación de solutos en suelos finos como arcillas o arcillas-limosas.

El volumen de agua que pasa por un conducto capilar es muy pequeño, pero téngase presente que en arcillas la porosidad efectiva del orden del 12 %.

Difusión molecular

El origen de este proceso se debe a la colisión entre átomos y moléculas del disolvente y el soluto. Si el tamaño de las moléculas del soluto es comparable con las moléculas del disolvente se denomina difusión molecular; si el tamaño de las moléculas del soluto es más grande que las moléculas del disolvente este fenómeno se denomina movimiento Browniano.

El movimiento de moléculas se efectúa de zonas de alta concentración de soluto a zonas de baja concentración de soluto. La difusión molecular de un soluto se debe a la diferencia de densidades, entre el soluto y el agua. También a la atracción molecular que ejerce el agua sobre las moléculas del soluto. Entre menor concentración de soluto la atracción entre sus moléculas es más débil, dominando la atracción molecular que ejerce el agua, generando de esta manera movimiento molecular. La velocidad de difusión molecular también depende de la fuerza de gravedad, ya que si una cantidad de soluto con mayor densidad que el agua se introduce en la parte superior de un estrato, su difusión molecular es más rápida que cuando un soluto se deposita en la parte inferior del estrato.

Coefficiente de difusión molecular

$$D_s = T^* D_m$$

D_s = Coeficiente de difusión molecular en el medio poroso.

D_m = Coeficiente de difusión molecular del fluido

T^* = Coeficiente de sinuosidad o tortuosidad es un tensor de segundo orden simétrico T^*_{ij} .

$$T^* = \frac{x_s - x_0}{x_r - x_0}$$

donde $x_s - x_0$ es la longitud de un conducto en un medio poroso y $x_r - x_0$ la distancia en línea recta entre esos dos puntos.

Millington y Quirk (1961) presentan una teoría sugiriendo que para medios porosos saturados el coeficiente de tortuosidad se obtiene por medio de

$$nD_s = n^{\frac{4}{3}} D_m \quad 5.42$$

lo cual implica que $\tau = n^{\frac{1}{3}}$, $n =$ porosidad.

El coeficiente de difusión molecular D_m puede ser expresado por:

$$D_m = \frac{RT}{N} \frac{1}{6\pi\mu r}, \quad (L^2t^{-1}) \quad 5.43$$

$R =$ Es la constante de los gases perfectos $8.32 (masaL^2t^{-1} Kelvin^{-1})$ en el Sistema Internacional de unidades.

$N =$ El número de Avogadro 6.023×10^{23} .

$T =$ Temperatura absoluta Kelvin.

$\mu =$ Viscosidad del fluido.

$r =$ Es el radio medio de los agregados de difusión molecular.

5.5.3 Condiciones iniciales y de frontera para la solución de las ecuaciones diferenciales parciales de flujo y transporte.

Las ecuaciones diferenciales parciales definidas en un dominio espacio-tiempo Ω tienen un número infinito de soluciones. Para obtener una solución particular es necesario agregar condiciones iniciales y de valores a la frontera. Si las soluciones existen serán únicas para una ecuación dada.

Condiciones iniciales

Para determinar la solución particular de una ecuación diferencial se deben de especificar los valores de la función incógnita para algún tiempo inicial t_0 en el dominio Ω o en su frontera $\partial\Omega$. En la ecuación de flujo la función incógnita representa la carga hidráulica, y en la ecuación de transporte la concentración de masa. El valor de la carga hidráulica y la concentración de masa inicial t_0 en el interior del dominio o en su frontera son valores medidos en campo.

$$\phi = \phi(x, y, z, t_0) = f(x, y, z) \text{ en } \Omega \quad 5.44$$

Condiciones de frontera

Un dominio Ω puede intercambiar con su entorno, a través de su frontera $\partial\Omega$ (o de un segmento de esta), masa, energía, momento. La frontera puede ser parcial o totalmente cerrada a cualquier intercambio.

Las condiciones de frontera expresan matemáticamente la relación del dominio Ω con su entorno, y deben obtenerse interpretando las condiciones físicas del área estudiada.

Matemáticamente se clasifican en tres tipos:

Frontera tipo Dirichlet. Un problema Dirichlet es encontrar en un dominio espacio-tiempo una función que tiene valores predeterminados en la frontera $\partial\Omega$.

$$\phi|_{\partial\Omega} = f \quad 5.45$$

Frontera tipo Neumann. Un problema de Neumann consiste en hallar dentro de un dominio espacio-tiempo Ω o en su frontera $\partial\Omega$, una función continua que cumpla la condición de que su derivada en la dirección de la normal exterior tome en cada punto de la frontera $\partial\Omega$ el valor que tiene en ese punto una función dada f

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = f|_{\partial\Omega} \quad 5.46$$

Frontera tipo Cauchy. El problema de frontera de Cauchy consiste en hallar una función en el dominio espacio-tiempo Ω tal que en cada punto de la frontera se cumpla

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} + c(\phi - f) = 0 \quad \partial\Omega \quad 5.47$$

f y c son funciones conocidas que no dependen del tiempo.

5.6 SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL SISTEMA ACUÍFERO

Para simular el modelo de flujo y transporte del acuífero de la cuenca de Puebla se utiliza el software comercial VISUAL MODFLOW que utiliza el código computacional The Modular Three dimensional Finite-Diferencia Ground Water Flow Model (MacDonald and Harbaugh, 1988). Este código computacional se denomina MODFLOW.

VISUAL MODFLOW es un modelo tridimensional de flujo de agua subterránea y transporte de masa, que integra y combina los paquetes computacionales, MODFLOW, MODPATH, y MT3D (los dos últimos son paquetes computacionales de transporte de masa). Los resultados del modelo como: carga hidráulica, nivel estático, abatimiento del nivel estático y la calibración pueden ser visualizados en diferentes períodos de tiempo en cortes transversales, o en planta.

El método numérico que utiliza MODFLOW para resolver la ecuación de flujo uniforme o transitorio es un bloque centrado de diferencias finitas, el modelo utiliza

métodos iterativos para obtener la solución del sistema de ecuaciones de diferencias finitas para cada intervalo o paso de tiempo.

La capacidad máxima del VISUALMODFLOW 2.8 son 499 columnas en la dirección x y 500 renglones en la dirección y , y 60 capas en la dirección z (Nilson, and Franz, 1999).

El modelo de transporte denominado MT3D (Simulation of Advection, Dispersión and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems, Zheng, 1990) es un modelo para simular la advección, dispersión y reacciones químicas de contaminantes en el agua subterránea en un sistema acuífero en dos o tres dimensiones.

Para la solución numérica en tres dimensiones de la ecuación diferencial de transporte de masa el modelo emplea el método mixto Euleriano–Lagrangiano (Neuman 1984), cuya solución es por diferencias finitas.

El acoplamiento de la solución de la ecuación de flujo y la ecuación de transporte, la graficación, y calibración del modelo de flujo y transporte se realiza bajo el software comercial VISUALMODFLOW.

Objetivo del Modelo

Determinar las causas que originan el aumento del flujo vertical de agua termal sulfhídrica, así como su propagación hacia el acuífero freático en el área de la ciudad de Puebla. El parámetro que representará en el modelo la propagación del agua termal es la concentración de sólidos totales disueltos.

Suposiciones del modelo.

1. Se cumple la ley de Darcy.
2. La densidad y viscosidad del agua subterránea es constante.
3. El medio poroso es heterogéneo y anisotrópico.
4. Las reacciones químicas entre los iones disueltos en el agua subterránea, no afectan la concentración de sólidos totales disueltos.
5. El flujo de agua sulfurosa es vertical, en las unidades hidrogeológicas que subyacen al acuífero freático.

Justificación de las suposiciones del modelo

1. Se cumple la ley de Darcy. Con base en la columna litológica de los pozos y de los valores de la conductividad hidráulica estimados, por medio de pruebas de bombeo, en el acuífero freático, acuitardo y del acuífero profundo. No se observan valores de la conductividad hidráulica ni del gradiente hidráulico tan bajos que la

velocidad del flujo sea tan lenta que no se cumpla la ley de Darcy y tenga mayor importancia la difusión molecular, por otra parte en la cuenca de Puebla no se han registrado medios fracturados en que se presente flujo no Darciano. El flujo en las fracturas de anchura máxima de un mm suele ser laminar. El cumplimiento de la ley de Darcy es en parte obligada debido a la solución numérica del modelo, ya que no admite diferencias muy grandes en el valor de las conductividades hidráulicas, en una misma capa, el modelo no converge, por lo cual no se puede representar flujo no Darciano. Una verificación rigurosa de que se cumple la ley de Darcy es por medio del número de Reynolds:

$$Re = \frac{qd}{\nu} \quad 5.48$$

donde

q = Descarga específica.

d_{10} =, Diámetro efectivo del suelo (curva granulométrica).

ν , = Viscosidad cinemática del fluido.

Existe una limitación de orden práctico para determinar el número de Reynolds, solo se tiene la curva granulométrica de algunos materiales, los más superficiales.

2. La densidad y viscosidad del agua subterránea es constante. El intervalo de variación de temperaturas del agua subterránea es de 19 a 22 °C en el acuífero freático en la ciudad de Puebla. Si se considera que la densidad del agua dulce varía muy poco (contenido de STD menor a 1000 mg/l) en relación con la densidad del agua destilada, se puede efectuar la siguiente aproximación. Densidad del agua dulce a 19° 0.9982 Mg/m³, viscosidad 0.00130 kg(m·s), densidad a 22° 0.9978 Mg/m³, viscosidad 0.000958 kg(m·s). Con base en estos valores se puede considerar sin incurrir en un error muy grande que la densidad y viscosidad del agua dulce es constante. Con respecto al agua termal sulfhídrica el intervalo de temperaturas es de 23 A 29 °C, no se tienen medidas de su densidad, ni de su viscosidad. El agua de mar tiene una densidad de 1.025 Mg/m³ con aproximadamente 35,000 mg/l de STD, el agua termal sulfhídrica tiene una concentración máxima de 3900 mg/l de STD, lo cual indica que tiene una densidad un poco mayor al agua dulce; debido al intervalo de variación de 10 °C en la temperatura del agua la viscosidad del agua varía muy poco.

Debido a que el paquete VISUALMODFLOW tiene la restricción de considerar el agua de densidad y viscosidad constante, no es posible tomar en cuenta las variaciones de densidad y viscosidad del agua.

3. El medio es heterogéneo y anisotrópico. Las unidades hidrogeológicas en algunas áreas están formadas por materiales de distinto origen geológico y en consecuencia con conductividad hidráulica diferente. Además los procesos de

sedimentación generan en el medio poroso conductividades hidráulicas de distinto valor en la dirección vertical y horizontal.

4. Las reacciones químicas, o biológicas no afectan la concentración de sólidos totales disueltos. Debido a los iones disueltos presentes en el agua subterránea se presentan diversas reacciones químicas, formándose nuevos compuestos, que con base en la ley de la conservación de la masa la cantidad de soluto es el mismo.

5. El flujo de agua sulfhídrica es vertical. En la zona de aguas sulfhídricas se presenta una fuerte presión ascendente (artesianismo) y las unidades hidrogeológicas presentan permeabilidad secundaria.

Flujo transitorio

Se efectuaron dos ejecuciones del modelo la primera en flujo uniforme, simulando el sistema acuífero en condición inicial, sin extracción de agua. Las cargas hidráulicas determinadas en flujo uniforme se introdujeron como la carga inicial en régimen transitorio, aunque se tienen calibraciones de toda la cuenca hasta el año 2002, se simula un escenario a futuro para el año 2011 para predecir el comportamiento del área modelada.

Dominio.

El dominio del modelo comprende un área de 1300 km², su relieve es fundamentalmente planicie y una meseta al norte de la cuenca (Fig. 5.3), la elección de la forma y extensión del dominio se debe a:

- 1) La delimitación natural de la cuenca sedimentaria por los volcanes y alturas del área que funcionan como zonas de recarga.
- 2) La zona de descarga de natural de la cuenca, identificada por el relieve y las líneas de flujo.
- 3) La magnitud del dominio abarca las principales condiciones hidrogeológicas del sistema acuífero como ríos, zonas de recarga, descarga, sistemas de flujo locales, intermedios, y regionales que influyen en la zona de interés.

Mallado

El área (dominio) modelada para la solución de las ecuaciones de flujo y transporte por el método de las diferencias finitas, se ha dividido en una cuadrícula con un espaciado no uniforme de 112 columnas y 101 renglones, en la ciudad de Puebla $\Delta x = 230$ m, $\Delta y = 278$ m. En el resto de la cuenca: $\Delta x = 450$ m, $\Delta y = 550$ m y cinco capas, que representan a cuatro unidades hidrogeológicas y el basamento geohidrológico (Fig. 5.3, 5.4). La razón de disminuir la distancia entre columnas y renglones en la ciudad de Puebla es para tener mayor precisión en los resultados en el modelo de flujo y transporte, en la zona de agua sulfhídrica.

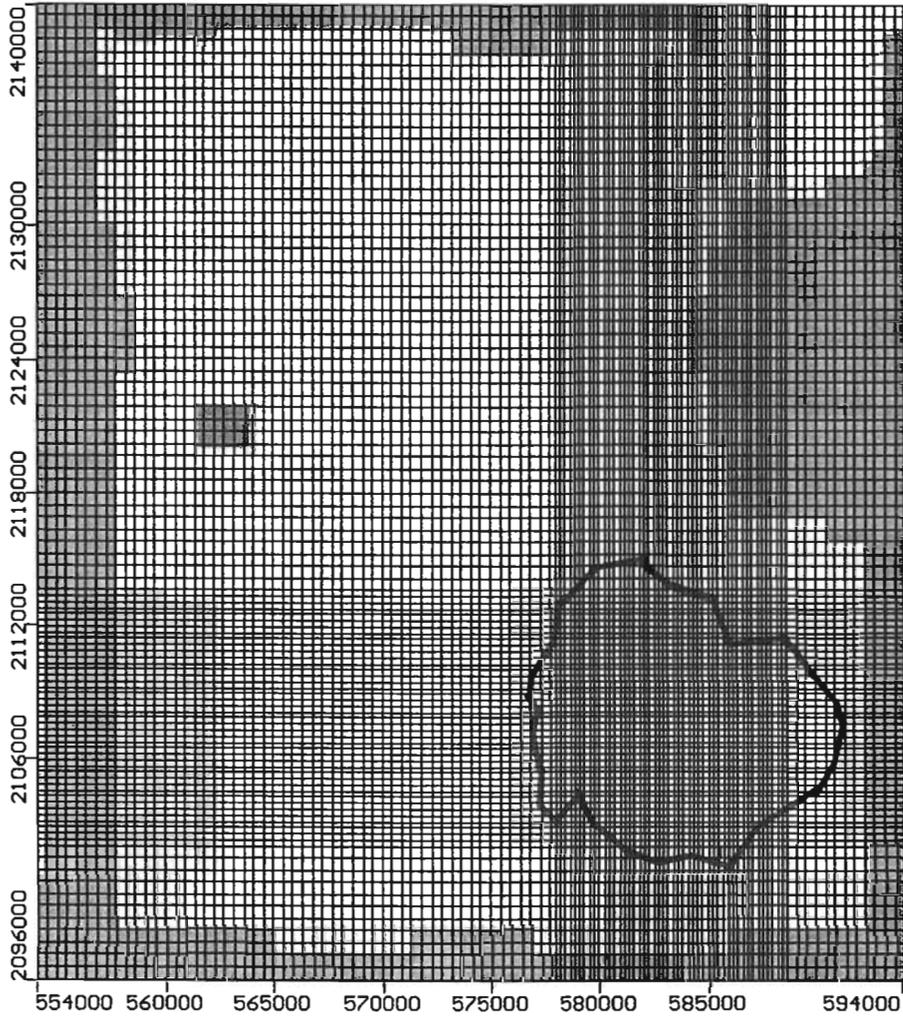


Figura 5.3. Discretización del dominio del modelo numérico, la ciudad de Puebla se señala con el área encerrada.

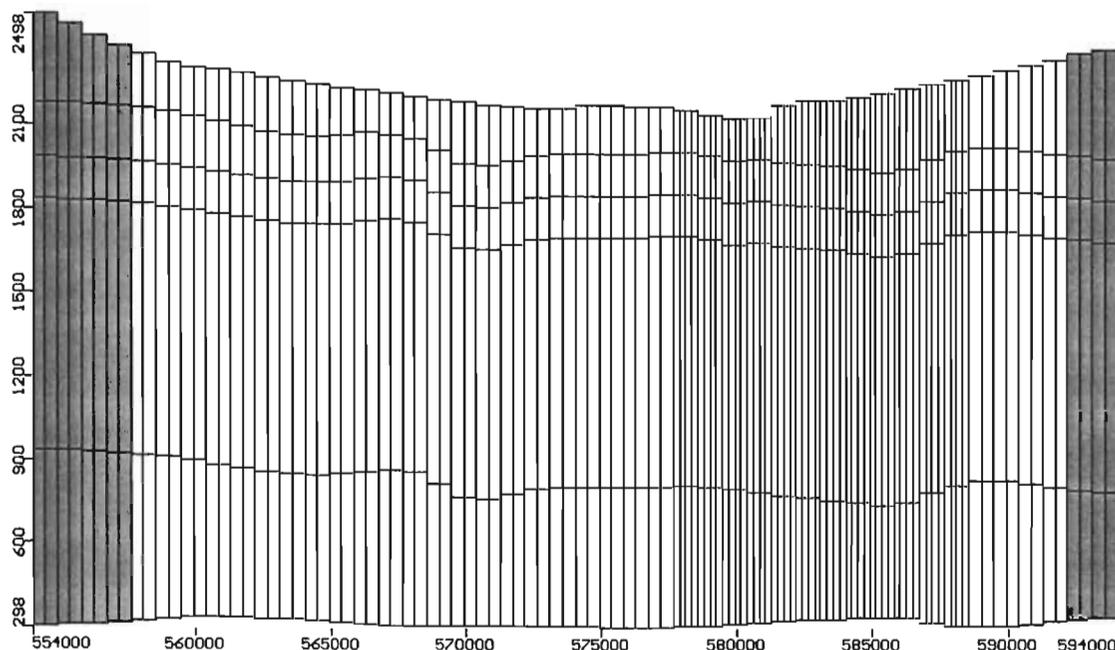


Figura 5.4. Corte transversal ese-oeste en la ordenada Y: 2112000 en la ciudad de Puebla, representación de las unidades hidrogeológicas, su profundidad y espesor medio en metros, en orden descendente: 1) acuífero freático, 2) Acuitardo, 3) Acuífero medio, 4) Acuífero profundo, 5) Basamento Hidrogeológico. Obsérvese el relieve topográfico de la superficie, la parte más baja es la ciudad de Puebla.

Pozos de bombeo

Una de las mayores dificultades en la modelación es la magnitud y ubicación de las extracciones, este parámetro afecta los resultados del modelo y es muy importante para pronosticar los niveles de agua. En el valle de Puebla se tienen registrados 1321 pozos (Comunicación personal depto. de agua subterránea C.N.A., sin que se sepa con precisión su ubicación, profundidad y altura de brocal. Solo se tienen las coordenadas de ubicación y altura de brocal en la cuenca de 118 pozos. De lo anterior nace la propuesta de introducir en el modelo 118 pozos, asignándoles un volumen de extracción equivalente a todos los pozos en operación para los años 1973, 1980, 1990, 2002. Las extracciones fueron estimadas con base en la cantidad de población y el consumo de agua por habitante/día. Extracción equivalente significa que un pozo extrae el gasto de 10 o 12 pozos, dicho pozo se sitúa aproximadamente en el centro del área en que se localizan los pozos reales, para fines de calibración se tuvieron que introducir en el modelo pozos que representan a los que no están registrados o que están registrados con un menor gasto de extracción (Fig. 5.5).

Condiciones de frontera

Las cuatro fronteras del área modelada N,S,E,W, son artificiales y corresponden a las zonas de recarga y descarga naturales del sistema acuífero de acuerdo a su funcionamiento hidrogeológico se representan matemáticamente por la condición de frontera tipo Neumann la cual asume un flujo constante perpendicular a las paredes del área modelada.

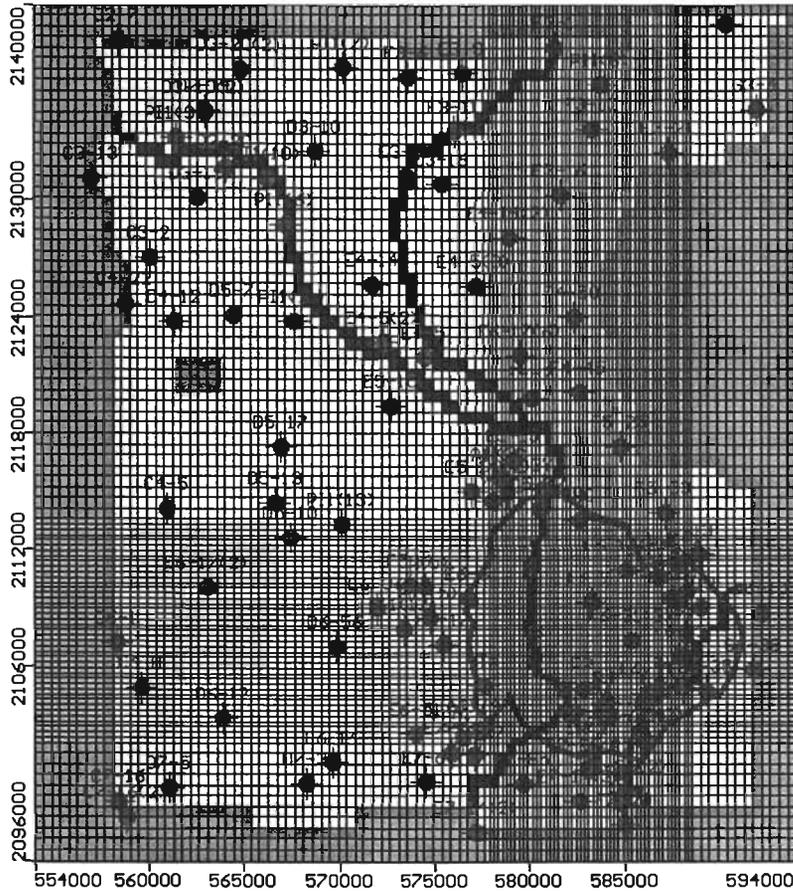


Figura 5.5. Se presentan los pozos de bombeo, las fronteras del área modelada el río Atoyac, Zahuapan y Alseseca.

Recarga

En el modelo de flujo se asigna una recarga media de 200 mm/año a un área de 1140 km² y 175 mm a un área 160 km² que representa a las ciudades más grandes localizadas en la cuenca de Puebla. El valor de la recarga fue determinada con base en valores recomendadas por la literatura y ajustada en el proceso de calibración.

Evapotranspiración

Cuando el nivel freático está más abajo de una profundidad de extinción d , la evapotranspiración no se toma en cuenta en el modelo. La profundidad de extinción d se encuentra normalmente de 1.82 a 2.5 m, en caso que se encuentren plantas freatofitas llega hasta 3.65 m.

Evaporación

Cuando en un terreno no haya vegetación solo se presenta el fenómeno de evaporación del agua hasta una profundidad de 3 ó 4 metros (Custodio et al, 1996).

Flujo transitorio

El objetivo de la simulación del sistema acuífero en régimen transitorio es predecir la distribución de los valores de la carga hidráulica en tiempos sucesivos bajo condiciones reales de trabajo, a partir de la distribución de los valores iniciales de la carga hidráulica. Las condiciones iniciales de la carga hidráulica se obtuvieron mediante la simulación del sistema acuífero sin extracción de agua, en flujo uniforme.

Parámetros hidrogeológicos del medio poroso utilizados en el modelo

El valor de la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, y la porosidad total, son valores medios de acuerdo al tipo de material, reportados en la literatura y aproximados por medio de la calibración del modelo. (Custodio et al, 1996; Istok, 1989; Domenico, 1997).

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica en el acuífero superior se representa por medio de 15 valores diferentes, de acuerdo a la geología superficial de la cuenca. Para identificar las conductividades del modelo se numeran las zonas con distinta conductividad hidráulica, (Tabla 5.1), (Figura 5.6). Las unidades hidrogeológicas subyacentes al acuífero superior presentan dos valores de conductividad hidráulica el de la zona de agua sulfhídrica y la del resto del estrato, (Tabla 5.2).

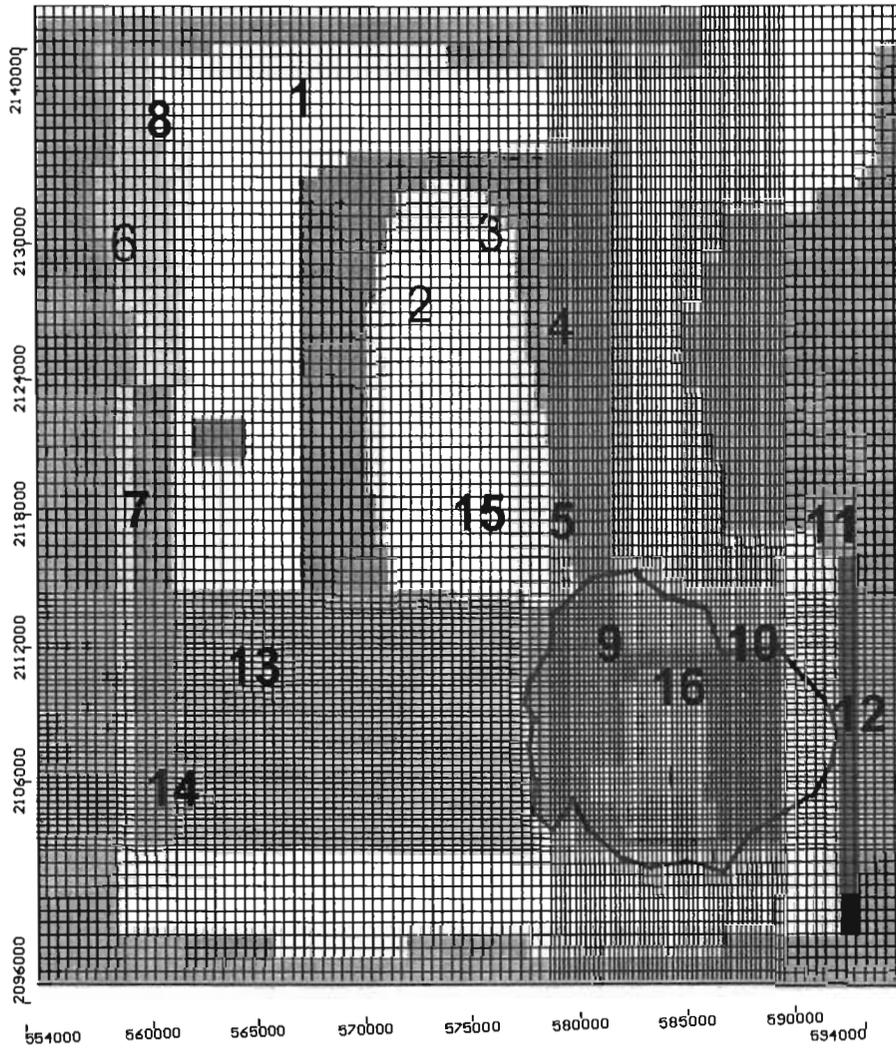


Figura 5.6. Conductividades hidráulicas en el acuífero freático.

Tabla 5.1. Valores de la conductividad hidráulica en el acuífero superior

| Regiones | Conductividad hidráulica $K_x=K_y$ m/s | Conductividad hidráulica K_z m/s |
|----------|---|---------------------------------------|
| 1 | 9e-6 | 5e-6 |
| 2 | 4e-5 | 1e-6 |
| 3 | 8e-5 | 7e-5 |
| 4 | 8e-5 | 7e-5 |
| 5 | 9e-5 | 9e-6 |
| 6 | 7e-5 | 5e-5 |
| 7 | 5e-7 | 8e-7 |
| 8 | 1e-5 | 1e-7 |
| 9 | 9e-6 | 8e-6 |
| 10 | 9e-6 | 8e-6 |
| 11 | 1e-7 | 7e-7 |
| 12 | 1e-7 | 2e-7 |
| 13 | 9e-6 | 8e-6 |
| 14 | 8e-5 | 7e-5 |
| 15 | 3e-5 | 1e-5 |
| 16 | 3e-5 | 1e-5 |

Tabla 5.2 Conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas 2-5

| Regiones | Conductividad hidráulica $K_x=K_y$ m/s | Conductividad hidráulica K_z m/s |
|---------------------|---|---------------------------------------|
| Acuitardo | 7e-6 | 4e-6 |
| Zona travertino | 7e-5 | 8e-5 |
| Acuífero intermedio | 8e-6 | 5e-6 |
| Zona travertinol | 5e-5 | 6e-5 |
| Acuífero profundo | 5e-6 | 3e-6 |
| Zona travertino | 3e-5 | 2e-5 |

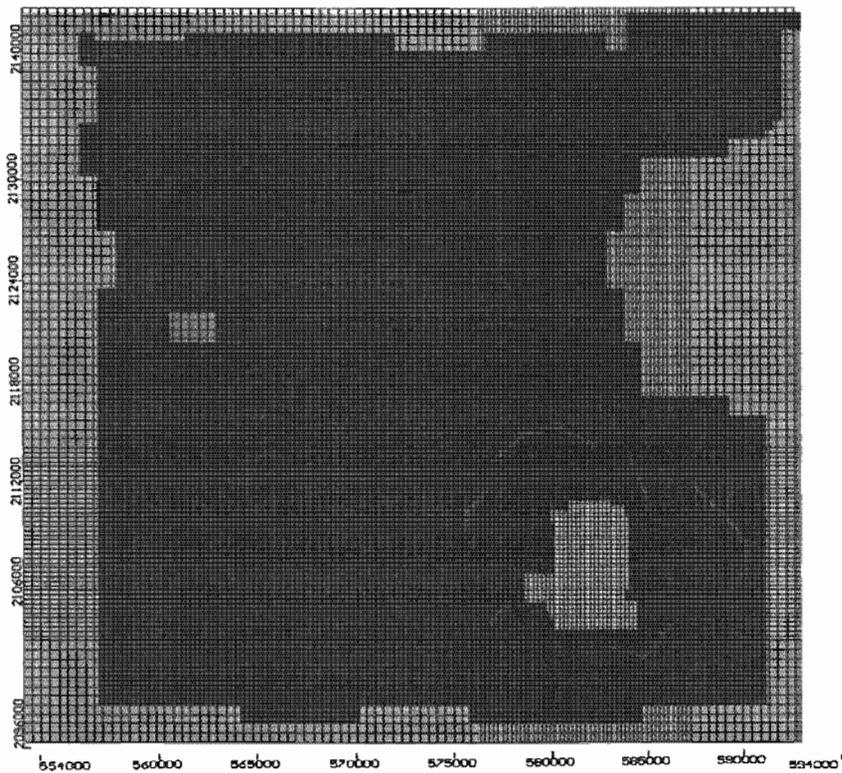


Figura 5.7 En las unidades hidrogeológicas 2-4, la conductividad hidráulica de la zona de agua sulfídica es mayor que la del resto de la unidad hidrogeológica, la zona sulfídica se ubica entre las coordenadas norte-sur: 2110402-2102841, este oeste: 579852-585181.

Coefficiente de almacenamiento

En la tabla 5.2 se presentan el coeficiente de almacenamiento, y la porosidad . Los valores de la porosidad se obtuvieron de (Istok, 1989)

| Unidad hidrogeológica | Coefficiente de almacenamiento específico (1/m) | Porosidad Efectiva (n%) | Porosidad total (n%) |
|-----------------------|---|-------------------------|----------------------|
| 11 | .0005 | 0.15 | 0.18 |
| 2 | .00005 | 0.1 | 0.2 |
| 3 | .00005 | 0.15 | 0.2 |
| 4 | .0000001 | 0.03 | .25 |

Modelo de transporte

Constituye una dificultad el ubicar las fuentes de entrada de soluto al sistema acuifero debido a la profundidad y a las condiciones geológicas. La ubicación de las fuentes de soluto se determino por prueba y error hasta que se calibró la concentración de sólidos totales disueltos en la superficie, las fuentes de soluto se localizan verticalmente abajo de los lugares de mayor concentración de sólidos totales disueltos en superficie y aproximadamente se alinean de noroeste a sureste y de noreste a suroeste. En la Figura 5.8, se muestra la ubicación de las fuentes de soluto en la cuarta unidad hidrogeológica a 1000 m de profundidad en el acuifero profundo en proyección vertical de la zona de agua sulfhídrica.

Figura 5.8. Ubicación de las fuentes de soluto en el fondo del acuifero profundo, todas ubicadas debajo de la zona sulfhídrica.

Tabla 5.3 Ubicación y concentración de las fuentes de soluto, y su variación en el tiempo

| Renglón | Columna | Período 1970-1990 Concentración (mg/l) | Período 1990-2002 Concentración (mg/l) |
|---------|---------|---|---|
| 64 | 62 | 5200 | 5100 |
| 63 | 79 | 7300 | 2423 |
| 69 | 84 | 2700 | 2200 |

| | | | |
|----|----|------|------|
| 73 | 67 | 7275 | 5000 |
| 76 | 64 | 7600 | 6700 |
| 78 | 76 | 4100 | 3950 |
| 82 | 63 | 5700 | 5700 |
| 83 | 84 | 6700 | 6325 |
| 93 | 64 | 5200 | 5100 |
| 74 | 70 | 4675 | 2000 |

Dispersión

El software MT3D que resuelve la ecuación de transporte de masa, necesita que la relación de dispersividades en el medio poroso α_{TH} / α_L , α_{TV} / α_L sea introducida.

El software MT3D calcula el coeficiente de dispersión hidrodinámica como el producto de las dispersividades y la velocidad (dispersión mecánica) más el coeficiente de difusión molecular. Los valores de la relación de dispersividades del acuífero freático son valores determinados de acuerdo a las características del medio poroso y teniendo en cuenta que la componente principal del flujo es horizontal. El valor tan grande de la relación de dispersividad transversal vertical, longitudinal de unidades hidrogeológicas más profundas se asignó para simular el flujo vertical ascendente. La dispersividad longitudinal se le asignó un valor de 120 m constante por capa con base en los estudios de Gelhar (1992). Los valores fueron asignados por prueba y error, hasta que se consiguió reproducir la concentración del soluto en el acuífero freático.

En la tabla 5.4 se presentan los valores de la relación de dispersividades y el coeficiente de difusión molecular.

| Unidad hidrogeológica | α_{TH} / α_L | α_{TV} / α_L | Coeficiente de difusión molecular (m ² /día) |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| Acuífero freático | 0.16 | 0.11 | 8e-5 |
| acuitardo | 0.16 | 3 | 8e-5 |
| Acuífero medio | 0.16 | 3 | 8e-5 |
| Acuífero profundo | 0.16 | 3 | 8e-5 |

5.7 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración es un proceso por el cual todos los parámetros del medio poroso y variables del ciclo hidrológico introducidos en el modelo de flujo y transporte se ajustan hasta que el valor de las variables de salida del modelo, sean lo más aproximadas a los valores de las variables medidas en campo como: son el nivel potenciométrico, la concentración de sólidos totales disueltos, y nivel estático.

Se aplican métodos estadísticos para evaluar la diferencia entre resultados teóricos y experimentales.

La expresión utilizada en el VISUALMODFLOW es una regresión lineal con:

$$RMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)^2 \right]^{1/2} \quad 5.50$$

donde

RMS = Raíz cuadrada media de los errores residuales.

N = Es el número total de observaciones.

cal_i = Son los valores calculados de las variables dependientes del modelo.

obs_i = Son los valores observados en campo de las variables dependientes.

Calibración del modelo de flujo y transporte

El proceso de calibración se efectúa con 33 pozos, repartidos en toda el área de modelación para los años 1973, 1980, 1990, 1996, 2002 (Figura 5.7). El grado de confiabilidad del modelo se realizó comparando el valor de los parámetros medidos en campo y los determinados por el modelo, para el modelo de flujo se compara la carga hidráulica o nivel potenciométrico medida en campo versus la calculada por el modelo.

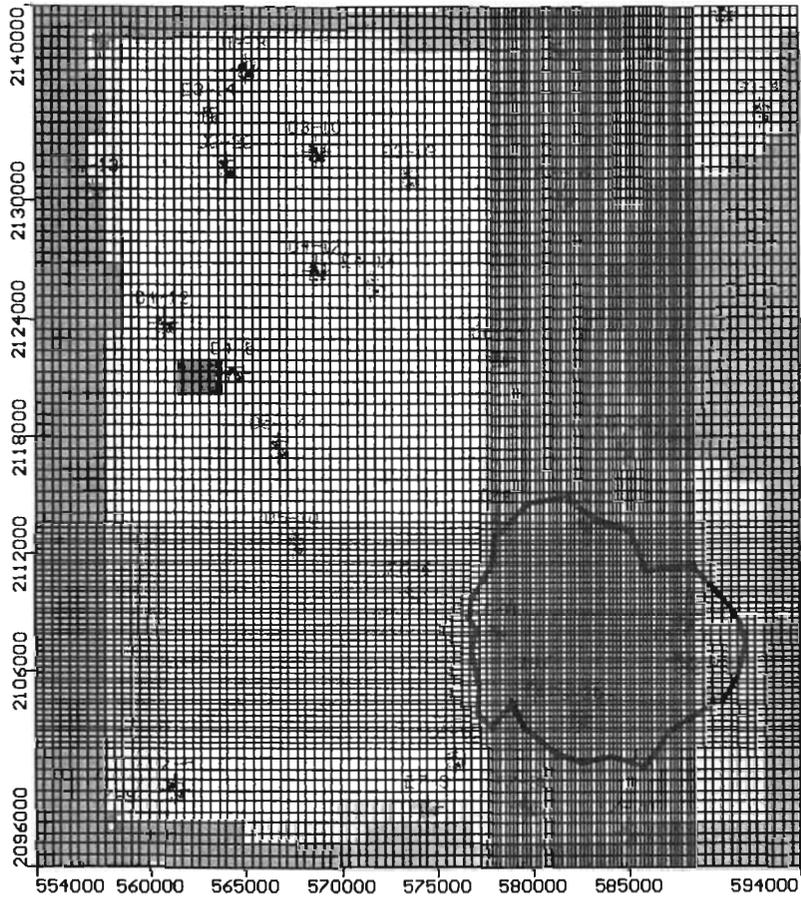


Figura 5.8. Ubicación de los pozos de calibración para el modelo de flujo.

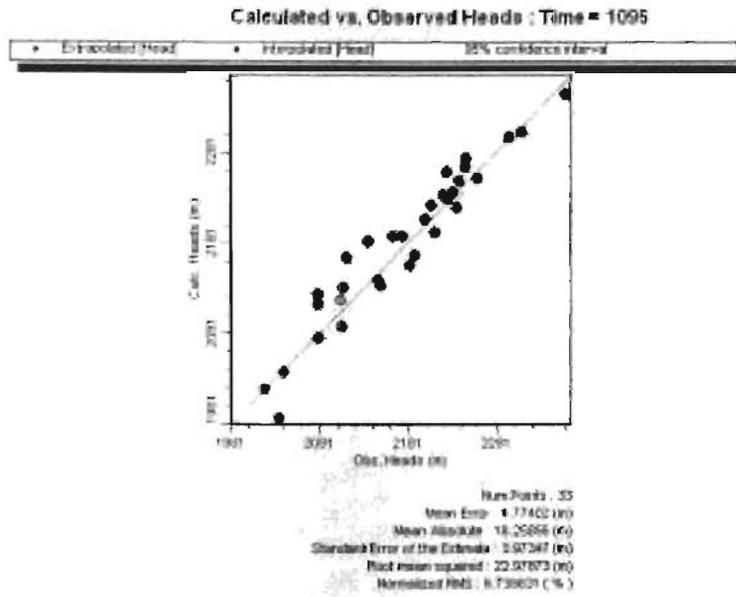


Figura 5.9. Calibración modelo de flujo año 1973

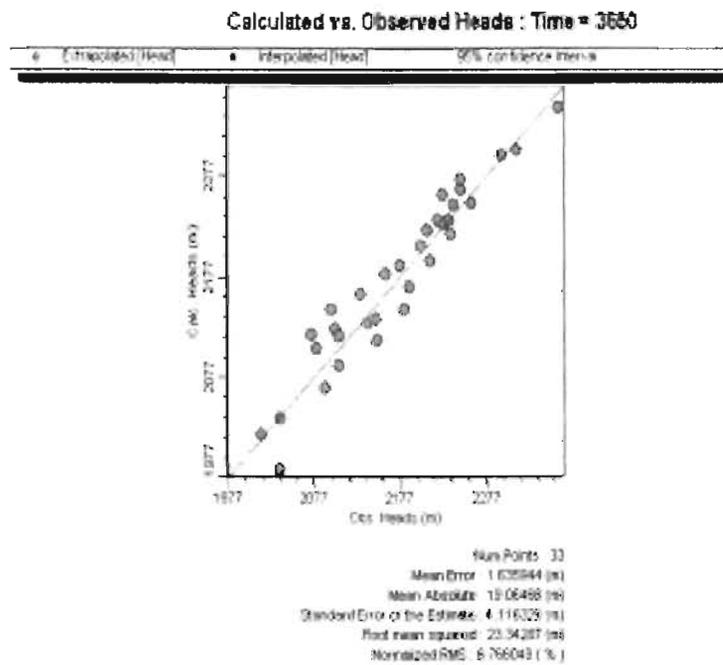


Figura 5.10 Calibración modelo de flujo año 1980

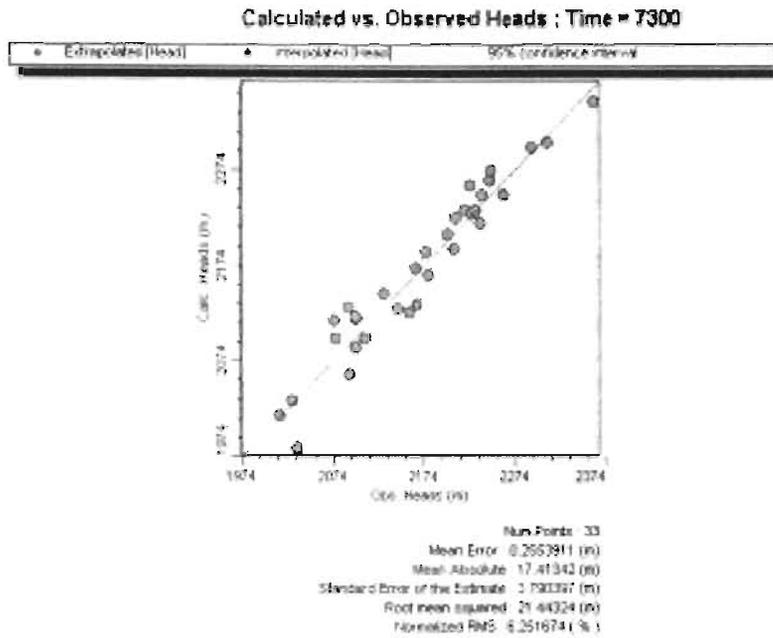


Figura 5.11. Calibración del modelo de flujo año 1990

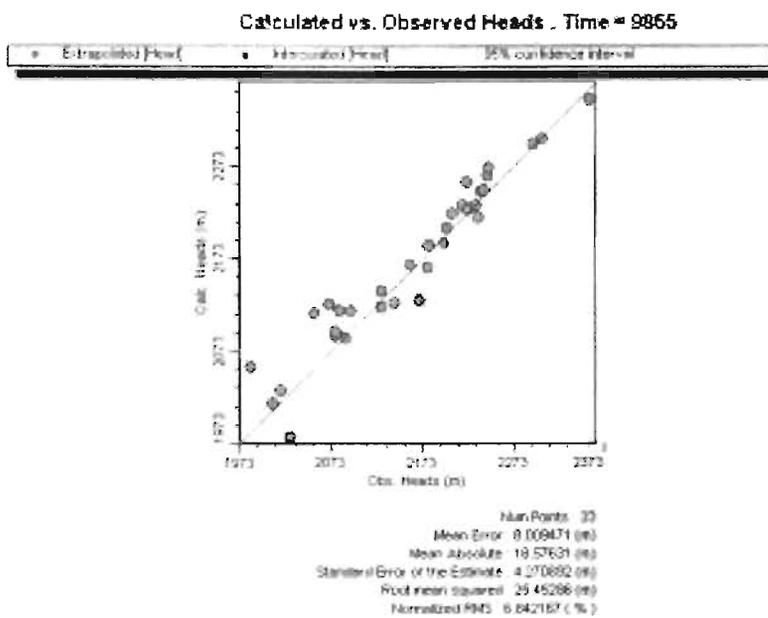


Figura 5.12. Calibración del modelo de flujo año 1996.

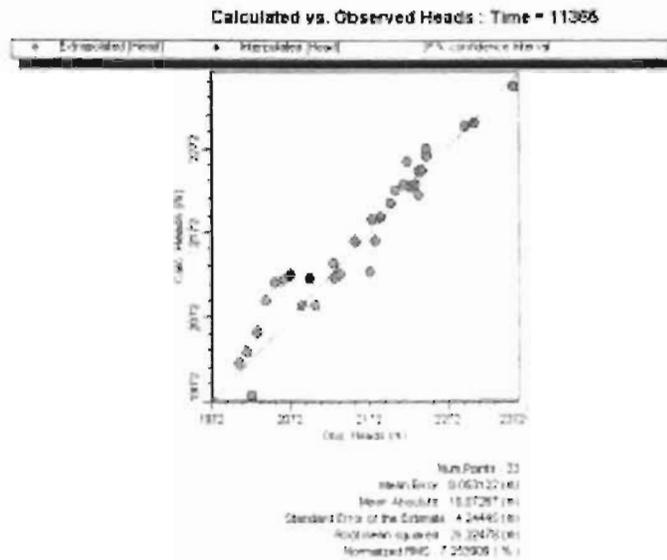


Figura 5.11. Calibración del modelo de flujo año 2002.

Calibración del modelo de transporte.

El parámetro que representa la propagación del agua termal sulfhídrica en el modelo, es la concentración de sólidos totales disueltos. El proceso de calibración se realiza mediante la comparación entre la concentración de sólidos totales disueltos medida en pozos localizados en la zona de agua termal sulfhídrica, y la obtenida por medio del modelo de transporte.

Esta calibración se realizó solo con 13 pozos, debido a que no todos los pozos tienen medidas de concentración de STD para los mismos años. El registro más antiguo de la concentración de STD de la zona sulfhídrica data del año 1990.

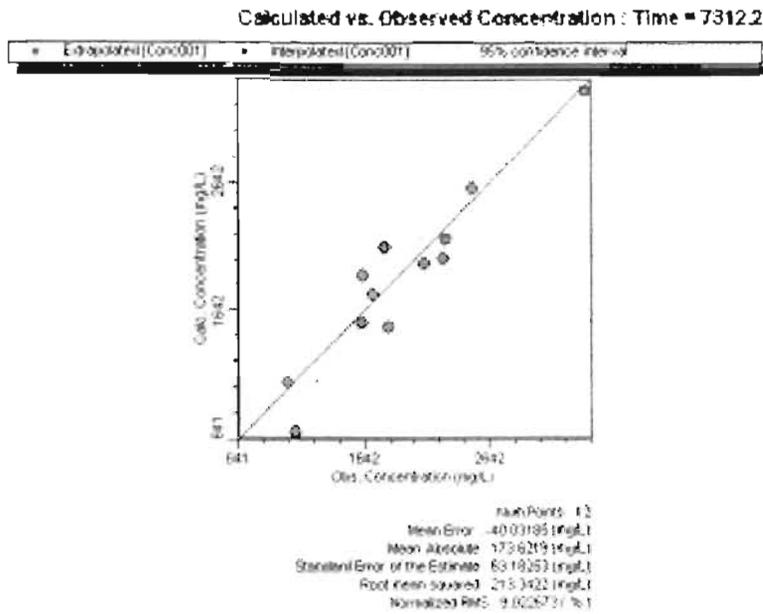


Figura 5.13. Calibración del modelo de transporte año1990

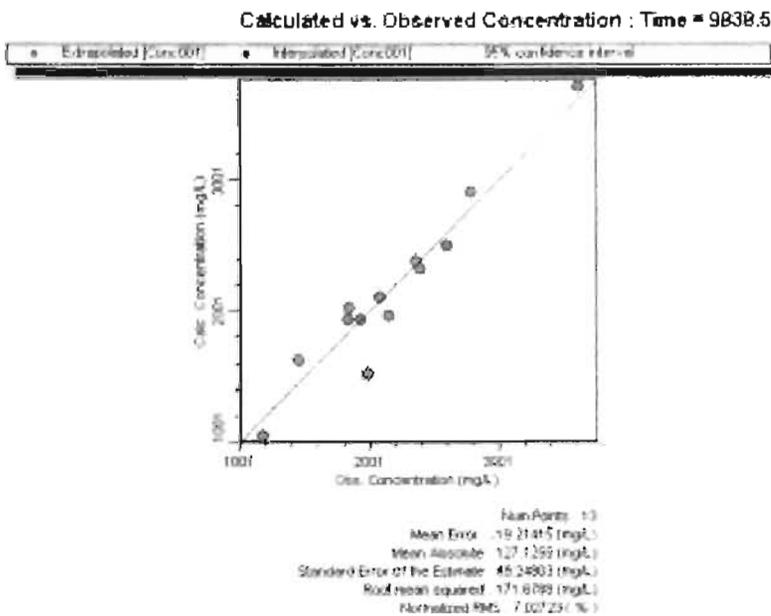


Figura 5.14. Calibración del modelo de transporte año 1996.

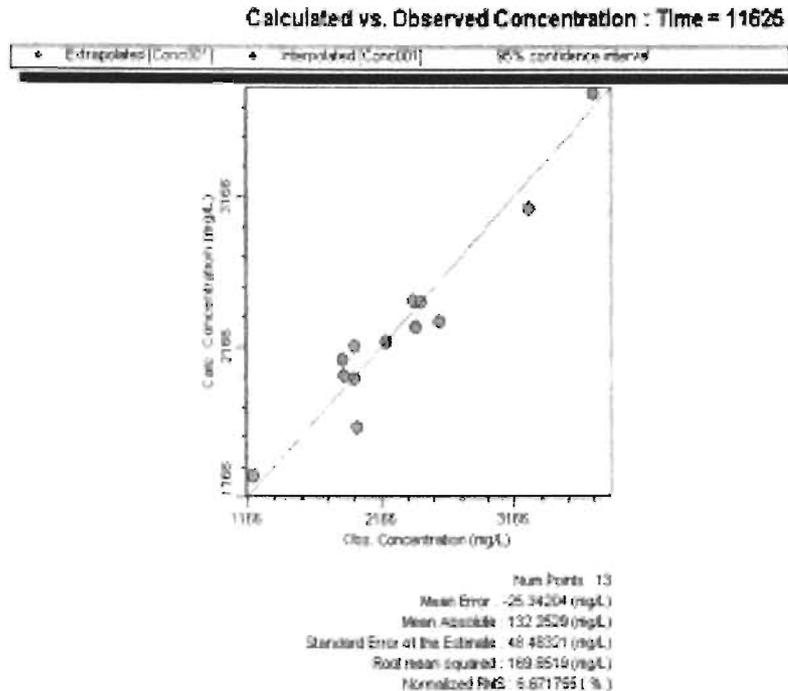


Figura 5.15. Calibración del modelo de transporte año 2002.

5.8 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Modelo de Flujo de la cuenca de Puebla

La solución de la ecuación diferencial de flujo de agua consta de dos familias de curvas ortogonales entre sí, que son las líneas de flujo y las líneas equipotenciales, debido a esta característica geométrica es posible obtener bastante información acerca del acuífero.

Las superficies potenciométricas generadas por el modelo deben coincidir con las rutas naturales de flujo de agua subterránea de la cuenca de Puebla, analizadas previamente en el capítulo IV:

- 1) Trazando líneas de flujo ortogonales a las superficies equipotenciométricas se deduce que la cuenca recibe recarga de agua subterránea del norte, este y oeste. Toda la frontera sur es la zona natural de descarga subterránea de la cuenca de Puebla. La zona que presenta descarga superficial (ríos) y subterránea es el sureste de la cuenca, en donde se localiza la ciudad de Puebla.
- 2) A partir de la coordenada 2118000 N-S las líneas de flujo son convergentes hacia los ríos Atoyac y Zahuapan que funcionan como drenes superficiales de la cuenca. Lo mismo sucede con el río Alseseca las líneas de flujo, se

dirigen hacia el, aunque es de menor importancia como dren superficial de la cuenca, debido a su pequeña longitud y caudal medio.

- 3) Del norte de la cuenca hacia el centro se observan dos características de las líneas equipotenciométricas su concavidad hacia el sur y su espaciado constante, la primera característica indica un flujo convergente hacia el sur; la segunda un gradiente hidráulico constante y como consecuencia un flujo uniforme. La distancia tan grande entre las líneas equipotenciométricas 2125, 2150 representa un nivel estático con muy poco gradiente a pesar de la gran extracción de agua subterránea que existe en esta zona, lo anterior se explica porque en esta zona convergen las líneas de flujo de una gran parte de la cuenca. La distancia horizontal entre las líneas equipotenciométricas en el sur de la cuenca se reduce significativamente lo cual se debe a que el nivel estático tiene un fuerte abatimiento y en consecuencia aumenta el gradiente hidráulico. La acentuada disminución del nivel estático en la zona sureste de la cuenca se debe a la gran extracción por bombeo en las zonas que rodean a la ciudad de Puebla interceptando el flujo subterráneo e impidiendo su recarga. Además esta zona es en donde menor precipitación media anual se registra. En las figuras 5.17–5.22 Se presentan las superficies equipotenciométricas.
- 4) Para analizar la respuesta a la extracción de agua del acuífero superior, tómanse como referencia las líneas equipotenciométricas en la ciudad de Puebla. La línea equipotencial 2120, es la que mayor desplazamiento registra hacia en norte nótese el cambio en su posición en el año 1973 al año 2002. La altitud de la cuenca es ascendente hacia el norte en consecuencia el desplazamiento de las líneas equipotenciales en la dirección norte significa un aumento en la profundidad del nivel estático, lo cual es congruente con los abatimientos registrados en campo. (Capítulo IV, párrafo 4.9.1).

Con base en los puntos 1 a 4 el modelo de flujo reproduce aceptablemente la evolución espacial y temporal del nivel potenciométrico de la cuenca de Puebla, entre los años 1973-2002.

Como parte de los objetivos de un modelo es la de prever la evolución espacial y temporal del nivel estático y la concentración de los sólidos totales disueltos, por lo que se simuló la condición de trabajo del sistema acuífero para el año 2011 aumentando los volúmenes de extracción de acuerdo a las tendencias actuales de crecimiento de la población en la ciudad de Puebla. En donde como era de suponerse el mayor abatimiento del nivel estático de toda la cuenca ocurre en la ciudad de Puebla obsérvese el desplazamiento hacia el norte de las líneas equipotenciométricas.

En la Figura 5.23 se presentan las líneas equipotenciométricas para el año 2015 con la característica de que en este escenario disminuye el volumen de extracción en la ciudad de Puebla, no se observa ninguna recuperación en los niveles potenciométricos, lo cual indica que prácticamente la recuperación del acuífero, no es posible en un período de 10 años.

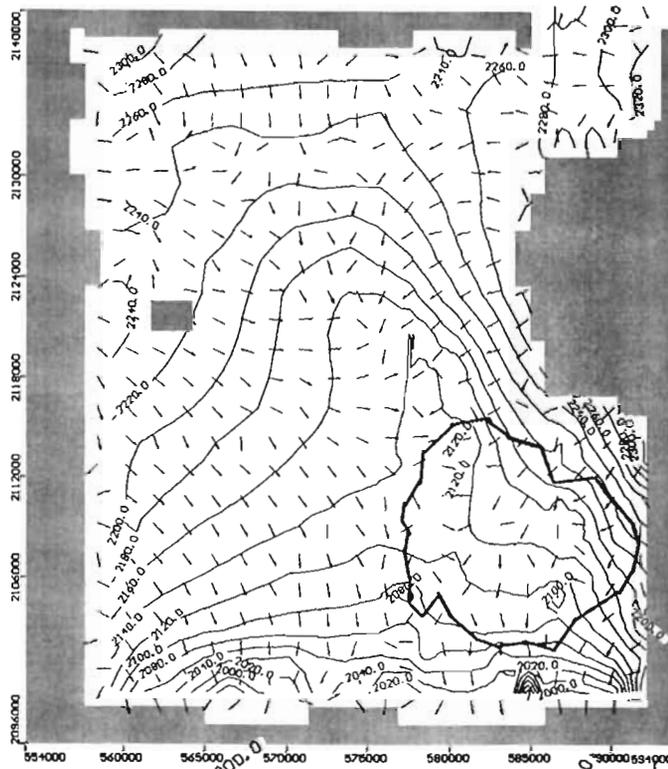


Figura 5.17 Líneas equipotenciométricas calculadas, año 1973

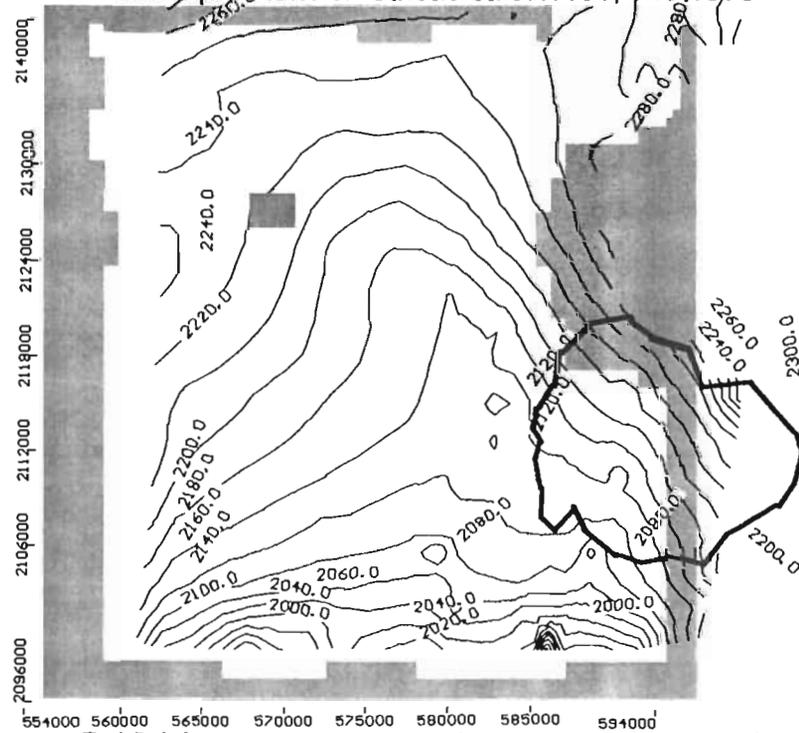


Figura 5.18 Líneas equipotenciométricas calculadas, año 1980.

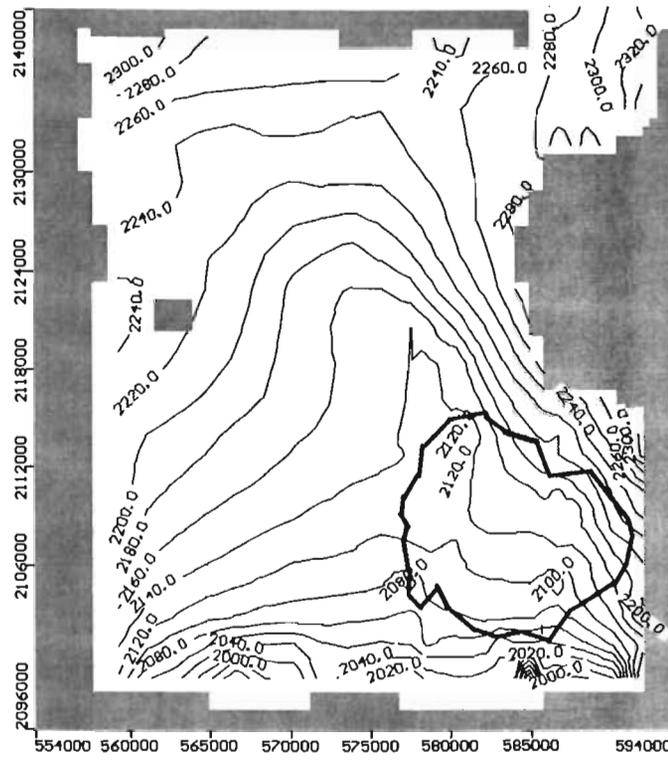


Figura 5.19 Líneas equipotenciométricas flujo transitorio calculadas, año 1990.

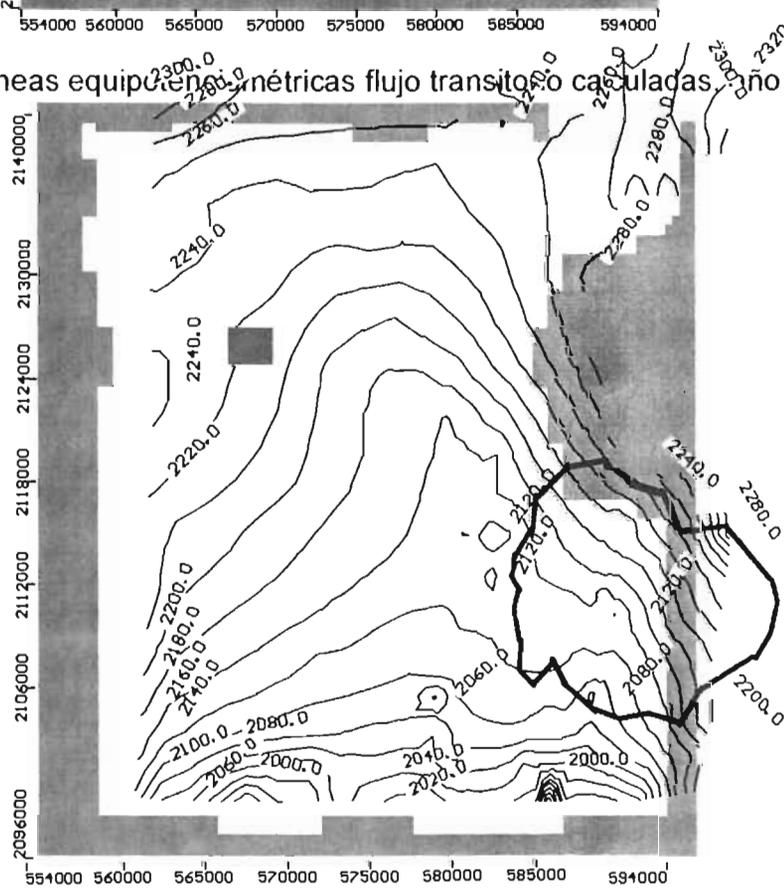


Figura 5.20. Líneas equipotenciométricas flujo transitorio calculadas, año 1996.

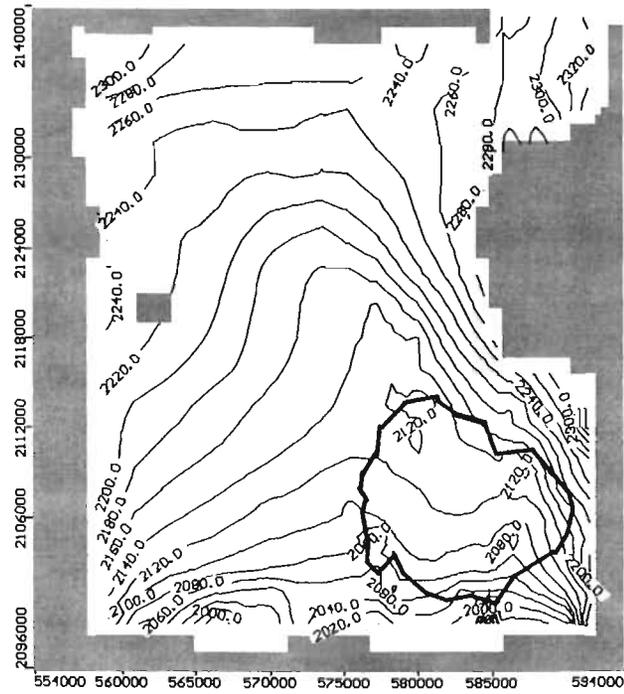


Figura 5.21. Líneas equipotenciales flujo transitorio calculadas, año 2002.

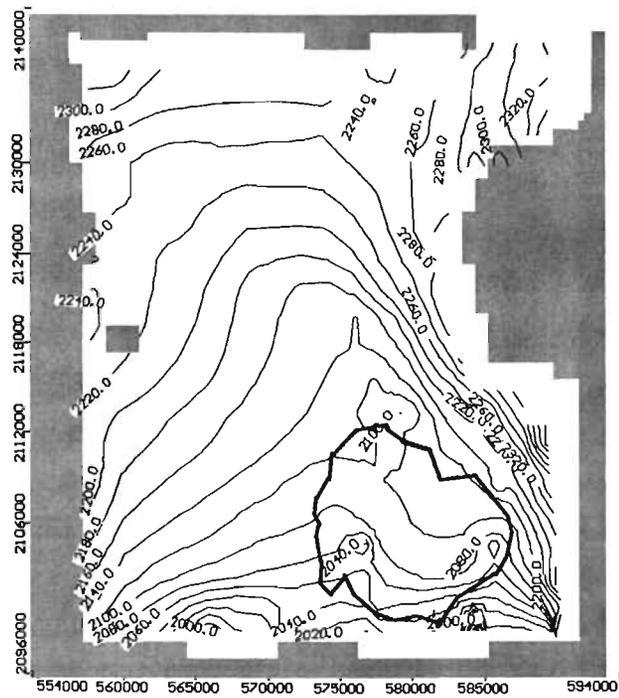


Figura 5.22. Líneas equipotenciales flujo transitorio calculadas, año 2011.

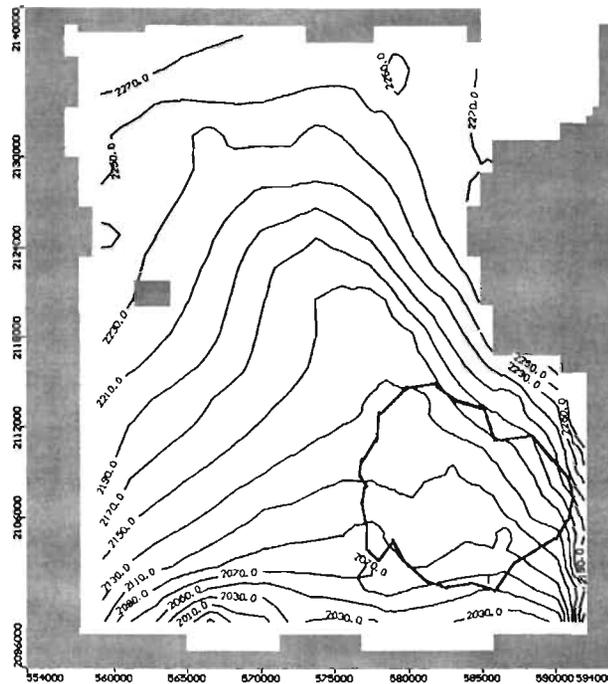


Figura 5.23. Líneas equipotenciales flujo transitorio, año 2015.

Modelo de transporte

La Fig. 5.23, es una ampliación de la ciudad de Puebla para estudiar a detalle la trayectoria de las líneas de flujo en la zona de agua sulfhídrica; se observa, en la parte norte este y oeste que las trayectorias de las líneas de flujo se desvían, no penetran en la zona sulfhídrica, lo anterior es consecuencia del contraste entre la magnitud de la conductividad hidráulica de la zona sulfhídrica y la magnitud de la conductividad hidráulica de la zona que la rodea, este contraste origina el fenómeno de reflexión hidráulica.

La dirección de las líneas de flujo dentro de la zona sulfhídrica es norte-sur distinto al patrón de ruta de las líneas de flujo de la zona circundante lo cual es indicativo de que existe un gradiente hidráulico distinto en dirección y magnitud entre las dos zonas, hecho que influye en la dirección de propagación del soluto. Con base en lo anterior cabe hacer la pregunta, si no existe flujo horizontal del acuífero freático hacia a la zona sulfhídrica; entonces, ¿de donde proviene el flujo de agua subterránea que recarga permanentemente la zona de agua sulfhídrica y sus manantiales?, la respuesta es la siguiente y fundamentada en el modelo generado en este trabajo: el flujo de agua proviene de la unidad hidrogeológica a una profundidad

más profunda. El ascenso vertical del agua subterránea se facilita debido a que la presión y la conductividad hidráulica son muy grandes en la zona de agua

sulfhídrica. Otra característica del flujo de agua del acuífero profundo (calizas del Cretácico) es su larga trayectoria de recorrido desde las zonas de recarga, dando tiempo suficiente a la mineralización del agua, lo cual es muy importante; ya que esto explica el porque el agua de la zona sulfhídrica además de tener iones típicos de un ambiente volcánico tiene altas concentraciones de carbonatos de calcio, magnesio, sulfatos, cloruros etc.

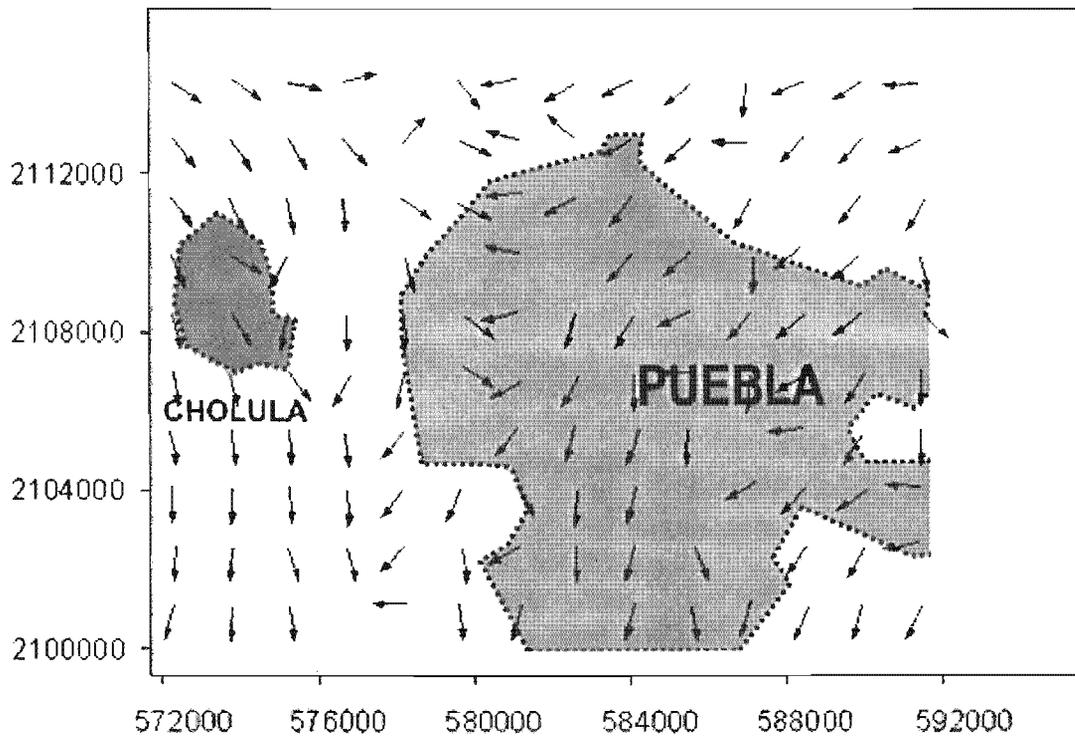


Figura 5.24. Las líneas de flujo del acuífero freático cambian de dirección en la frontera de la zona de agua sulfhídrica.

En las Figura 5.25-5.26. Se presenta un corte transversal este-oeste del modelo de flujo reproduciendo las condiciones del flujo del año 1973, la zona de agua sulfhídrica comprende las coordenadas 579000-585500, obsérvense las líneas (flechas) de flujo verticales ascendentes en la zona de agua sulfhídrica que se originan en la unidad hidrogeológica más profunda se inician en la coordenada 580084 y terminan en la coordenada 584120. En el año 2002 se incrementa la zona de las líneas de flujo con dirección vertical y comprende la coordenada 580000 a la coordenada 586650, es decir aumenta hacia el oeste una longitud de 2650 m, de esos 2650 m que aumenta, 1250 m los aumenta fuera de la zona que

se considera de agua sulfhídrica. La dirección en que aumentan las líneas de flujo con dirección vertical ascendente coincide con la zona que presenta un fuerte abatimiento del nivel estático del agua (aproximadamente 40 m).

La zona en que se ha incrementado el flujo de agua vertical en el acuífero profundo tiene una conductividad hidráulica menor a la conductividad hidráulica de la zona de agua sulfhídrica en todas las unidades hidrogeológicas, debido a esto se ha retrasado la velocidad de propagación del soluto verticalmente en las unidades hidrogeológicas profundas, y horizontalmente en el acuífero freático. Coincidentemente la zona del acuífero con aumento de flujo vertical presenta un incremento en la concentración de sólidos totales disueltos de 100 a 300 mg/l, del año 1990 al 2002. En la dirección norte-sur el incremento de las líneas verticales de flujo es muy pequeño del orden de 200 m.

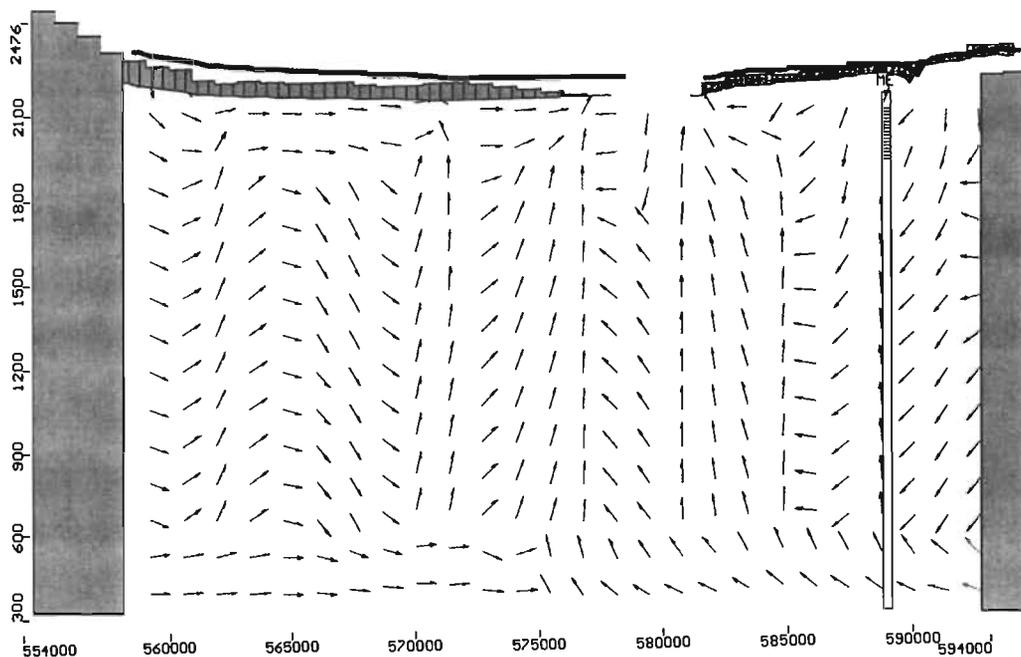


Figura 5.25. Corte transversal este –oeste pasando por la zona de agua sulfhídrica, año 1973.

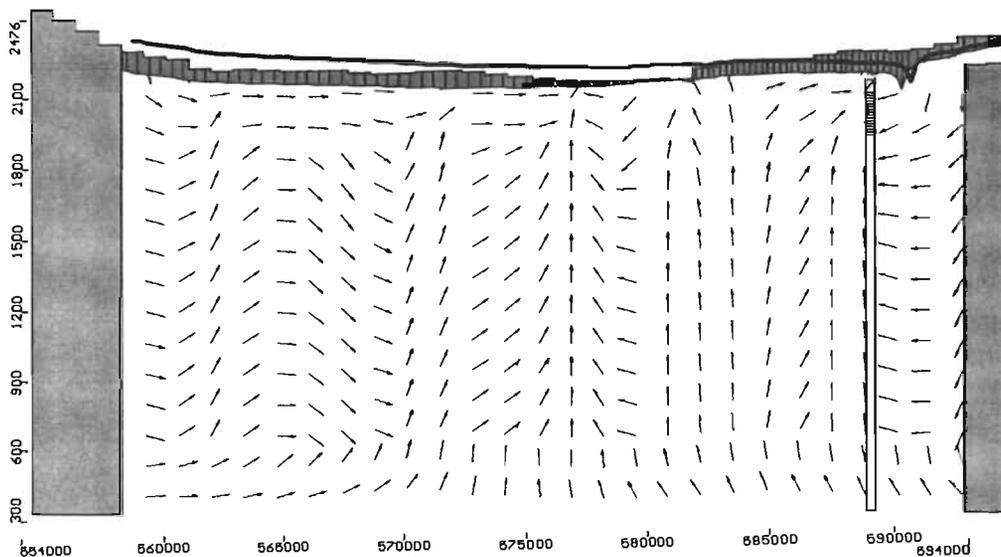


Figura 5.26. Corte transversal este –oeste pasando por la zona de agua sulfhídrica, año 2002.

A continuación se enumeran las características más importantes de la evolución espacial y temporal del agua sulfhídrica en el acuífero freático,

- 1) La propagación de soluto desde la fuente ubicada en el acuífero profundo al acuífero freático es vertical. En el acuífero freático la propagación transversal es horizontal y principalmente hacia el sur. La propagación del agua sulfhídrica en dirección este-oeste aun contra el flujo natural del acuífero freático se debe a que el flujo proveniente del acuífero profundo esta a una mayor presión hidráulica (Artesianismo) que el acuífero freático.
- 2) El agua sulfhídrica aflora a través 8 centros que tienen el papel de fuente de masa ya que a partir de ellos se propagan los STD en el acuífero freático. Las concentraciones de sólidos totales disueltos más antiguas registradas datan del año 1990 y son de 1500 la mínima a 3398 mg/l la máxima, que para el año 2002 se incrementan a 2000 mg/l la mínima y 4500 mg/l la máxima, y un significativo aumento en el área ocupada por agua termal sulfhídrica.
- 3) Debido a la disminución de la presión hidrostática en el acuífero freático aumenta el flujo de agua sulfhídrica proveniente del acuífero profundo a mayor presión. El flujo del acuífero profundo asciende en dirección vertical hasta el acuífero freático para tratar de alcanzar el equilibrio de presiones hidráulicas. Con base en lo anterior y desde el punto de vista del modelo de transporte se puede establecer una relación inversa entre el aumento en la concentración de sólidos totales disueltos y la disminución del nivel potenciométrico en la zona de agua sulfhídrica. Es evidente que la

disminución del valor de la carga potenciométrica hace aumentar la cantidad de agua de origen geotermal y en consecuencia la concentración de sólidos totales disueltos en la zona de agua sulfhídrica, por ejemplo la comparación de las líneas equipotenciométricas modeladas para los años 1973, 1990 y 2002, en la zona sulfhídrica nos permiten calcular un abatimiento medio de 22 m, y es la zona de la ciudad de Puebla que menor abatimiento ha registrado en los últimos 30 años. El pozo Anzures en donde se tiene registrada la máxima concentración de STD (3398-3798), el abatimiento del nivel potenciométrico para el mismo período es de 40 m, el mayor abatimiento en toda la zona de agua sulfhídrica.

- 4) En el acuífero freático la propagación longitudinal del soluto es en dirección norte-sur y la transversal es este-oeste. La propagación en dirección norte es marcadamente menor a la propagación en dirección sur, principalmente en los centro de masa localizados más hacia el sur debido a que aumenta significativamente el gradiente hidráulico en la dirección sur y aumenta la velocidad del agua subterránea.
- 5) El gradiente hidráulico en la zona de agua sulfhídrica cambia de .005 a .01 hacia el sur de la zona. Esto lo evidencia la separación que presentan las líneas equipotenciométricas en la zona de agua sulfhídrica y la zona sur.
- 6) En la fuente de masas en el acuífero freático en las coordenadas este-oeste 586753, norte sur 2109314, debido a que ubica en una zona de menor conductividad hidráulica la distancia de propagación del soluto es muy reducida al igual que su velocidad de propagación.

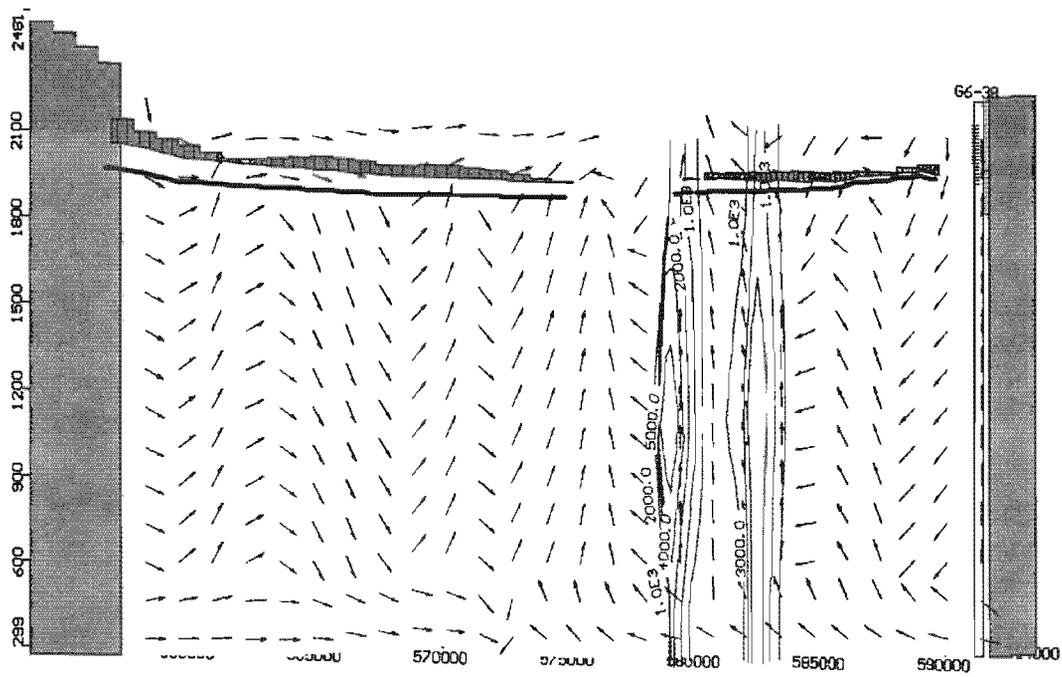


Figura 5.26. Configuración este-oeste del área ocupada por el soluto, año 1990, la propagación longitudinal es vertical, la transversal es horizontal.

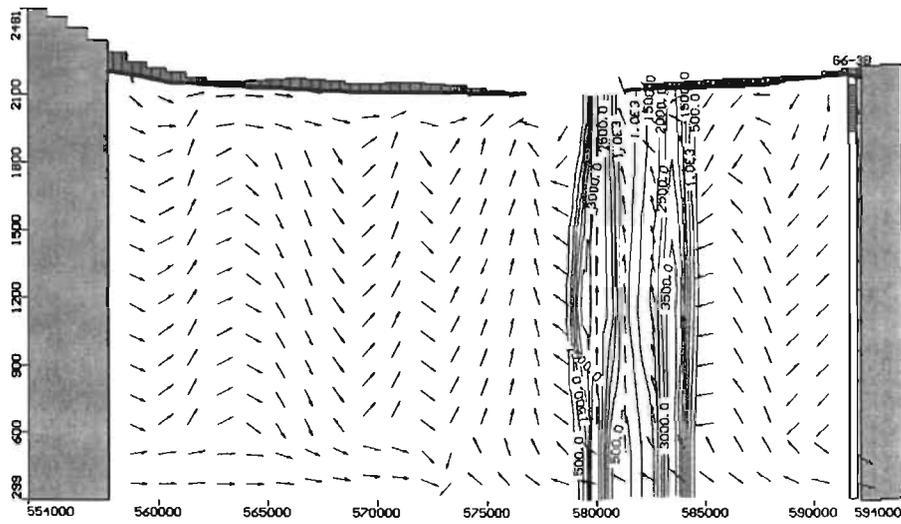


Figura 5.27. Configuración este-oeste del área ocupada por el soluto, año 2002, la propagación longitudinal es vertical, la transversal es horizontal.

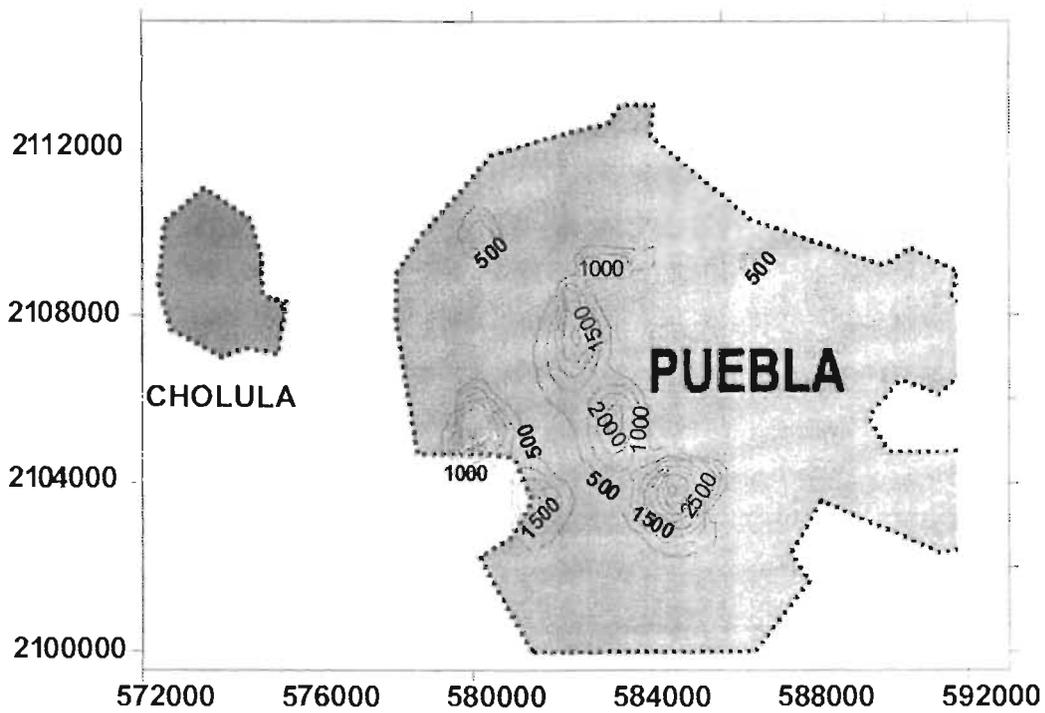


Figura 5.28. Concentración de la masa en el acuífero freático, año 1990

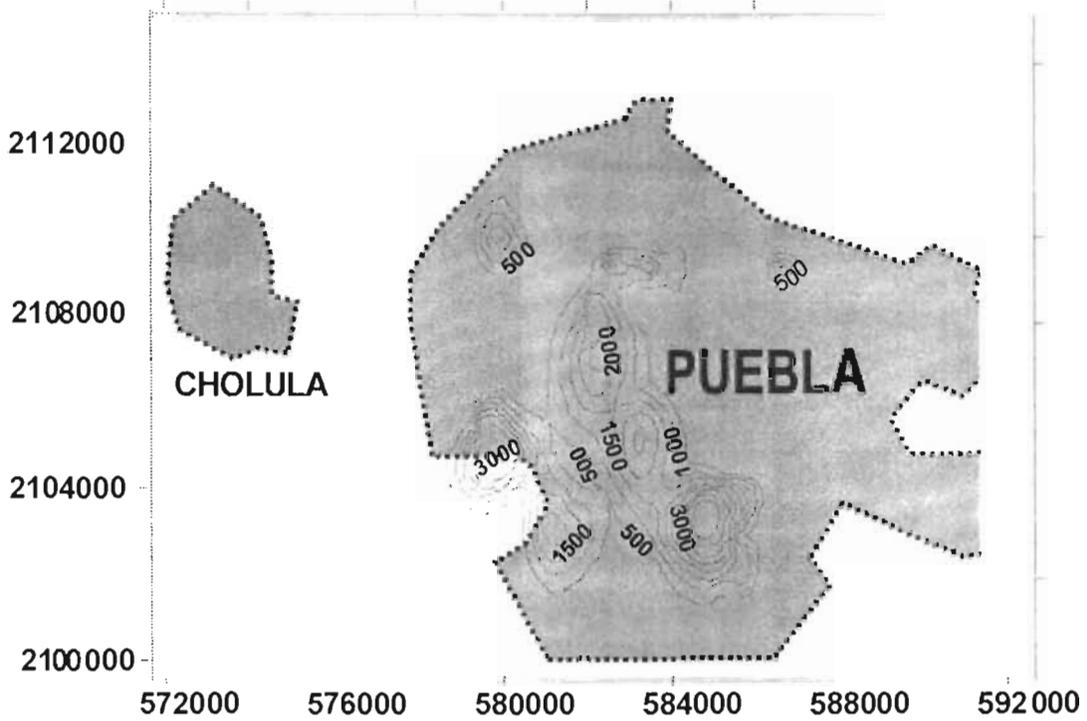


Figura 5.29. Concentración de la masa en el acuífero freático, año 1996.

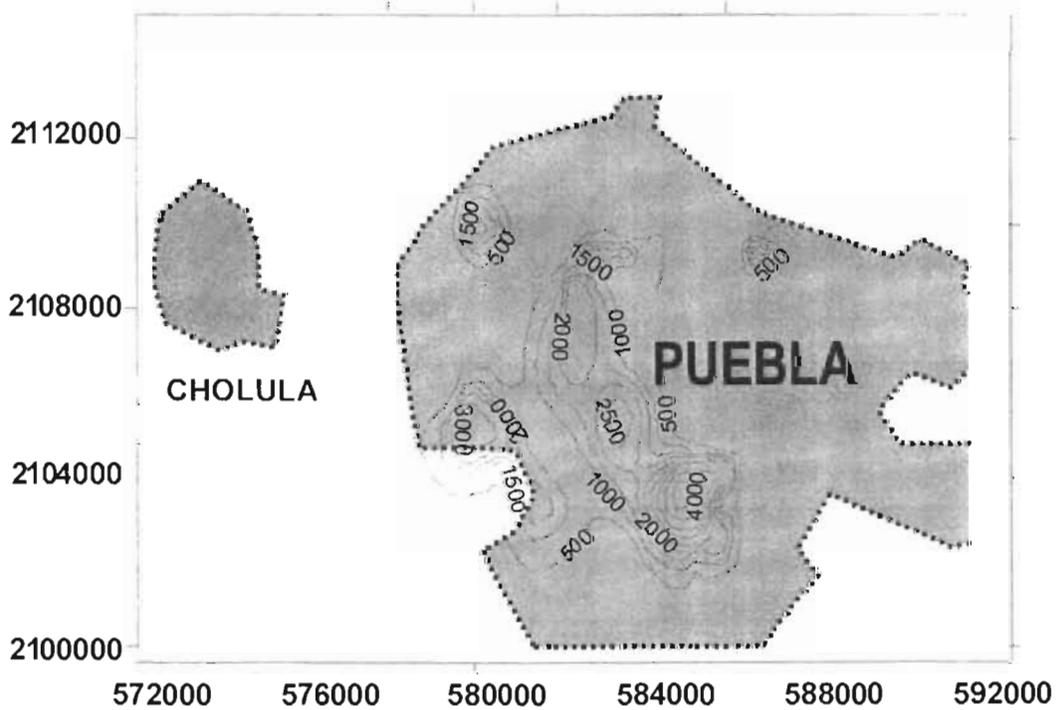


Figura 5.30. Concentración de la masa en el acuífero freático, año 2003

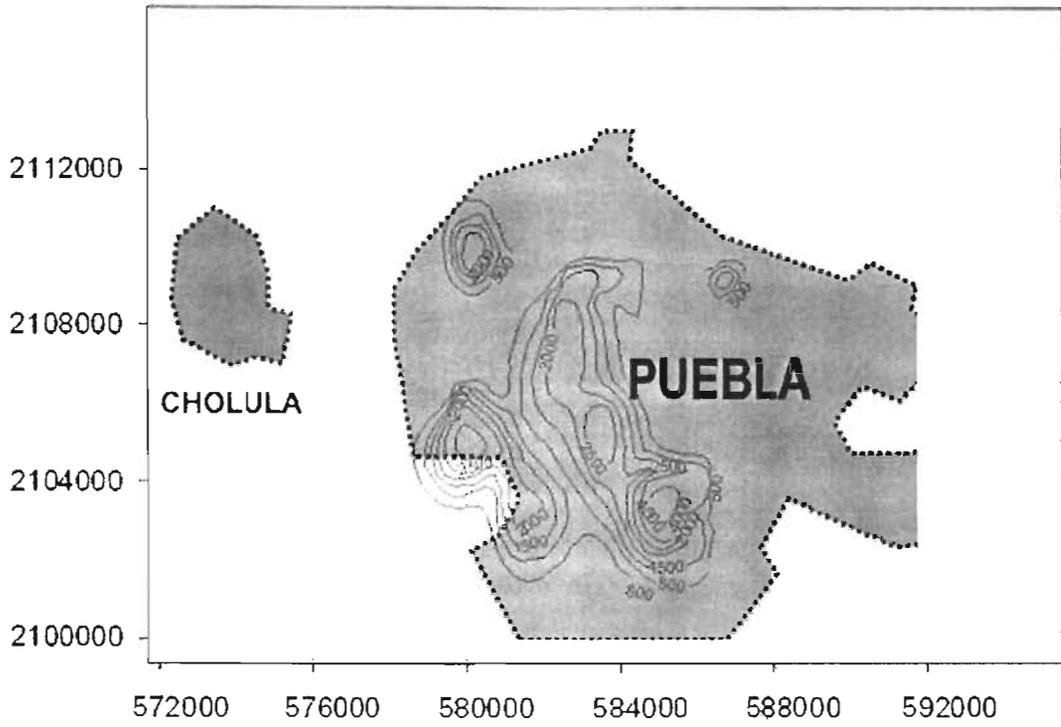


Figura 5.31. Concentración de la masa en el acuífero freático, año 2011

5.9 CONCLUSIONES GENERALES

1. Se construyó un modelo geológico 3D, con base en los sondeos eléctricos verticales, la litología de los pozos, geología de campo, y los datos existentes en la literatura, que reproduce las condiciones reales del sistema acuífero.
2. Se realizó una recopilación de los niveles estáticos históricos medidos en los pozos del acuífero; para los años 1973, 1980, 1990, 1996 y 2002. Estos niveles permitieron evaluar la caída del nivel estático del año 1973 hasta 2002; encontrándose un importante cono de abatimiento de 80 m de profundidad, situado al sur de la cuenca de Puebla, entre las ciudades de Cholula y Puebla.
3. También se realizó la recopilación de los estudios hidrogeoquímicos de la cuenca de Puebla, de los que solo existen dos períodos estudiados: 1990 y 1997. La evolución de los STD observada en la cuenca, permite afirmar que solo la zona sur presenta incrementos importantes en STD. Por lo que los estudios más recientes solo fueron realizados en esa zona, encontrándose en la denominada zona termal sulfhídrica de la ciudad de Puebla, incrementos en STD de hasta 500 mg/l.
4. Se asume que el origen del agua termal sulfhídrica es volcánico según se desprende, de la concentración del boro mayor a 1 mg/l y el cloruro mayor a 50 mg/l, la presencia de sulfuros el orden de 11 mg/l y la alta concentración de sólidos totales disueltos 3800 mg/l, que son elementos típicos de sistemas hidrotermales. La cercanía del volcán la Malinche a la zona sulfhídrica (aproximadamente 20 kms) es un indicio de una posible relación del sistema acuífero con el termalismo de este volcán
5. El modelo numérico de flujo y transporte, desarrollado en el paquete computacional VISUALMODFLOW, permitió reproducir la variación espacial y temporal de los parámetros que caracterizan el funcionamiento del sistema acuífero, como son: las superficies equipotenciométricas, la distribución de cargas hidráulicas y la concentración de sólidos totales disueltos, entre otros. Los datos que se introdujeron en el modelo numérico son los que provienen del modelo geológico, como: la geometría del acuífero, la forma y espesor de los estratos, condiciones de frontera y los datos hidrogeológicos, como: distribución inicial de cargas hidráulicas, volumen de extracción de agua y condiciones a la frontera de carga y descarga.
6. El modelo de transporte de masas se realizó para simular la intrusión de agua sulfhídrica en el acuífero freático. El tamaño, forma, concentración y ubicación exacta de las fuentes de soluto en un sistema hidrotermal es muy difícil de determinar. Sin embargo, teniendo en cuenta la ubicación de la fractura valsequillo y la falla Malinche, se propusieron 12 fuentes puntuales alineadas sobre ellas: 6 en la dirección NW-SE (fractura Valsequillo) y 6 en la dirección NE-SW (falla Malinche). La profundidad de las fuentes se asumió a 1000 m, en el acuífero profundo.

7. Según se desprende del modelo el incremento de agua termal sulfhídrica en la superficie y la migración de agua sulfhídrica hacia zonas consideradas de agua dulce de buena calidad se debe a tres causas:

- a) La disminución de la presión hidrostática trae como consecuencia una alteración en los patrones de flujo en todas las unidades hidrogeológicas, aumentando el flujo vertical de agua sulfhídrica hacia la superficie. Con base en la evolución del nivel estático, de la composición geoquímica del agua subterránea y la interpretación de los datos generados por el modelo de flujo y transporte, el abatimiento del nivel estático es su principal causa.
- b) En la zona sur ciudad de Puebla debido a un incremento del gradiente hidráulico, consecuencia del abatimiento del nivel estático, se ha incrementado la velocidad del flujo de agua subterránea y por lo tanto la velocidad de propagación del soluto por advección.
- c) Otra variable que contribuye a incrementar la concentración de STD, en el acuífero freático, es el aumento de volumen de agua sulfhídrica y la disminución del volumen de agua dulce.
- d) Según el modelo, la principal dirección de propagación del soluto es en la dirección del flujo de agua, por lo tanto se trata de un proceso de advección dominante.
- e) La geometría del volumen que contiene al soluto y el avance de la concentración depende de la dirección del transporte advectivo, y a la vez depende de: la conductividad hidráulica, configuración del nivel potenciométrico que rodea a la fuente de soluto y que rige la dirección del flujo, magnitud del gradiente hidráulico y de los parámetros de dispersión hidrodinámica.
- f) La dirección vertical del flujo es controlado por la orientación de las fracturas, fallas y canales de disolución.
- g) Por medio del modelo numérico de flujo y transporte, se ha comprobado la hipótesis planteada: el abatimiento del nivel estático causa un desequilibrio de presiones entre el acuífero freático y el profundo, este desequilibrio genera el incremento de agua sulfhídrica en el acuífero freático.

Discusión

El nivel potenciométrico es un parámetro fundamental que debe ser medido periódicamente con precisión. Además, se debe detener la extracción de los pozos en que se mide el nivel del agua, con tiempo suficiente para que el nivel estático se recupere. El bajo control en esta medida y en la configuración manual de niveles potenciométricos históricos ocasionan un mal ajuste de datos observado y

calculados. Es decir la aproximación entre las superficies piezométricas observadas y las modeladas no es muy buena.

El único estudio físico-químico dirigido al agua termal sulfhídrica fue el efectuado por la Comisión Nacional del Agua (Prieto, 1993), para los años 1990-1993. Por lo cual no se puede analizar la evolución del agua termal sulfhídrica mediante otros parámetros como los iones propios de ambientes geotermales como: boro, cloro, sulfuro de hidrógeno y temperatura. La medida de gradientes verticales de temperatura en pozos de la zona de agua termal sulfhídrica, también sería un excelente indicador de la migración del agua termal sulfhídrica. Para un estudio integral del sistema hidrotermal, es necesario efectuar prospección geofísica, para determinar las características de la estructura geológica que induce el ciclo del agua sulfhídrica, análisis de química isotópica para determinar el origen y la evolución geoquímica del agua.

En este trabajo se tuvieron limitaciones en cuanto a datos en todos los rubros, posición exacta de todos los pozos, medidas periódicas del nivel potenciométrico, análisis físico-químicos periódicos.

Otra variable difícil de controlar son los gastos de extracción anual debido a que en el modelo en algunas zonas se le introducía el volumen de extracción proporcionado por la Comisión Nacional del Agua, y no era posible obtener la calibración de las líneas equipotenciométricas, se tenía que aumentar el número de pozos y el gasto de extracción, lo cual es posible porque los usuarios no denuncian los verdaderos gastos de extracción.

El VISUALMODFLOW presenta dispersión numérica al resolver la ecuaciones de flujo al introducir valores adyacentes de conductividad hidráulica con un fuerte contraste, es decir la diferencia de valores adyacentes de conductividad que admite esta acotada, no existe un valor límite definido puesto que también depende de otros parámetros de la ecuación de flujo, esta situación se traduce en una limitación de carácter práctico ya que no es posible representar materiales con un fuerte contraste en los valores de conductividad hidráulica.

Recomendaciones

- a) Es necesario aumentar el conocimiento de la geología estructural y la estratigrafía de la cuenca de Puebla, sobre todo en las fronteras hidrogeológicas naturales como la Sierra Nevada, volcán la Malinche, meseta de Tlaxcala, la zona de agua termal sulfhídrica, que permitan construir modelos numéricos de la cuenca con mayor apego a la realidad y apoyarse menos en extrapolaciones.
- b) Realizar análisis físico-químicos periódicamente de la zona termal sulfhídrica y la zona que la rodea determinando la concentración de iones característicos de sistemas geotermales.

- c) Evitar el abatimiento del nivel estático en el acuífero superior, en la zona de agua termal sulfhídrica y en el área en que se esta propagando.
- a) Aumentar la recarga, mediante aumento de áreas verdes e inyección de agua tratada en la zona termal sulfhídrica, con la finalidad de introducir mayor presión del agua dulce sobre el agua termal contenida en unidades hidrogeológicas más profundas.
- b) Al perforar un pozo en la ciudad de Puebla deben hacerse estudios geofísicos e hidrogeológicos para asegurarse que no se perfore en las zonas de agua termal o en zonas en donde existan áreas aisladas de agua termal.
- c) Para estudiar con mayor precisión la evolución del sistema acuífero y construir con mayor facilidad modelos de flujo y transporte son necesarios los siguientes datos, el volumen de extracción anual, posicionamiento GPS de todos los pozos, la medida del nivel potenciométrico y análisis físico-químicos en forma periódica en toda la cuenca.

REFERENCIAS

- Atlas del Agua de la República Mexicana, 1976. Editado por la Secretaría de Recursos Hidráulicos S.R.H.
- Anderson Mary P. Woessner, William W., 1992 Academic Press.
- Bear, Jacob, 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier, New York.
- Bear Jacob. and A. Verruijt, 1987. Modeling Groundwater Flow and Pollution. D. Reidel Publishing Company.
- Bear J. and Y. Bachmat, 1991. Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media. Klumer Academic Publishers.
- Burnett, R.D. and Frind, E.O., 1987. An Alternating Direction Galerkin Technique for Simulation of Groundwater Contaminant Transport in Three Dimensions, 2, Dimensionally effects. Water Resour. Res., Vol 23, no.4, pp 695-705.
- Castany, G., 1963. Traité Pratique dex Eaux Souterraines. Dunod, Paris.
- Castany, G., 1975. Prospección y Explotación de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.
- Cementos Atoyac, 1988. Fabrica de Cementos Atoyac. Estudio Geoeléctrico, en las canteras de planta ubicada en la ciudad de Puebla, (Actualmente, cerrada).
- Cheng, H.-D. A., 2000. Multilayered Aquifer Sitems Fundamentals and Aplications. Editorial, Marcel Dekker, Inc.
- Comisión Nacional del Agua, 1990. Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla. Gerencia de Aguas subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua Gerencia Estatal en Puebla, 1993. Estudio Pozos Sulfurosos del Municipio de Puebla, 1993. Contratista Ing. Francisco A. Prieto Ortiz.
- Custodio, E. Llamas, M.R., 1996. Hidrología Subterránea Tomo I, Segunda Edición. Ediciones Omega. Barcelona.
- Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. Revista del Instituto de Geología, UNAM, V.2. No. p.p. 172-187.
- Davis N. Stanley. DeWiest Roger J.M., 1966. Hydrogeology. Krieger Publishing Company Reimpresión 1991.

De Marsily G., 1986. Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers. Academic Press, Inc.

Domenico P.A., Schwartz F.W., 1997. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, Inc.

Fetter C.W., 1994. Applied Hydrogeology. Third Edition. Prentice Hall.

Freeze Allan R., Cherry John A., 1979. Groundwater. Prentice Hall.

Font Tullot Inocencio, 1991. El Hombre y su Ambiente Atmosférico. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid, España.

Gelhar L.W., C. Welty, and K.R. Rehfeldt, 1992. A Critical Review of Data on Field-Scale dispersion in aquifers, Water Resour. Res., 28(7), 1955-1974.

Geotecnología S.A., 1997 (Empresa Privada). Actualización del Estudio Geohidrológico de los acuíferos del Valle de Puebla, Pue. Elaborado para el Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla (SOAPAP).

C.N.A., Gerencia de Aguas Subterráneas, 2002, Subgerencia de Exploración y Monitoreo Geohidrológico, Puebla, pue.

Hubbert M. K., 1940, The Theory of Ground-Water Motion, J. Geol. 4, 785-944.

Istok Jonathan, 1989. Groundwater Modeling by the Finite Element Method. American Geophysical Union.

Jiménez Suárez Gabriel, 1985-2004, Experiencia Profesional, Estudios de Mecánica de Suelos. Informes Particulares.

Jiménez Suárez Gabriel, 1997. Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Puebla. Tesis de Maestría. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI), UNAM.

Kessler H., 1965. Water Balance Investigations in the Karstic Regions of Hungary, Vol, 1 I.A.H.S. UNESCO.

Klots, D., K.P. Séiler, H. Moser and F. Neumaier, 1980. Dispersivity and Velocity From Laboratory and Field Experiments, Journal of Hydrogeology. 45(3/4), 169-184.

Lallemand-Barrès, A. and Peaudederf, P. (1978) Recherche des Relations entre les Valeurs Mesurées de la Dispersivité Macroscopique d'un Milieu Aquifère, ses Autres Caractéristiques et las Conditions de Mesure. Etude Bibliografique. Bull. Bur. Rech. Geol. Min. Sér2, Sec.III, 4-1978, 277-284.

Llamas, M.R. y Custodio, E. 1999. aguas Subterráneas Revista CIDOB d'afers Internacionals, NO. 45-46, Fundació CIDOB, Barcelona, 35-57.

Linsley K. R., Kohler M. A., Paulhus J.L., 1994. Hidrología para Ingenieros. Segunda Edición Mcgraw-HILL.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., 1988 A Modular Three-Dimensional finite difference Ground-Water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Techniques of Water-Resoueces Invesgations, book 6, chap. A1, 586 p.

Malvern Laurence E., 1969 Introduction to The Mechanics of a Continuous Medium. Prentice Hall, Inc.

Millington, R.J., and J. M. Quirk, "Permeability of Porous Solids," Trans, Faraday Soc., 57,1200-1207, 1961.

Mooser, F., 1975. Historia Geológica de la Cuenca de México. Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal Tomo I DDF. p.p. 7-38.

Mooser, F., M. E. A. Nairn and F.W.J. Negendank, 1974. Paleomagnetic Investigations of the Tertiary and Quaternary Igneus Rocks: VIII A Paleomagnetic and Petrology Study of Volcanics of the Valley of México. Geol. Rundschau, 63, 451-483.

Mooser, F. F., Montiel A, Zúñiga, 1996. Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México Toluca y Puebla, Comisión Federal de Electricidad, C.F.E.

Neuman, S.P., 1984. Adaptive Eulerian-Lagrangian Finite Element Method for Advección-Dispersion. Int. J. Numerical Methods in Engineering, Vol. 20, pp. 321-337.

NOM-127-SSA-1994. Normas Oficiales Mexicanas. Agua para uso y Consumo Humano, subsecretaría de Regulación y Fomento Sanitario. Dirección General de Salud ambiental.

Nicholson Keith, 1993. Geothermal Fluids, Chemistry and Exploración Techniques. Springer- Verlag.

Nilson Guiguer & Thomas Franz, 1999. User's Manual for Visual MODFLOW 2.8. Waterloo Hydrogeologic INC. Ontario Canada.

Orellana Ernesto, 1972. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Editorial Paraninfo. Madrid España.

Ortega F., 1978. Estratigrafía del complejo Acatlan en la Mixteca baja, Estados de Puebla y Oaxaca. Revista del Instituto de Geología, UNAM, V. 2, No.2 p.p. 27-29

- Price Michael, 2003. Agua Subterránea. Traducción Dr. Joel Carrillo-Rivera UNAM, M.C. Antonio Cardona UASLP. Editorial Limusa.
- Prieto Ortiz Francisco A., 1993. Pozos Sulfurosos del Municipio de Puebla, Comisión Nacional del Agua Gerencia Estatal en Puebla.
- Pfannkuch, H.O., Contribution à l'Étude des Déplacements de Fluides Miscibles Dans un Milieu Poreux, Revue de l'Institut Français du Petrole, 18. 215-270, 1963.
- Salazar Mandujano S., 1970. Informe Final Prospecto Puebla. Archivo Pemex I.G.P.R.-082, unveröffentlicht, México D.F.
- Schoeller, H., 1962. Les Eaus Souterraines. Ed. Masson, Paris, p. 253.
- S.O.A.P.A.P., 1999, 2002, 2004. Informes de Laboratorio de Análisis Físico-Químicos, Dpto. de calidad del agua.
- Síntesis Geográfica, Nomenclátor y Anexo Cartográfico del Estado de Puebla, 1987. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA GEOGRAFIA E INFORMATICA (INEGI).
- Terzaghi K., 1956. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley and Sons Inc.
- Thomas M. James, Welch H. Alan, Dettinger D. Michael, 1996. Geochemistry and Isotope Hydrology of Representative Aquifers in the Great Basin Region of Nevada, Utah, and Adjacent States.
- UNAM, INEGI, 1984. Geología de la República Mexicana. Coedición por convenio entre el Instituto de Estadística Geografía e Informática y la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vásquez-Sánchez, E. y Jaimes-Palomera R., 1989. Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, p 133-190, Vol. 28 Núm. 2, México D. F.
- Verma, S.P., 1987. Mexican Volcanic Belt-Present State of Knowledge and Unsolved Problems: Geofísica Internacional, V.26,p. 309-340.
- Viniegra Osorio F., 1992. Geología Histórica de México. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Werner Joerg, 1996. Introducción a la Hidrogeología. Editado por la Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias de la Tierra. República Mexicana.
- White, D.E., 1957a, Thermal Waters of Volcanic Origin: Geol. Soc. Am. Bull., v. 68 pp. 1637-1658.
- White, D.E., 1957b, Magmatic, Connate, and Metamorphic Waters: Geol. Soc. Am. Bull., v. 68 pp. 1659-1682.

White, D.E., 1970. Geochemistry of the Ground Water to the Discovery Evaluation and Exploitation of Geothermal Energy Resources. V Simposio Sobre utilización de Recursos Geotérmicos en Pisa Italia. Organizado por las Naciones Unidas 1970.

Wilhem Köppen. Carta Mundial de Climas 1937. Gran Atlas Mundial Soviético, Publicado en Moscú URSS.

Zheng, Chunmiao, Bennet Gordon, 1995. Applied Contaminant Transport Modeling, Theory and Practice. Van Nostrand Reinhold Company.

ANEXO A

TABLAS DE ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS

AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA DE PUEBLA

Tabla A.1 Análisis físico-químicos Valle de Puebla año 1997

| Pozo Ident. | Calcio | Magnesio | Sodio | Bicarbonatos | Sulfatos | Cloruros | Dureza Total CaCO3 | Alcalinidad total | Silice | S.T.D. | Bióxido de Carbono CO2 | Conductividad Eléctrica | Nitratos NO3 | pH |
|-------------|--------|----------|---------|--------------|----------|----------|--------------------|-------------------|--------|--------|------------------------|-------------------------|--------------|-----|
| | mg/l | mg/l | Na mg/l | HCO3 mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | months/cm | mg/l | |
| E5-10 | 24.8 | 17 | 24.1 | 203 | 4.8 | 8 | 132 | 168.3 | 76 | 359.7 | 6 | 420 | 11.4 | 7.6 |
| E3-16 | 25.6 | 20.4 | 23 | 235.5 | 4.3 | 0.4 | 148 | 2193.3 | 72 | 381.2 | 4.5 | 382 | 4.4 | 7.8 |
| E6-54 | 32.8 | 40.8 | 13.8 | 233.5 | 60 | 18.5 | 250 | 191.6 | 75 | 474.4 | 18 | 608 | 20 | 7.1 |
| E7-6 | 36 | 36.5 | 26.9 | 294.4 | 29 | 19 | 240 | 241.6 | 75 | 516.7 | 15 | 598 | 7 | 7.3 |
| E6-17 | 46.4 | 30.6 | 19.9 | 259.8 | 30.8 | 28.5 | 242 | 213.2 | 72 | 488.1 | 11 | 663 | 25 | 7.4 |
| F7-88 | 76 | 13.1 | 63.2 | 324.8 | 95 | 11.5 | 244 | 266.6 | 70 | 653.6 | 10 | 659 | 3 | 7.4 |
| F7-10 | 64 | 24.3 | 50.5 | 426.3 | 7.2 | 9 | 260 | 349.9 | 68 | 649.3 | 30 | 703 | 4.8 | 7.3 |
| F7-25 | 62.4 | 20.4 | 28.2 | 341 | 5.3 | 11.5 | 240 | 279.9 | 70 | 538.9 | 13 | 614 | 13.2 | 7.5 |
| E6-6 | 96 | 43.7 | 157.4 | 791.7 | 68 | 30 | 420 | 649.7 | 73 | 1259.9 | 150 | 1340 | 1.7 | 6.8 |
| C7-16 | 6.4 | 7.3 | 14 | 81.2 | 4.8 | 3.5 | 46 | 66.6 | 68 | 185.2 | 3 | 181 | 4.8 | 7.9 |
| C7-13 | 26.4 | 22.8 | 29.1 | 243.6 | 7.7 | 11 | 160 | 199.9 | 76 | 416.7 | 78 | 497 | 10.1 | 6.4 |
| H2-9 | 24 | 14.6 | 23.1 | 192.9 | 6.2 | 4 | 120 | 158.3 | 80 | 344.8 | 7 | 343 | 5.2 | 7.5 |
| G2-13 | 16 | 11.2 | 26.6 | 162.4 | 2.9 | 5.5 | 86 | 133.3 | 75 | 299.6 | 6 | 288 | 3.5 | 7.7 |
| B2-7 | 12 | 19.4 | 32.8 | 209.1 | 5.3 | 3 | 110 | 171.6 | 67 | 348.6 | 10 | 325 | 0.4 | 7.4 |
| C4-10 | 10.4 | 16 | 27.8 | 172.6 | 5.3 | 3.5 | 92 | 141.6 | 70 | 305.4 | 9 | 300 | 0.9 | 7.4 |
| C3-2 | 9.6 | 11.2 | 10.3 | 101.5 | 4.8 | 3 | 70 | 83.3 | 70 | 210.4 | 6 | 194 | 4 | 7.4 |
| G3-1 | 11.2 | 9.2 | 11.3 | 97.4 | 3.4 | 5 | 66 | 80 | 71 | 208.5 | 9 | 183 | 2.6 | 7.2 |
| F5-28 | 5.6 | 6.8 | 7 | 65 | 2.4 | 1 | 42 | 53.3 | 78 | 165.7 | 6 | 124 | 2.2 | 7.2 |
| G6-38 | 12 | 8.3 | 8.5 | 91.4 | 3.8 | 2.5 | 64 | 75 | 72 | 198.4 | 3 | 188 | 4.4 | 7.9 |
| D5-4 | 16 | 17.5 | 11.8 | 152.3 | 4.8 | 5.5 | 112 | 125 | 72 | 279.8 | 6 | 326 | 4.4 | 7.4 |
| D4-2 | 14.4 | 20.4 | 29.7 | 209.1 | 5.8 | 5 | 120 | 171.6 | 68 | 352.4 | 10 | 426 | 0 | 7.5 |
| D4-17 | 42.4 | 37.4 | 56.8 | 436.5 | 4.3 | 15 | 260 | 358.2 | 68 | 660.4 | 10 | 732 | 2.2 | 7.9 |
| E4-9 | 46.4 | 32.6 | 26.6 | 314.7 | 7.2 | 30 | 250 | 258.2 | 72 | 529.4 | 20 | 675 | 22 | 7.4 |
| G3-10 | 12 | 4.9 | 14.6 | 91.4 | 3.8 | 2 | 50 | 75 | 80 | 208.6 | 5 | 159 | 0 | 7.4 |
| G2-18 | 12 | 9.7 | 15.5 | 111.7 | 4.8 | 5 | 70 | 91.6 | 75 | 233.6 | 5 | 220 | 5.2 | 7.3 |
| F4-8 | 8 | 4.9 | 12.2 | 69 | 4.8 | 3.5 | 40 | 56.6 | 68 | 170.4 | 4.5 | 136 | 4.9 | 6.8 |
| F2-4 | 130.4 | 31.1 | 69.3 | 686.1 | 22.8 | 13 | 454 | 563.1 | 90 | 1042.7 | 202 | 1094 | 11.5 | 6.5 |
| E7-9 | 60.8 | 58.8 | 113.3 | 680.1 | 34 | 33.5 | 394 | 558.1 | 88 | 1068.4 | 84 | 1168 | 0 | 7.2 |
| C5-12 | 33.6 | 24.3 | 29.6 | 239.5 | 41 | 6.5 | 184 | 196.6 | 73 | 447.5 | 24 | 499 | 14.5 | 7.1 |
| D7-1 | 23.2 | 29.2 | 26 | 221.3 | 42.8 | 6 | 178 | 181.6 | 79 | 427.4 | 10.1 | 523 | 22.8 | 7.2 |
| D6-12 | 22.4 | 30.1 | 68.8 | 332.9 | 25.3 | 21.5 | 180 | 273.2 | 74 | 575.1 | 4 | 622 | 6.1 | 7.6 |
| F7-63 | 16.8 | 11.2 | 12.1 | 115.7 | 7.2 | 8.5 | 88 | 95 | 71 | 242.5 | 5 | 274 | 11 | 7.4 |
| D7-2 | 5.6 | 4.9 | 9.4 | 54.8 | 5.8 | 2.5 | 34 | 45 | 73 | 156 | 3 | 139 | 7 | 7.5 |

Tabla A.1 Análisis fisico-químicos Valle de Puebla año 1997

| Pozo Ident. | Calcio mg/l | Magnesio Mg mg/l | Sodio Na mg/l | Bicarbonatos HCO3 mg/l | Sulfatos mg/l | Cloruros mg/l | Dureza Total CaCO3 mg/l | Alcalinidad total mg/l | Silice mg/l | S.T.D. mg/l | Bióxido de Carbono CO2 mg/l | Conductividad Eléctrica momhs/cm | Nitratos NO3 mg/l | pH |
|-------------|-------------|------------------|---------------|------------------------|---------------|---------------|-------------------------|------------------------|-------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------|-----|
| D5-13 | 16 | 16 | 15.4 | 144.1 | 8.2 | 9 | 106 | 118.3 | 73 | 281.7 | 19 | 340 | 18.5 | 7 |
| D3-20 | 105.6 | 31.1 | 75.7 | 385.7 | 175.8 | 40.5 | 392 | 316.5 | 75 | 889.4 | 13.5 | 1049 | 6.6 | 7.5 |
| G2 | 24.8 | 14.1 | 35.6 | 227.4 | 5.8 | 3.5 | 120 | 186.5 | 78 | 389.2 | 72 | 382 | 2.6 | 6.6 |
| H2-8 | 20.8 | 12.2 | 38.3 | 203 | 10.6 | 5.5 | 102 | 166.6 | 72 | 362.3 | 3 | 346 | 5.7 | 7.1 |
| F3-6 | 11.2 | 7.3 | 9.5 | 77.1 | 6.7 | 6 | 58 | 63.3 | 73 | 190.8 | 14.2 | 172 | 7 | 6.9 |
| E3-16 | 28 | 15.6 | 35.3 | 237.5 | 10.6 | 3.5 | 134 | 194.9 | 71 | 401.4 | 2.3 | 383 | 3.5 | 7.5 |
| B3-1 | 5.6 | 5.8 | 13.5 | 71.1 | 5.3 | 2.5 | 38 | 58.3 | 53 | 156.8 | 4 | 129 | 1.8 | 7.3 |
| C5-4 | 12 | 10.7 | 19.4 | 127.9 | 6.7 | 3 | 74 | 105 | 70 | 249.6 | 4.5 | 246 | 4.4 | 7.1 |
| F6-13 | 28 | 9.2 | 14.7 | 154.3 | 8.2 | 3.5 | 108 | 126.6 | 65 | 282.9 | 2 | 262 | 2.2 | 7.5 |
| F3-21 | 10.4 | 5.3 | 14.5 | 75.1 | 7.7 | 7 | 48 | 61.6 | 74 | 194 | 7 | 154 | 5.8 | 6.9 |
| G5-2 | 6.4 | 3.9 | 14.7 | 65 | 6.2 | 3 | 32 | 53.3 | 70 | 169.1 | 5 | 108 | 3 | 7.1 |
| E3-6 | 139.2 | 35.5 | 43.9 | 499.4 | 61.2 | 82.5 | 494 | 409.8 | 60 | 921.7 | 9 | 1231 | 33.5 | 7.6 |
| D3-1 | 44 | 24.3 | 57.3 | 375.6 | 8.6 | 12.5 | 210 | 308.2 | 75 | 597.2 | 49 | 647 | 5.7 | 6.9 |
| C3-13 | 13.6 | 8.7 | 12.1 | 101.5 | 5.8 | 5 | 70 | 83.3 | 65 | 211.8 | 4 | 222 | 9.6 | 6.8 |
| D6-4 | 13.6 | 11.2 | 25.3 | 131.9 | 22 | 3 | 80 | 108 | 60 | 267 | 5 | 228 | 2.2 | 7.3 |
| D6-6 | 20 | 21.4 | 36.3 | 219.2 | 19 | 12.5 | 138 | 180 | 70 | 398.4 | 2.8 | 434 | 7.5 | 7.5 |
| F4-45 | 8 | 5.4 | 13.7 | 75.1 | 4.3 | 4 | 42 | 61.6 | 68 | 178.5 | 3 | 152 | 2.2 | 7.7 |
| F6-2 | 428.8 | 88.5 | 15.6 | 1177.4 | 348.9 | 100 | 1436 | 966.3 | 55 | 2214.1 | 549 | 2980 | 0 | 6.3 |
| E4-11 | 14.4 | 11.2 | 9.6 | 113.7 | 3.8 | 4 | 82 | 93.3 | 71 | 227.7 | 8 | 249 | 7.5 | 7.5 |
| F4-47 | 12.8 | 4.9 | 17.3 | 101.5 | 1.4 | 3.5 | 52 | 83.3 | 67 | 208.4 | 6 | 169 | 2.2 | 6.9 |
| F4-10 | 12 | 6.8 | 15.6 | 105.6 | 1 | 3 | 58 | 86.6 | 68 | 211.9 | 6.3 | 179 | 0.4 | 7.2 |
| E4-8 | 36.8 | 27.7 | 42.1 | 318.7 | 8.4 | 19.5 | 206 | 261.6 | 71 | 524.2 | 3.5 | 642 | 23.3 | 7.6 |
| F4-50 | 15.2 | 10.6 | 4 | 91.4 | 2.9 | 9 | 82 | 75 | 75 | 208.1 | 6.8 | 257 | 18.9 | 7 |
| F4-11 | 16.8 | 8.8 | 10.6 | 103.5 | 1.9 | 10 | 78 | 85 | 75 | 226.6 | 5.2 | 257 | 15 | 7.1 |
| F4-14 | 13.6 | 8.8 | 7.8 | 93.4 | 1.9 | 6 | 70 | 76.6 | 70 | 201.5 | 8.1 | 221 | 15 | 7 |
| F5-29 | 11.2 | 7.8 | 8.5 | 85.3 | 2.9 | 4 | 60 | 70 | 69 | 188.7 | 8 | 169 | 7.5 | 7.1 |
| F5-27 | 36.8 | 10.2 | 33.4 | 235.5 | 2.9 | 7.5 | 134 | 193.3 | 75 | 401.3 | 4 | 465 | 3.5 | 7.7 |
| E5-35 | 28 | 22.8 | 20.6 | 239.5 | 2.4 | 7 | 164 | 196.6 | 73 | 393.4 | 9 | 496 | 12.8 | 7.7 |
| E5-34 | 21.6 | 18 | 9.7 | 168.5 | 5.8 | 3.5 | 128 | 138.3 | 75 | 302 | 16 | 402 | 14.1 | 7.4 |
| E5-30 | 15.2 | 11.7 | 3.8 | 107.6 | 2.4 | 2.5 | 86 | 88.3 | 75 | 218.2 | 6 | 267 | 10.6 | 7.5 |
| E4-24 | 32 | 24.3 | 66 | 373.5 | 4.3 | 9 | 180 | 306.5 | 72 | 581.1 | 3 | 607 | 0 | 7.9 |
| E4-12 | 16.8 | 11.7 | 7.6 | 105.6 | 2.9 | 12 | 90 | 86.6 | 75 | 231.5 | 9 | 271 | 16.7 | 7.3 |
| E4-10 | 22.4 | 13.1 | 36.1 | 219.2 | 2.9 | 4 | 110 | 179.9 | 74 | 371.7 | 0.1 | 372 | 6.6 | 8.1 |
| E4-6 | 27.2 | 13.1 | 57.8 | 284.2 | 1.9 | 9 | 122 | 233.2 | 71 | 464.3 | 19.5 | 452 | 0.9 | 7.5 |

Tabla A.1 Análisis físico-químicos Valle de Puebla año 1997

| Pozo Ident. | Calcio | Magnesio | Sodio | | Bicarbonatos | Sulfatos | Cloruros | Dureza Total CaCO3 | Alcalinidad total | Silice | S.T.D. | Bióxido de Carbono CO2 | Conductividad Eléctrica | Nitratos NO3 | pH |
|-------------|--------|----------|---------|-----------|--------------|----------|----------|--------------------|-------------------|--------|--------|------------------------|-------------------------|--------------|----|
| | mg/l | Mg mg/l | Na mg/l | HCO3 mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | momhs/cm | mg/l | |
| E4-5 | 18.4 | 18.5 | 33.6 | 227.4 | 3.5 | 3.5 | 122 | 186.6 | 71 | 375.8 | 0.8 | 377 | 0.9 | 8 | |
| D5-20 | 8 | 14.1 | 17.8 | 132 | 3.5 | 3.5 | 78 | 108.3 | 59 | 237.9 | 1.6 | 240 | 5.3 | 8.1 | |
| D5-6 | 13.6 | 17.5 | 29.4 | 192.9 | 1.9 | 7 | 106 | 158.3 | 70 | 332.3 | 0.5 | 345 | 6.2 | 8.2 | |
| D6-56 | 35.2 | 36 | 1.6 | 207.1 | 52 | 11 | 236 | 169.9 | 84 | 426.8 | 54 | 638 | 52.8 | 6.7 | |
| C7-8 | 6.4 | 4.4 | 31.5 | 97.4 | 14.9 | 5 | 34 | 80 | 58 | 217.6 | 6 | 211 | 1.7 | 7.2 | |
| C6-1 | 10.4 | 13.6 | 20.2 | 138 | 8.2 | 3 | 82 | 113.3 | 60 | 253.5 | 7 | 242 | 2.2 | 7.6 | |
| F5-36 | 51.2 | 16.5 | 58.7 | 314.7 | 37.4 | 19 | 196 | 258.2 | 73 | 570.5 | 6 | 655 | 1.3 | 7.6 | |
| F5-38 | 17.6 | 9.2 | 15 | 0 | 3.4 | 4.5 | 82 | 105 | 74 | 251.6 | 2 | 250 | 6.6 | 7.9 | |
| A.A. | 304 | 85.5 | 274.2 | 982.5 | 754 | 83 | 1112 | 806.3 | 70 | 2553.3 | 310 | 2460 | 0.9 | 6.7 | |

A.A. Manantial Agua Azul

Tabla A.2 Sólidos totales disueltos ciudad de Puebla 1990

| POZO | STD |
|-------------------|------|
| | mg/l |
| LAGSANBALTAZ | 1708 |
| BARRAHONDA2 | 252 |
| BARRAHONDA6 | 414 |
| BARRAHONDA8 | 234 |
| C.TULCINGO1 | 199 |
| MORATILLA5 | 756 |
| CEDA5 | 297 |
| RECCHOLULA3 | 1246 |
| RECCHOLULA5 | 1791 |
| ATLIXCAYOT9 | 1353 |
| ATLIXCAYOT8 | 1556 |
| ATLIXCAYOTL7 | 1971 |
| ATLIXCAYOTL6 | 1815 |
| ATLIXCAYOTL5 | 1321 |
| CRISTO | 399 |
| ESTADIO | 425 |
| MALINTZI 1 | 218 |
| OASIS | 342 |
| MEXIC 68 | 212 |
| RIVERA ANAYA | 199 |
| STA. ROSA | 244 |
| SEMINARIO | 246 |
| JOAQUIN COLOMBRES | 225 |
| MARGARITA | 630 |
| SAN RAFAEL 2 | 266 |
| SAN RAFAEL 1 | 204 |
| SAN SEBASTIAN | 181 |
| CONSTANCIA | 855 |
| MORATILLA | 756 |
| DESARENADOR | 320 |
| AUTOPISTA | 425 |
| IGNACIO ZARAGOZA | 427 |
| PUENTE NEGRO | 314 |
| CEDAS | 311 |
| DORADO | 1738 |
| XILOTZINGO | 876 |
| PARQUE JUAREZ | 1034 |
| ISSSTEP | 1029 |
| PLAZA AMERICA | 1678 |
| ANGEL | 365 |
| ECOLOGICO | 232 |
| PRADOS AGUAZUL | 1801 |
| HEROES DE PUEBLA | 266 |
| ANZURES | 3398 |
| REFORMA SUR | 1099 |
| CNIC | 2294 |

Tabla A.3 Análisis físico-químicos ciudad de Puebla año 2000

| Pozo | pH | STD mg/l | CO3 mg/l | Dureza Total mg/l | Calcio mg/l | Magnesio mg/l | SO4 mg/l | Cloruro mg/l | Conductividad momhs/cm |
|-------------------|------|-------------|-------------|----------------------|----------------|------------------|-------------|-----------------|---------------------------|
| San Rafael 1 | 8.08 | 212.7 | 127.9 | 96 | 24.8 | 8.3 | 9.6 | 2 | 245 |
| San Rafael 2 | 8.17 | 295.7 | 158.3 | 120 | 37.6 | 6.3 | 7.2 | 5 | 317 |
| Rivera Anaya 2 | 8.33 | 211.5 | 105.6 | 88 | 25.6 | 5.8 | 9.6 | 2 | 255 |
| Rivera Anaya 3 | 8.35 | 205.5 | 107.6 | 82 | 21.6 | 6.8 | 9.6 | 2 | 228 |
| México 68 | 7.63 | 234 | 148.2 | 110 | 32.8 | 6.8 | 8.6 | 5 | 266 |
| 10 de mayo | 7.75 | 325.4 | 196.9 | 180 | 52.8 | 11.7 | 15.4 | 9 | 435 |
| Joaquin Colombres | 8.29 | 247.8 | 134 | 86 | 25.6 | 5.3 | 12 | 2.5 | 262 |
| Seminario | 8.26 | 272.6 | 129.9 | 16 | 32 | 6.3 | 28.8 | 4 | 298 |
| Sta. Rosa | 7.92 | 284.1 | 158.3 | 104 | 32.8 | 5.3 | 9.6 | 13 | 314 |
| Cristo | 7.83 | 443.2 | 162.4 | 200 | 56 | 14.5 | 110 | 5 | 457 |
| San Sebastián 2 | 8.03 | 201.3 | 87.3 | 70 | 16 | 7.3 | 9.6 | 3.5 | 201 |
| San Sebastián 3 | 8.24 | 233 | 113.7 | 76 | 20 | 6.3 | 8.6 | 1.5 | 215 |
| San Antonio Abad | 8.26 | 241.7 | 131.9 | 92 | 26.4 | 6.3 | 7.2 | 2.5 | 216 |
| Carretas | 7.04 | 1220.8 | 842.5 | 520 | 116.8 | 55.4 | 16.8 | 26 | 1470 |
| Constancia | 6.9 | 954.2 | 430.4 | 496 | 140.8 | 35 | 216 | 39 | 1039 |
| Carcaña 1 | 7.18 | 1595.3 | 1116.5 | 620 | 131.2 | 70.9 | 33.6 | 25 | 1840 |
| Carcaña 2 | 6.56 | 1310.8 | 885.1 | 554 | 124 | 59.3 | 33.6 | 20.5 | 1543 |
| Carcaña 3 | 7.12 | 1929.4 | 1416.9 | 992 | 173.6 | 135.6 | 16.8 | 30.5 | 2130 |
| Carcaña 4 | 6.92 | 1714.9 | 1268.7 | 902 | 156 | 124.4 | 12 | 33 | 1900 |
| Carcaña 5 | 7.13 | 1518.2 | 1086 | 690 | 144.8 | 79.7 | 15.8 | 25.5 | 1778 |
| Recta 1 | 7.21 | 1399.6 | 939.9 | 644 | 112.8 | 88 | 80 | 25.5 | 1514 |
| Recta 3 | 6.48 | 2005.7 | 978.5 | 1014 | 224.8 | 109.8 | 450 | 51 | 2120 |
| Recta 4 | 7.28 | 2051.4 | 1151 | 894 | 188 | 103 | 300 | 38 | 2040 |
| Recta 6 | 7.23 | 1880.6 | 1102.3 | 866 | 170.4 | 106.9 | 240 | 35.5 | 1920 |
| CNIC | 6.39 | 2577.3 | 1177.4 | 1300 | 320 | 121.5 | 600 | 100 | 2590 |
| San miguel 2 | 7.61 | 566.9 | 294.3 | 260 | 70.4 | 20.4 | 48 | 30 | 750 |
| San miguel 1 | 7.35 | 1285.7 | 548.1 | 670 | 180 | 53.4 | 312 | 45 | 1467 |
| Apetlachica 7 | 7.53 | 1166.6 | 456.7 | 660 | 188 | 46.1 | 320 | 45 | 1501 |
| Apetlachica 6 | 7.66 | 516.1 | 308.5 | 270 | 76 | 19.4 | 14.4 | 17.5 | 663 |
| Moratilla 5 | 7.65 | 499.7 | 280.1 | 184 | 46.4 | 16.5 | 28.8 | 14 | 607 |
| Moratilla 4 | 7.51 | 588.8 | 324.8 | 270 | 68 | 24.3 | 43.2 | 24 | 781 |
| Moratilla 3 | 7.64 | 581.3 | 324.8 | 260 | 68 | 21.8 | 38.4 | 22.5 | 782 |
| moratilla 2 | 7.22 | 1457.7 | 507.5 | 830 | 240 | 55.8 | 432 | 82.5 | 1661 |
| Moratilla 1 | 7.21 | 835.5 | 341 | 450 | 116 | 38.8 | 192 | 45 | 994 |

Tabla A.3 Análisis fisico-químicos ciudad de Puebla año 2000

| | pH | STD mg/l | CO3 mg/l | Dureza Total mg/l | Calcio mg/l | Magnesio mg/l | SO4 mg/l | Cloruro mg/l | Conductividad momhs/cm |
|---------------------|------|-------------|-------------|----------------------|----------------|------------------|-------------|-----------------|---------------------------|
| Desarenador | 7.94 | 357.2 | 205 | 160 | 44 | 12.1 | 9.6 | 5 | 407 |
| Autopista | 7.5 | 477.7 | 223.3 | 200 | 49.6 | 18.4 | 60 | 21.5 | 540 |
| Tlaltepango | 7.66 | 382.2 | 203 | 180 | 49.6 | 13.6 | 28.8 | 6 | 416 |
| Zaragoza | 7.61 | 471.3 | 288.3 | 264 | 73.6 | 19.4 | 21.6 | 9.5 | 559 |
| Puente Negro | 7.97 | 345.6 | 203 | 150 | 40 | 12.1 | 7.2 | 7.5 | 346 |
| Colon 4 | 8.24 | 213.3 | 129.9 | 90 | 24 | 7.3 | 8.2 | 1.5 | 231 |
| Colon 3 | 8.25 | 228.5 | 119.8 | 76 | 19.2 | 6.8 | 9.6 | 2 | 217 |
| Xonacatepec 4 | 8.14 | 212.7 | 115.7 | 80 | 23.2 | 5.3 | 9.6 | 1.5 | 218 |
| Xonacatepec 3 | 8.21 | 207.8 | 105.6 | 76 | 20 | 6.3 | 8.6 | 2 | 203 |
| Malintzi 2 | 8.26 | 244.4 | 123.8 | 88 | 24.8 | 6.3 | 9.6 | 2.5 | 227 |
| Malintzi 1 | 7.97 | 258.1 | 136 | 94 | 28.8 | 5.3 | 9.6 | 3.5 | 294 |
| Cedas 5 | 7.73 | 721 | 209 | 346 | 96 | 25.7 | 220.8 | 45 | 832 |
| Cedas 4 | 7.58 | 333.4 | 176.6 | 160 | 44 | 21.1 | 20 | 5 | 364 |
| Cedas 3 | 7.97 | 232.9 | 119.7 | 94 | 23.2 | 8.7 | 6.6 | 4 | 242 |
| Cedas 2 | 7.78 | 211.6 | 91.3 | 80 | 15.2 | 10.2 | 9.6 | 8 | 226 |
| Cedas 1 | 7.93 | 194.3 | 81.2 | 66 | 20 | 3.8 | 7.2 | 5 | 190 |
| Sn. Crist. Tulcingo | 7.93 | 220.9 | 121.8 | 96 | 28.8 | 5.8 | 8.6 | 6 | 258 |
| Barranca Honda 4 | 7.38 | 273.4 | 148.2 | 132 | 40 | 7.8 | 16.8 | 7.5 | 340 |
| Barranca honda 3 | 7.9 | 465.4 | 294.3 | 206 | 52.8 | 18 | 9.6 | 18 | 642 |
| Barranca Honda 2 | 7.52 | 258.5 | 136 | 100 | 28 | 7.3 | 8.6 | 5.5 | 283 |
| Barranca Honda 1 | 7.5 | 222.6 | 111.6 | 80 | 18.4 | 8.3 | 9.6 | 3 | 225 |
| Oasis | 7.55 | 384.4 | 209 | 160 | 46.4 | 10.6 | 26.4 | 2.5 | 396 |
| Tlaltepango 2 | 7.95 | 240 | 121.8 | 100 | 26.4 | 8.2 | 4.8 | 4 | 230 |
| Castillotla | 6.55 | 1401.2 | 852.6 | 560 | 140 | 51 | 90 | 55 | 1360 |
| S. Miguel Mayorazgo | 7.07 | 710.1 | 462.8 | 314 | 79.2 | 28.2 | 32 | 10.5 | 816 |
| Insurgentes | 7.48 | 273.9 | 152.2 | 124 | 36 | 8.3 | 8.6 | 5.5 | 323 |
| Coatepec | 6.64 | 1531 | 933.8 | 630 | 166.4 | 52 | 130 | 33 | 1538 |
| San Baltazar 1 | 7.71 | 769 | 406 | 360 | 116 | 17 | 100 | 15 | 858 |
| Guadalupe hidalgo | 6.83 | 842.7 | 560.3 | 402 | 114.4 | 28.2 | 14.4 | 13.5 | 1030 |
| Guadalupe hidalgo | 7.07 | 777.7 | 519.7 | 382 | 101.6 | 31.1 | 24 | 21 | 953 |
| Dorado | 6.68 | 1930.9 | 913.5 | 1150 | 320 | 85 | 400 | 70 | 2120 |
| Gabriel Pastor | 6.91 | 1321 | 609 | 720 | 208 | 48.6 | 260 | 50 | 1643 |
| Ecológico 1 | 7.76 | 245.8 | 144.1 | 112 | 32 | 7.8 | 9.6 | 6 | 265 |
| Anzures | 6.2 | 3796.9 | 1339.8 | 2200 | 600 | 170.1 | 1300 | 134 | 3800 |

Tabla A.3 Análisis físico-químicos ciudad de Puebla año 2000

| Pozo | pH | STD mg/l | CO3 mg/l | Dureza Total mg/l | Calcio mg/l | Magnesio mg/l | SO4 mg/l | Cloruro mg/l | Conductividad momhs/cm |
|---------------------|------|-------------|-------------|----------------------|----------------|------------------|-------------|-----------------|---------------------------|
| Atlixcayotl 8 | 7.39 | 1503.4 | 940 | 600 | 123.2 | 71 | 80 | 56 | 1696 |
| Atlixcayotl 6 | 6.96 | 1738.1 | 1116.5 | 776 | 160.8 | 90.9 | 110 | 56.5 | 1900 |
| Atlixcayotl 5 | 6.71 | 2177.3 | 1467.7 | 1012 | 204 | 122 | 130 | 50.5 | 2380 |
| Atlixcayotl 4 | 6.96 | 2027.4 | 1287 | 880 | 180 | 104.5 | 130 | 68.5 | 2170 |
| Guadalupe hidalgo | 6.83 | 899.3 | 558.2 | 384 | 104 | 30.1 | 70 | 15 | 905 |
| Atlixcayotl 9 | 7.19 | 966.2 | 619.1 | 412 | 65.6 | 60.3 | 47 | 35 | 1092 |
| Atlixcayotl 3 | 6.57 | 1467.9 | 939.9 | 628 | 131.2 | 72.9 | 85 | 38 | 1621 |
| Atlixcayotl 2 | 7.38 | 1972 | 1260.6 | 840 | 182.4 | 93.3 | 130 | 51 | 2100 |
| Sn. Baltazar 4 | 6.78 | 958.3 | 537.9 | 406 | 132 | 18.4 | 80 | 40 | 1025 |
| Xilotzingo | 7.24 | 973.5 | 548.1 | 520 | 160 | 29.1 | 90 | 40 | 1128 |
| Tuxpan 1 | 6.93 | 1567.6 | 783.6 | 840 | 256 | 48.6 | 288 | 45 | 1728 |
| Mirador 1 | 7.48 | 426.4 | 205 | 216 | 64.8 | 13.1 | 57.6 | 24.5 | 551 |
| Mirador 2 | 7.68 | 278.2 | 152.2 | 132 | 37.6 | 9.2 | 19.2 | 8.5 | 335 |
| Parque Juárez | 6.93 | 1142.2 | 548.1 | 660 | 200 | 308.8 | 200 | 52.5 | 1325 |
| Cri Cri | 7.51 | 286.5 | 152.2 | 128 | 39.2 | 7.3 | 12 | 10 | 366 |
| ISSSTEP | 6.92 | 1149.7 | 548.1 | 600 | 184 | 34 | 220 | 35 | 1270 |
| Laguna San Baltazar | 6.89 | 1908.5 | 1075.9 | 900 | 180 | 109.3 | 260 | 59 | 1930 |
| Angel 2 | 8.05 | 410 | 182.7 | 180 | 56 | 9.7 | 55 | 15 | 463 |
| Plaza América | 7.04 | 1885 | 842.4 | 1030 | 280 | 80.1 | 450 | 62.5 | 2030 |
| Margaritas 1 | 6.98 | 912.2 | 609 | 480 | 176 | 9.7 | 9.6 | 33 | 1063 |
| Margaritas 11 | 7.11 | 917.8 | 613 | 480 | 176 | 9.7 | 9.6 | 33 | 1062 |
| Capilla | 7.3 | 827.4 | 507.5 | 380 | 117.6 | 20.8 | 50 | 25 | 886 |
| Tres cerritos | 7.4 | 563.7 | 345.1 | 230 | 56 | 21.8 | 4.8 | 30 | 615 |
| Ecológico 2 | 7.8 | 255.4 | 142.1 | 120 | 34.4 | 8.3 | 13.4 | 7.5 | 303 |
| San Manuel | 6.6 | 961.5 | 489.2 | 534 | 155.2 | 35.5 | 170 | 25 | 1102 |
| Unidad Guadalupe | 7.45 | 526.9 | 284.2 | 260 | 76 | 17 | 85 | 10 | 593 |
| Prados Agua azul | 6.81 | 1979.1 | 872.9 | 1200 | 320 | 97.2 | 475 | 72.5 | 2030 |
| Bella Vista | 7.65 | 253.9 | 150.2 | 124 | 38.4 | 6.8 | 6.2 | 9 | 303 |
| Heroes de Puebla | 7.65 | 290.8 | 164.4 | 138 | 42.4 | 7.8 | 11.5 | 12.5 | 351 |

Tabla A.4 Análisis fisico-químicos ciudad de Puebla año 2002

| Pozo identificación | PH | STD mg/l | CO ₃ mg/l | Dureza total mg/l | Durez Ca mg/l | Dureza Mg mg/l | Sulfato SO4 mg/l | Cloruro mg/l | Conductividad momhs/cm |
|----------------------------|------|-------------|-------------------------|----------------------|------------------|-------------------|---------------------|-----------------|---------------------------|
| Sn. Lorenzo Almezcilla | 7.53 | 876 | - | 421.95 | - | - | 320.1 | - | 1238 |
| Ampliación Alamos | 5.42 | 2260 | 220.21 | 436.9 | 38.83 | 398.07 | 6.02 | 155.27 | 4430 |
| Momoxpan 4 | 6.39 | 851 | 1080.37 | 796.13 | 339.81 | 456.32 | 42.3 | 27.81 | 1715 |
| 10 de Mayo | 7.69 | 296 | 187.88 | 171.85 | 130.1 | 41.75 | 41.1 | 7.12 | 411 |
| Infonavit Amalucan | 8.04 | 182 | 133.59 | 87.38 | 66.02 | 21.36 | 1.33 | 5.18 | 244 |
| B.S. Sebastian el Ranchito | 7.7 | 186 | 120.78 | 83.5 | 64.08 | 19.42 | N.D. | 6.47 | 232 |
| B. Sn. Sebastian # 2 | 7.4 | 168 | 119.56 | 89.32 | 52.43 | 36.89 | 1.2 | 3.88 | 209 |
| Analco | 7.22 | 870 | 507.52 | 619.43 | 489.33 | 180.1 | 211.02 | 40.63 | 1254 |
| Satelite | 8.2 | 212 | 125.66 | 119.42 | 82.53 | 36.89 | 15.66 | 9.32 | 305 |
| Clavijero | 8.27 | 278 | 152.5 | 143.69 | 93.21 | 50.48 | 9.4 | 28.98 | 423 |
| Santuario | 7.77 | 299 | 290.36 | 274.76 | 191.26 | 83.5 | 66.33 | 15 | 600 |
| Puente negro | 7.51 | 172 | 204.98 | 153.4 | 104.85 | 48.55 | 13.81 | 8.02 | 361 |
| Ignacio Zaragoza | 8.14 | 176 | 198.86 | 132.04 | 193.2 | 38.84 | 9.51 | 14.49 | 362 |
| Desarenador | 7.73 | 133 | 163.48 | 120.39 | 81.55 | 38.84 | N.D. | 5.69 | 279 |
| Papelera | 7.18 | 1228 | 1772.05 | 774.78 | 576.72 | 198.06 | 403.07 | 67.02 | 1772 |
| Parque ecológico 1 | 7.72 | 300 | 167.14 | 165.05 | 122.33 | 42.72 | 29.29 | 14.16 | 417 |
| Parque ecológico 2 | 7.71 | 246 | 158.6 | 130.1 | 97.09 | 33.01 | 4.59 | 12.64 | 360 |
| Parque ecológico 3 | 7.49 | 348 | 185.44 | 170.87 | 120.39 | 50.48 | 37.89 | 24.16 | 535 |
| Cristo | 7.88 | 354 | 153.11 | 206.8 | 159.22 | 47.58 | 46.2 | 10.25 | 514 |
| México 68 | 7.86 | 124 | 156.16 | 120.23 | 87 | 33.23 | N.D. | 610 | 267 |
| Unidad Guadalupe | 7.85 | 672 | 431.23 | 447.7 | 347.99 | 99.71 | 146.73 | 24.65 | 1712 |
| El Salvador | 7.7 | 166 | 112.07 | 80.16 | 50.83 | 29.33 | N.D. | 7.57 | 385 |
| Xonaca 2 | 7.69 | 626 | 411.74 | 414.46 | 334.31 | 80.15 | 182.83 | 24.42 | 1568 |
| Sn. Antonio Abad | 8.19 | 107.53 | 132.77 | 107.53 | 72.84 | 35.19 | N.D. | 4.89 | 227 |
| Manuel Rivera Anaya 2 | 8.23 | 192 | 123.02 | 106.53 | 72.34 | 72.34 | N.D. | 8.3 | 243 |
| Manuel Rivera Anaya 3 | 8.24 | 192 | 124.24 | 111.44 | 66.47 | 72.34 | N.D. | 4.15 | 225 |
| San Rafael 3 | 8.02 | 226 | 125.81 | 123.16 | 87.97 | 72.34 | 6.54 | 9.52 | 306 |
| San Rafael 2 | 7.71 | 118 | 141.31 | 99.7 | 74.29 | 72.34 | 0.39 | 6.35 | 262 |
| Gabriel Pastor | 7 | 1192 | 667.56 | 752.67 | 215.05 | 72.34 | 159 | 101.29 | 1796 |
| Pozo Amalucan | 8.26 | 198 | 120.58 | 97.75 | 66.47 | 72.34 | N.D. | 5.74 | 231 |
| Rementería | 6.31 | 140 | 167.14 | 125.1 | 93.84 | 31.26 | 7.97 | 5.61 | 280 |
| Sta. Rosa | 7.08 | 168 | 185.44 | 152.49 | 113.39 | 39.1 | 30.11 | 6.34 | 343 |
| Plazas Amalucan | 7.75 | 88.1 | 104.92 | 70.38 | 48.87 | 21.54 | 0.83 | 3.65 | 176.9 |

Tabla A.4 Análisis físico-químicos ciudad de Puebla año 2002

| Pozo identificación | PH | STD | CO ₃ | Dureza total | Dureza Ca | Dureza Mg | Sulfato SO4 | Cloruro | Conductividad |
|------------------------|------|------|-----------------|--------------|-----------|-----------|-------------|---------|---------------|
| | | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | momhs/cm |
| Xonaca 1 | 7.65 | 244 | 200.08 | 220.91 | 177.9 | 43.01 | 75.66 | 13.17 | 489 |
| Ampliación Alamos | 7.3 | 1000 | 124.44 | 879.75 | 752.68 | 127.07 | 810.56 | 7.57 | 1385 |
| Joaquin Colombres 1 | 7.34 | 194 | 133.59 | 103.62 | 74.29 | 29.33 | 0.08 | 574 | 218 |
| Joaquin Colombres 2 | 7.5 | 196 | 134.2 | 101.66 | 74.29 | 27.37 | 3.93 | 8.05 | 229 |
| Seminario | 7.13 | 190 | 129.32 | 111.44 | 89.83 | 21.51 | 29.91 | 7.32 | 263 |
| Antorchista | 6.95 | 950 | 957.7 | 735.56 | 387.66 | 347.9 | 138.73 | 69.56 | 1647 |
| Villa el Encanto | 7.04 | 1744 | 1058.35 | 1669.92 | 1048.67 | 621.25 | 703.81 | 84.2 | 4080 |
| Oriente 5 | 7.55 | 190 | 134.2 | 95.42 | 67.59 | 27.83 | N.D. | 5.08 | 202 |
| Heroes de Puebla | 7.33 | 410 | 292.8 | 282.3 | 210.73 | 71.57 | 30.64 | 30.44 | 585 |
| 11 de Enero | 8.01 | 168 | 107.36 | 82.52 | 52.68 | 29.83 | N.D. | 7.67 | 172.7 |
| Sn. Cristóbal Tulcingo | 7.84 | 252 | 157.38 | 155.06 | 101.39 | 53.57 | 23.19 | 18.18 | 328 |
| Tlaltepango | 7.53 | 162 | 122 | 97.41 | 63.62 | 33.79 | N.D. | 4.7 | 200 |
| Villa del Marquez | 7.63 | 172 | 107.97 | 89.46 | 61.63 | 29.83 | N.D. | 5.44 | 189.8 |
| Maravillas 3 | 7.35 | 366 | 276.94 | 242.54 | 174.94 | 67.6 | 47.26 | 10.39 | 491 |
| Maravillas 1 | 7.48 | 112 | 123.22 | 101.39 | 65.6 | 35.79 | N.D. | 4.94 | 201 |

Tabla A.5 Análisis físico químicos zona de agua sulfhídrica ciudad de Puebla año 1990

| Nombre pozo | Sulf. HS mg/l | Sulfatos SO4 | Cloruros Cl mg/l | Sodio Na mg/l | Potasio K mg/l | Boro B mg/l | Hierro Fe mg/l |
|----------------------------|---------------------|-----------------|------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| Manantial rancho colorado | 2.10 | 865.90 | 83.91 | 4.18 | 0.36 | 3.00 | 0.00 |
| Herramientas Stanley | 2.30 | 611.01 | 70.06 | 3.83 | 0.37 | 0.62 | 0.66 |
| Metaloides | 3.20 | 470.72 | 71.79 | 3.66 | 0.30 | 0.75 | 1.09 |
| Sn. Felipe Hueyotlipan # 3 | 0.00 | 167.42 | 32.87 | 1.40 | 0.20 | 0.23 | 0.09 |
| CAPU | 1.20 | 628.60 | 299.30 | 4.26 | 0.34 | 3.00 | 0.28 |
| Rancho Colorado Balneario | 1.80 | 871.76 | 91.47 | 4.00 | 0.37 | 3.00 | 0.00 |
| Industrias Conelec | 1.10 | 436.87 | 86.90 | 3.66 | 0.32 | 0.75 | 1.30 |
| El Cristo | 0.00 | 64.27 | 10.06 | 0.70 | 0.14 | 0.06 | 2.37 |
| Baños los Colorines | 0.00 | 128.53 | 46.65 | 1.40 | 0.20 | 0.26 | 0.00 |
| Pemex Planta Centro | 3.20 | 435.11 | 83.24 | 3.66 | 0.34 | 1.86 | 2.02 |
| Anzures | 0.00 | 582.60 | 60.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.51 |
| Centro escolar # 1 | 0.00 | 187.08 | 36.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| IMSS San Jose | 0.46 | 297.59 | 44.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.64 |
| Hotel del Alba | 2.37 | 58.52 | 51.90 | 0.00 | 0.00 | 1.80 | 2.85 |
| Fabrica la Economia | 1.90 | 826.02 | 84.70 | 0.00 | 0.00 | 2.49 | 3.33 |
| Manantial Agua Clara | 0.00 | 498.11 | 70.90 | 0.00 | 0.00 | 2.01 | 0.09 |
| Club Alpha # 1 | 0.00 | 362.99 | 93.40 | 0.00 | 0.00 | 1.65 | 0.00 |
| Balneario la Paz | 0.30 | 593.42 | 79.50 | 0.00 | 0.00 | 2.19 | 0.09 |
| Baños Paseo Bravo | 1.20 | 433.35 | 77.80 | 3.66 | 0.00 | 2.01 | 0.18 |
| Baños Guadalupe | 0.00 | 427.75 | 67.50 | 3.74 | 0.70 | 1.71 | 0.00 |
| Baños santiago | 1.30 | 257.44 | 55.30 | 3.31 | 0.60 | 1.47 | 0.09 |
| Panteón Francés | 0.00 | 165.66 | 39.70 | 2.35 | 0.62 | 1.00 | 0.00 |
| Club Alpha # 1 | 0.00 | 192.21 | 44.98 | 2.61 | 0.37 | 1.05 | 0.00 |
| Balneario Agua azul | 1.48 | 5457.68 | 76.12 | 3.83 | 0.32 | 1.95 | 0.00 |
| Club de Golf | 0.00 | 83.15 | 36.63 | 4.70 | 1.69 | 1.59 | 0.36 |
| Baños la providencia | 0.00 | 542.09 | 43.25 | 4.18 | 0.30 | 0.84 | 0.00 |
| Estrellas del Sur (CNIC) | 0.00 | 67.16 | 9.76 | 2.44 | 0.41 | 1.11 | 0.00 |
| Estrellas del sur | 0.00 | 64.09 | 9.76 | 3.48 | 0.46 | 2.25 | 0.00 |
| Romero Vargas # 5 | 0.00 | 216.83 | 44.98 | 3.83 | 0.46 | 1.00 | 0.00 |
| Hospital universitario | 0.00 | 313.42 | 49.01 | 3.13 | 0.44 | 0.97 | 0.44 |
| Química Sumex | 0.00 | 13.75 | 21.78 | 0.53 | 0.13 | 0.80 | 0.00 |

Tabla A.5 Análisis físico químicos zona de agua sulfúrica ciudad de Puebla año 1990

| Nombre pozo | Sulf. HS mg/l | Sulfatos S04 | Cloruros Cl mg/l | Sodio Na mg/l | Potasio K mg/l | Boro B mg/l | Hierro Fe mg/l |
|------------------------------|---------------------|-----------------|------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| Rastro Municipal | 0.00 | 40.69 | 34.49 | 0.53 | 0.14 | 0.04 | 0.00 |
| San Felipe hueyotlipan #4 | 0.00 | 493.72 | 64.43 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.06 |
| B. Luis alberto de la Fuente | 0.00 | 31.02 | 15.96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 |

Tabla A.6 Análisis físico-químicos zona sulfurosa ciudad d de Puebla año 1992

| Nombre pozo | T °C | PH | Calcio Ca mg/l | Sulfuros S2 mg/l | Oxígeno Disuelto mg/l | Cloruros | |
|----------------------------|------|-----|----------------------|------------------------|-----------------------------|----------|------|
| | | | | | | Cl | mg/l |
| Manantial Rancho colorado | 27 | 6.6 | 1110 | 6.14 | 0.6 | 98.81 | |
| Herramientas Stanley | 26 | 6.7 | 800 | 1.92 | 3.6 | 77.05 | |
| Metaloides | 28 | 6.7 | 825 | 6.91 | 4.6 | 78.96 | |
| Sn. Felipe Hueyotlipan # 3 | 21 | 5.9 | 230 | 0 | 0 | 33.46 | |
| CAPU | 29 | 6.6 | 1100 | 8.45 | 3.8 | 4.79 | |
| Balneario Rancho Colorado | 27 | 3 | 980 | 9.22 | 1.06 | 95.72 | |
| Industrias Conelec | 21 | 6.7 | 940 | 0 | 3.1 | 81.3 | |
| El Cristo | 20 | 8 | 170 | 0 | 7.97 | 12.44 | |
| Baños los Colorines | 19 | 7.2 | 210 | 0 | 4.27 | 45.94 | |
| Pernex Planta Centro | 27 | 6.4 | 940 | 3.46 | 2.7 | 82.54 | |
| Anzures | 21 | 6.6 | 980 | 0 | 2.3 | 89.97 | |
| Centro escolar # 1 | 19 | 7.1 | 4575 | 0 | 3.1 | 46.9 | |
| IMSS San Jose | 19 | 3 | 650 | 0.77 | 7 | 54.2 | |
| Hotel del Alba | 24 | 6.6 | 950 | 6.8 | 0 | 76.95 | |
| Fabrica la Economia | 19 | 4.2 | 150 | 0 | 8.7 | 32.54 | |
| Manantial Agua Clara | 24 | 7.5 | 255 | 0 | 0 | 34.99 | |
| Club Alpha # 1 | - | - | - | - | - | - | |
| Balneario la Paz | 28 | 6.4 | 1030 | 8.83 | 2.6 | - | |
| Baños Paseo Bravo | 26 | 6.7 | 915 | 1.15 | 0 | 84.26 | |
| Baños Guadalupe | 24 | 7.2 | 415 | 0 | 6.22 | 58.39 | |
| Baños santiago | 20 | 7.6 | 470 | 0 | 0 | 51.74 | |
| Panteón Francés | 22 | 7.4 | 435 | 0 | 6.22 | 68.99 | |
| Club Alpha # 1 | 21 | 7.6 | 382 | 0 | 0 | 48.29 | |
| Balneario Agua azul | 21 | 7.2 | 1010 | 9.22 | 2.13 | 84.750 | |
| Club de Golf | - | - | - | - | - | - | |
| Baños la providencia | 15 | 8.1 | 62 | 0 | 6.2 | 3.83 | |
| Estrellas del Sur (CNIC) | 21 | 6.7 | 755 | 0 | 1.95 | 62.21 | |
| Estrellas del sur | - | - | - | - | - | - | |
| Romero Vargas # 5 | 21 | 7.2 | 247.5 | 0 | 8.36 | 11.96 | |
| Hospital universitario | - | - | - | - | - | - | |

Tabla A.6 Análisis físico-químicos zona sulfurosa año 1992

| Nombre pozo | T °C | PH | Calcio Ca mg/l | Sulfuros S2 mg/l | Oxígeno | | Cloruros | |
|-----------------------------|------|-----|----------------------|------------------------|------------------|------------|----------|--|
| | | | | | Disuelto mg/l | Cl mg/l | | |
| Química Sumex | 20 | 7.6 | 77.5 | 0 | 6.36 | 94.76 | | |
| Rastro Municipal | 20 | 7.6 | 270 | 0 | N.A. | 111.66 | | |
| San Felipe Hueyotlilpan # 4 | 24 | 6.7 | 860 | 0 | N.A. | 70.38 | | |
| B.Luis alberto de la Fuente | 19 | 7.5 | 202.5 | 0 | 8.55 | 11.49 | | |
| Baños el fresno | 20 | 7 | 620 | 0 | 7.19 | 48.34 | | |

N.A. No analizado

Tabla A.7 Análisis físico-químicos zona sulfurosa ciudad c de Puebla año 1993

| Nombre pozo | T °C | PH | Calcio Ca mg/l | Sulfuros S2 mg/l | Oxígeno Disuelto mg/l | Cloruros | |
|----------------------------|-------|------|----------------------|------------------------|-----------------------------|----------|------|
| | | | | | | Cl | mg/l |
| Manantial Rancho colorado | 26.00 | 6.60 | 1104.00 | 2.40 | 0.60 | 96.19 | |
| Herramientas Stanley | 28.00 | 6.75 | 731.00 | 6.00 | 7.30 | 80.09 | |
| Metales | 28.00 | 6.85 | 749.00 | 6.80 | 0.70 | 89.92 | |
| Sn. Felipe Hueyotlipan # 3 | - | 7.00 | 173.00 | 0.00 | 5.35 | 33.95 | |
| CAPU | 29.00 | 6.60 | 1079.00 | 10.80 | 1.00 | 92.41 | |
| Balneario Rancho Colorado | 28.00 | 6.60 | 926.00 | 4.80 | 0.40 | 95.24 | |
| Industrias Conelec | - | - | - | - | - | - | |
| El Cristo | 25.00 | 7.95 | 155.00 | 0.00 | 7.80 | 8.92 | |
| Baños los Colorines | 28.00 | 7.10 | 244.00 | 0.00 | 3.20 | 51.79 | |
| Pemex Planta Centro | 25.00 | 6.70 | 914.00 | 9.60 | 0.00 | 89.34 | |
| Anzures | 22.00 | 6.90 | 1061.00 | 0.00 | 2.83 | 120.61 | |
| Centro escolar # 1 | 19.00 | 7.10 | 418.00 | 0.00 | 2.60 | 35.73 | |
| IMSS San Jose | 21.00 | 7.00 | 576.00 | 0.00 | 4.20 | 53.75 | |
| Hotel del Alba | 25.00 | 6.50 | 940.00 | 8.40 | 0.00 | 84.87 | |
| Fabrica la Economía | 20.00 | 7.35 | 239.00 | 0.00 | 1.00 | 33.00 | |
| Manantial Agua Clara | 19.00 | 6.70 | 731.00 | 0.00 | 1.50 | 80.41 | |
| Club Alpha # 1 | - | - | - | - | - | - | |
| Balneario la Paz | 28.00 | 6.50 | 974.00 | 11.60 | 0.00 | 93.81 | |
| Baños Paseo Bravo | 28.00 | 6.65 | 926.00 | 8.00 | 0.80 | 85.81 | |
| Baños Guadalupe | 19.00 | 7.20 | 418.00 | 0.00 | 2.75 | 58.07 | |
| Baños Santiago | 24.00 | 7.00 | 590.00 | 8.00 | 0.80 | 65.07 | |
| Panteón Francés | 21.00 | 7.60 | 427.00 | 0.00 | 4.88 | 71.67 | |
| Club Alpha # 2 | 20.00 | 7.40 | 383.00 | 0.00 | 3.80 | 75.94 | |
| Balneario Agua azul | 28.00 | 6.70 | 970.00 | 12.80 | 0.70 | 12.25 | |
| Club de Golf | - | - | - | - | - | - | |
| Baños la providencia | 18.00 | 7.70 | 127.00 | 0.00 | 5.35 | 33.04 | |
| Estrellas del Sur (CNIC) | 21.00 | 6.90 | 245.00 | 0.00 | 3.92 | 26.40 | |
| Estrellas de Sur | - | - | - | - | - | - | |
| Romero Vargas # 5 | - | 7.00 | 232.00 | 0.00 | 7.80 | 16.03 | |
| Hospital universitario | - | - | - | - | - | - | |

Tabla A.7 Análisis físico-químicos zona sulfurosa ciudad de Puebla 1993 Continuación...

| Nombre pozo | T °C | PH | Calcio Ca mg/l | Sulfuros S2 mg/l | Oxígeno Disuelto mg/l | Cloruros | |
|-----------------------------|-------|------|----------------------|------------------------|-----------------------------|----------|------|
| | | | | | | Cl | mg/l |
| Química Sumex | 21.00 | 6.00 | 75.00 | | 5.30 | 7.12 | |
| Rastro Municipal | 20.00 | 7.70 | 294.00 | | 6.24 | 147.41 | |
| San Felipe Hueyotlipan # 4 | - | 6.75 | 854.00 | | 5.85 | 87.87 | |
| B.Luis alberto de la Fuente | - | 7.75 | 165.00 | | 8.00 | 13.20 | |
| Baños el fresno | 19.00 | 7.00 | 592.00 | | 4.80 | 72.54 | |

| Tabla A.8 Coordenadas pozos referenciados en el trabajo | | | |
|---|-------------|-------------|---------------|
| POZO | Coordenadas | Coordenadas | Elevación (m) |
| SISTEMA ATLIXCAYOTL | E-W | N-S | |
| Atlixcayotl 1 | 580254 | 2103830 | 2131 |
| Atlixcayotl 2 | 576937 | 2101659 | 2126 |
| Atlixcayotl 3 | 576477 | 2101352 | 2129 |
| Atlixcayotl 4 | 576013 | 2101046 | 2125 |
| Atlixcayotl 5 | 577534 | 2102060 | 2115 |
| Carcaña 1 | 575825 | 2109378 | 2155 |
| Carcaña 2 | 575647 | 2109109 | 2151 |
| Carcaña 3 | 575276 | 2108831 | 2154 |
| Carcaña 4 | 574953 | 2108571 | 2158 |
| Carcaña 5 | 576399 | 2109342 | 2151 |
| Momoxpan 2 | 576438 | 2106863 | 2143 |
| Momoxpan 4 | 577567 | 2107976 | 2139 |
| Recta Cholula 1 | 578037 | 2108180 | 2146 |
| Pozo maravillas 2 | 588713 | 2108934 | 2236 |
| Loma Bella | 580492 | 2099731 | 2131 |

ANEXO B

CURVAS GENERADAS POR EL MODELO
COMPARADAS CON LAS SUPERFICIES
POTENCIOMÉTRICAS DE CAMPO

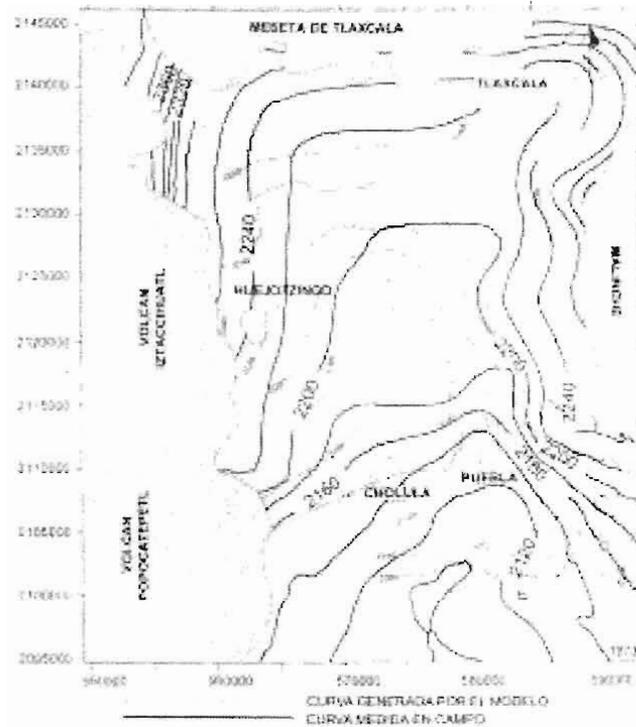


Figura 1. Líneas equipotenciométricas, año 1973

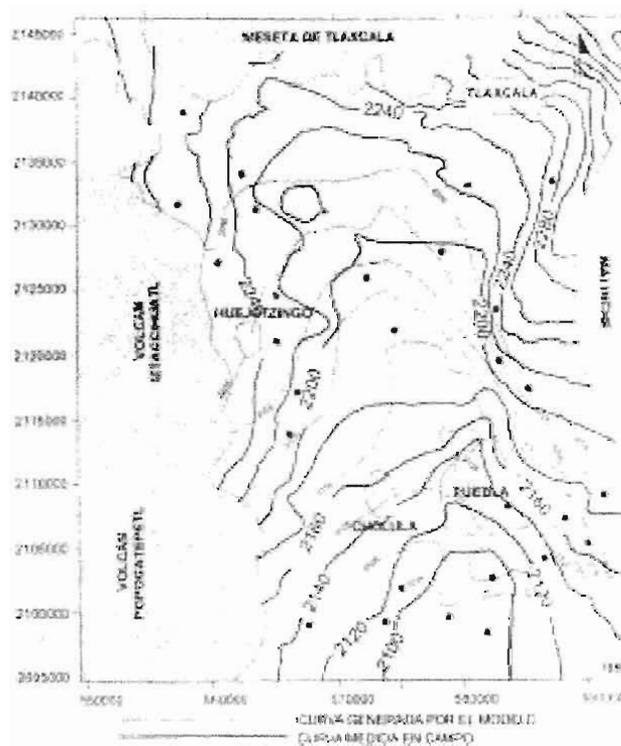


Figura 1. Líneas equipotenciométricas, año 1980

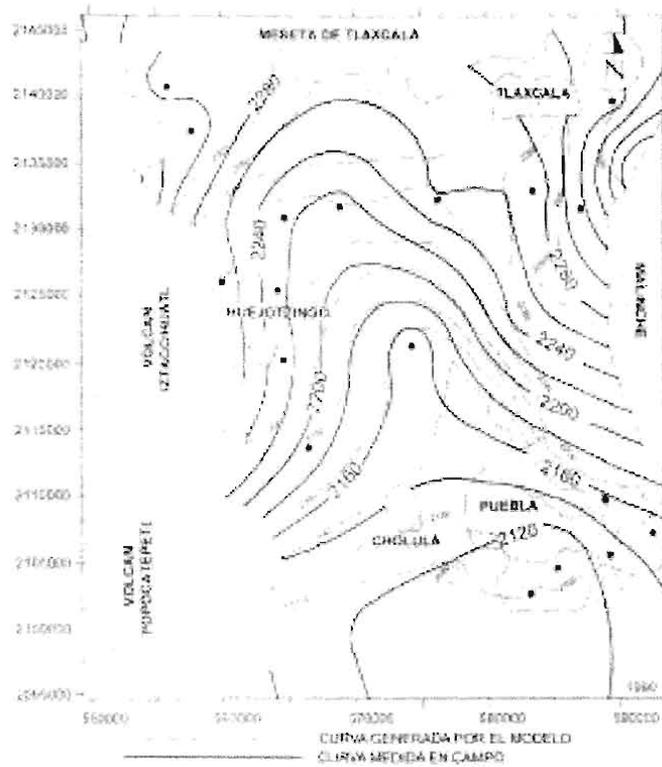


Figura 1. Líneas equipotenciométricas año 1990

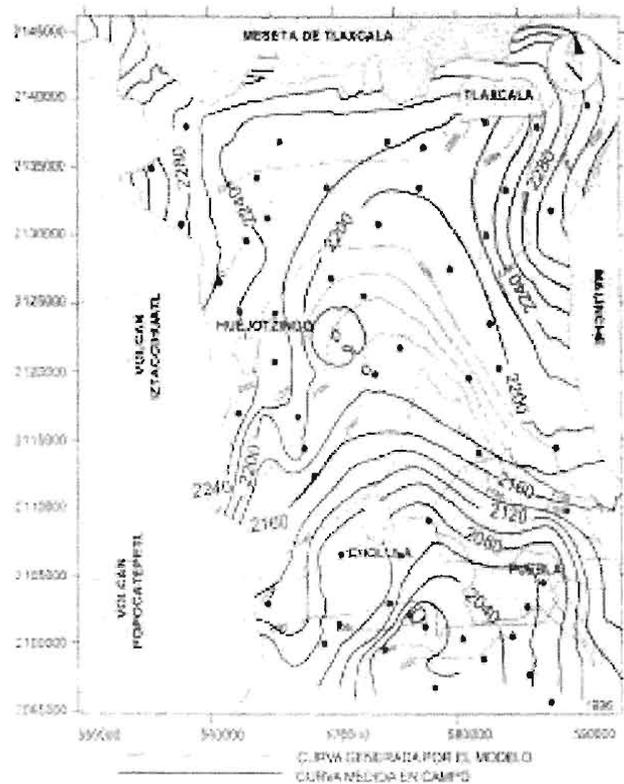


Figura 1. Líneas equipotenciométricas, año 1996

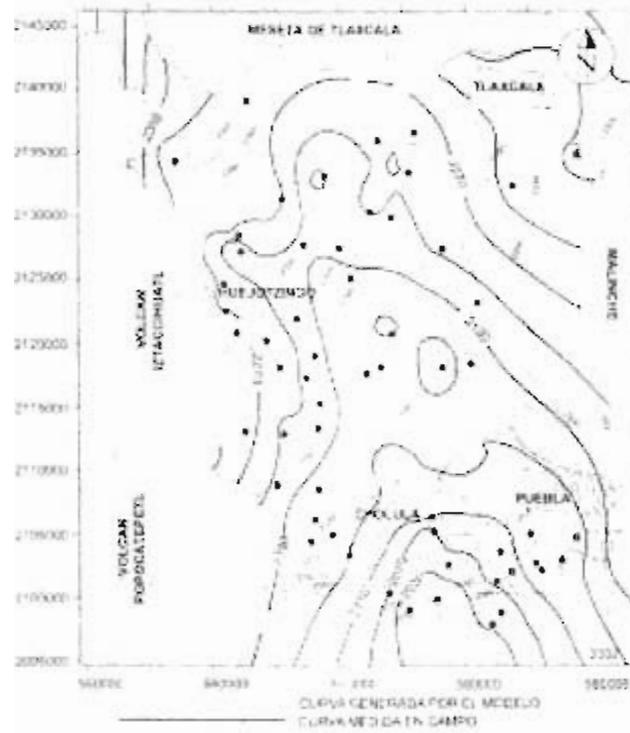


Figura 1. Líneas equipotenciométricas, año 2002