



10  
2 ej'  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

“ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE  
DE PUEBLA, PUE.”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A N :

José Luis Hernández Michaca

Rodrigo Maldonado Villalón



MEXICO, D. F.

FALLA DE ORIGEN

1991



## **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 está 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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## I N D I C E

### RESUMEN.

#### I. GENERALIDADES.

I.1 Antecedentes.

I.2 Objetivos.

I.3 Localización y Descripción del Area de estudio.

I.4 Oferta y Demanda de Agua.

I.5 Actividades Económicas y Educativas.

#### II. METODOLOGIA.

II.1 Actividades de Campo.

II.2 Actividades de Gabinete.

#### III. CLIMATOLOGIA.

III.1 Características Generales.

III.2 Temperaturas Medias Mensuales.

III.3 Precipitaciones Mensuales.

III.4 Evapotranspiración

III.5 Volúmenes Infiltrados.

#### IV. GEOLOGIA.

IV.1 Fisiografía y Geomorfología.

IV.2 Estratigrafía.

IV.3 Geología Estructural y Tectónica.

IV.4 Geología Histórica

IV.5 Unidades Hidrogeológicas.

- V. GEOFISICA.
  - V.1 Introducción
  - V.2 Fundamentos teóricos del método
  - V.3 Características del equipo empleado
  - V.4 Resultados de la reinterpretación de los Sondeos Electricos Verticales
  
- VI. HIDROLOGIA SUPERFICIAL.
  - VI.1 Características Generales.
  - VI.2 Volúmenes de Escurrimiento
  
- VII. HIDROLOGIA SUBTERRANEA.
  - VII.1 Censo de Aprovechamientos.
  - VII.2 Piezometría.
  - VII.3 Pruebas de Bombeo.
  
- VIII. CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DEL AGUA (HIDROGEOQUIMICA)
  - VIII.1 Introducción
  - VIII.2 Interpretación hidrogeoquímica
  - VIII.3 Calidad del Agua Subterránea.
  
- IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.
  - IX.1 Conclusiones.
  - IX.2 Recomendaciones.

Bibliografía

CAPITULO I  
GENERALIDADES

I.1 ANTECEDENTES.

El presente trabajo geohidrológico del Valle de Puebla no es el primero en su tipo, sino por el contrario es la continuación de una serie de trabajos que ha venido realizando la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos por la preocupación que representa el aprovechamiento óptimo de los recursos hidráulicos en general y los subterráneos en este caso. El principal objetivo de los trabajos mencionados es el de abastecer de agua potable a la Ciudad de Puebla, Capital del Estado del mismo nombre.

Por esta razón es importante la actualización de estudios geohidrológicos como el que nos ocupa en este momento.

A continuación se enlistan algunos de los trabajos realizados en el área:

a).- Estudio geohidrológico preliminar de los valles de Puebla (alto Atoyac) en el Estado de Puebla y del río Zahuapan (Alto Atoyac) en el Estado de Tlaxcala -1973- realizado por Agrogeología, S.A.

b).- Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en los Estados de Puebla y Tlaxcala - S.A.R.H. - Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas - 1975 - efectuado por Agrogeología S.A.

c).- Actualización del Estudio Geohidrológico del Valle de Puebla, Pue. - S.A.R.H. - Subdirección de Geohidrología - 1980 / 1981 - efectuado por Perforaciones y Geología S. A.

d).- Estudio Geohidrológico en la zona del Río Atoyac, Estado de Puebla - S.A.H.O.P. - 1981 - efectuado por Lesser y Asociados.

e).- Estudio Geohidrológico en Puebla, Pue. - S.A.H.O.P. - Dirección General de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado en Centros Urbanos - 1981 - efectuado por Proyesco, S.A.

f).- Estudio Geohidrológico Complementario en el Valle de Puebla y Cuenca de Oriental en el Estado de Puebla. - S.A.R.H.- Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, Dirección General de Control de Ríos e Ingeniería de Seguridad Hidráulica, Subdirección de Geohidrología. Realizado en 1985 por I.T.S.,S.A.

El trabajo realizado por Agrogeología en 1973 tenía como principal finalidad conocer la potencialidad que los recursos hidráulicos subterráneos del Valle de Puebla y de las diferentes

regiones del Estado de Tlaxcala, comprendidas en la cuenca del río Zahuapan, pueden ofrecer al desarrollo del programa industrialización del "Corredor Puebla Industrial". Así como conocer las condiciones actuales del funcionamiento del acuífero o de los acuíferos existentes y prever su funcionamiento futuro al ponerlo en explotación para satisfacer las necesidades de los programas de industrialización, abastecimiento de agua potable y de desarrollo agropecuario.

Sus conclusiones fueron:

1).- Se distinguieron dos tipos de acuíferos comunicados entre sí. El primero constituido por los materiales aluviales que constituyen los flancos del Iztaccíhuatl y la Malinche y el segundo por los sedimentos lacustres.

2).- La recarga procede principalmente de la infiltración de la lluvia que cae sobre los flancos del Iztaccíhuatl y la Malinche. El acuífero de materiales aluviales es de carácter libre y el de los sedimentos lacustres es parcialmente confinado.

3).- La descarga se divide principalmente en tres: la descarga a los cauces de los ríos Zahuapan y Atoyac, la descarga por salidas subterráneas, así como el agua evaporada al norte de la confluencia de los ríos mencionados.

4).- La piezometría no muestra depresiones atribuibles a sobre explotación por bombeo o por otros medios, conservándose en equilibrio.

5).- La presencia del magnesio confirma la presencia de sedimentos lacustres permeables en el subsuelo.

6).- El agua en general es de buena calidad.

En el año de 1980 la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos realizó la actualización del Estudio Geohidrológico de Valle de Puebla efectuado en el año de 1973, con el fin de definir la factibilidad de extraer 2 m<sup>3</sup>/seg. para complementar el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Puebla. Se debe considerar que a partir de 1973 la explotación del agua subterránea se ha incrementado tanto en el área conurbada de la Ciudad de Puebla como en el corredor industrial de San Martín Texmelucan.

Los resultados de esta actualización pusieron de manifiesto que la extracción de los 2m<sup>3</sup>/s que se pretendían era posible. En el área de Santa María Moyotzingo- San Martín Texmelucan se perforaron 6 pozos (Ing. Joel Gtz.-comunicación personal-) que resultaron insuficientes para satisfacer la demanda a mediano plazo, por lo que se procedió a definir en que otra área se deberán localizar los sitios de extracción para resolver la problemática a mediano plazo, del abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Puebla, dado que el único recurso de aprovechamiento es el hidráulico subterráneo. Con tal antecedente

fue necesario ampliar el conocimiento de la geometría y estructura del acuífero, mediante la realización de un estudio geofísico de sondeos eléctricos verticales dispuestos en una área aproximada de 800 km<sup>2</sup>, definida por un polígono irregular con vértices en las poblaciones de San Martín Texmelucan, Cholula de Rivadavia y Huejotzingo, la planta industrial de la Volkswagen y en un punto de la carretera Cholula - San Andrés Calpan y un rectángulo definido por la Carretera Federal 150 y los poblados de Xicoténcatl y la Resurrección.

Posteriormente a la realización de este estudio geofísico se llevó a cabo la ampliación del mismo en el año de 1984. Para programar esta ampliación se tuvieron en cuenta cinco estudios, anteriores, de los cuales cuatro tenían información geofísica.

En el año de 1985 I.T.S., S.A. realizó el Estudio Geohidrológico Complementario en el Valle de Puebla y Cuenca de Oriental, en el Estado de Puebla. Los Objetivos de este estudio eran:

- Complementar el conocimiento de las características hidráulicas del acuífero en el Valle de Puebla.
- Definir la geometría del acuífero del Valle de Oriental.
- Definir el funcionamiento hidráulico del acuífero del Valle de Oriental.

Las conclusiones más relevantes fueron:

1.- El basamento geohidrológico esta constituido por los sedimentos calcáreos, interestratificados con lutitas, razón por la cual presenta una permeabilidad muy baja, excepto las calizas arrecifales de la Sierra de Soltepec, situada al suroeste de la Cuenca de Oriental.

2.- Los aspectos piezométricos confirman dos salidas subterráneas: la primera en la porción SSE hacia las calizas permeables de Soltepec y la segunda hacia el norte.

## I.2 Objetivos

Los principales objetivos que se persiguen con el presente estudio geohidrológico son los siguientes:

- Determinar el marco geológico de la zona, utilizando para ello fotointerpretación y reconocimientos de campo.
- Determinar el funcionamiento del acuífero o sistema acuífero.
- Definir las zonas de recarga del acuífero (o sistema acuífero) así como las zonas de descarga del mismo.
- Determinar las unidades geológicas presentes en la zona de agua de mala calidad y la relación que guardan con la calidad del agua.



- Definir el comportamiento hidrogeoquímico del acuífero (o sistema acuífero) así como el posible origen del agua de mala calidad.
- Determinar el papel que juegan las estructuras geológicas en el funcionamiento del acuífero o sistema acuífero.
- Definir las áreas favorables para la exploración-explotación del agua subterránea para el posible abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Puebla y zona conurbada.

### I.3 LOCALIZACION Y DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.

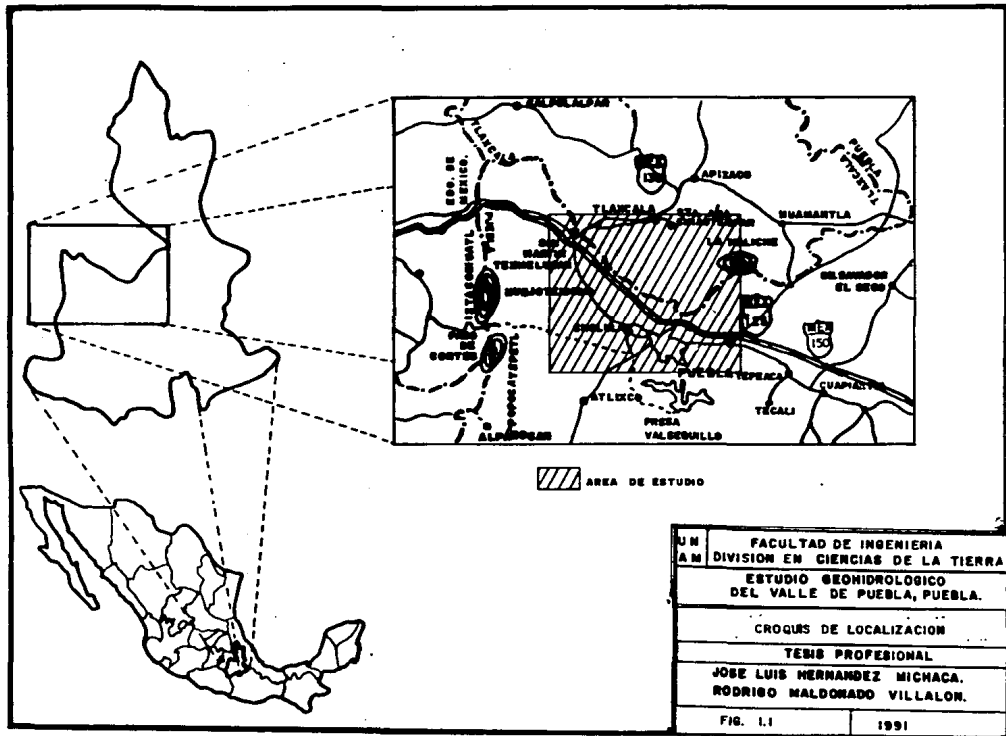
El área de estudio se localiza en la porción central del Estado de Puebla y en la parte sur del Estado de Tlaxcala, tiene como límites geográficos aproximados los paralelos 18° 58' y 19° 20' de latitud norte y los meridianos 98° 00' y 98° 30' de longitud oeste a partir del Meridiano de Greenwich. La superficie total enmarcada por estas coordenadas es de 2,128.5 km<sup>2</sup> de los cuales 1,200 corresponden a lo que es en sí el Valle de Puebla, que va de la Ciudad de Puebla a la población de San Martín Texmelucan aproximadamente y lo demás corresponde a las prominencias que delimitan el valle (Figura I.1).

El Valle de Puebla se encuentra limitado al oeste por la Sierra Nevada representada por los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, al oriente limita con el volcán de La Malinche y la Serranía de Amozoc, al norte esta limitado por la Sierra de Tlaxcala y al sur por las serranías que estan entre las Ciudades de Puebla y Atlixco.

Debido a que las Ciudades de Puebla y Tlaxcala, se encuentran dentro del valle, este se encuentra ampliamente comunicado por carreteras, vías férreas, y aeropuerto para avionetas. Su servicio de comunicaciones se complementa con servicios de otro tipo como son teléfono, telégrafos, correos y telex.

La Carretera Federal 150 comunica a la Ciudad de Puebla con la Ciudad de México pasando por la población de San Martín Texmelucan y con la Ciudad de Orizaba, la Carretera Federal 190 comunica dicha ciudad con la Población de Atlixco, Cholula y Huejotzingo y se comunica con la Ciudad de Tlaxcala por medio de la Carretera Federal 119. Además de las carreteras federales las ciudades que se encuentran dentro del valle se comunican entre sí y con otras ciudades por medio de carreteras estatales como la Carretera Estatal 129 que comunica a la Ciudad de Puebla con la Población de Rafael L. Grajales.

Las vías férreas más importantes dentro del área son las siguientes : México - Puebla, que pasa por San Martín Texmelucan, Puebla - Tlaxcala que cruza el poblado de Santa Ana Chiautempan, Puebla - Atlixco que pasa por Cholula y las vías férreas Puebla - Tehuacán y Puebla - Orizaba que atraviezan por



Amozoc.

El área de estudio cuenta con otro gran número de carreteras, terracerías y caminos vecinales que hacen que el desplazamiento en el área se pueda realizar sin grandes dificultades.

#### I.4 OFERTA Y DEMANDA DE AGUA.

Actualmente la Ciudad de Puebla y zona conurbada cuenta con 1'700,000 habitantes, que demandan un caudal medio de 4,919 lps, considerando una dotación de 250 l/día/hab., la población se incrementará hasta alcanzar la cantidad de 2'741,000 habitantes en el año 2000, la que a su vez demandará un caudal de 7,931 lps.

El suministro de agua a la ciudad se realiza mediante dos galerías filtrantes, "Conde" y "Oropeza" y de pozos profundos localizados en el área urbana que proporcionan, en conjunto, un caudal medio de 3,200 lps, caudal insuficiente para atender las demandas de la Ciudad de Puebla, sin embargo no se conoce el caudal real, ya que este es estimado.

Para atender estas demandas se han considerado varias fuentes como son: Presa Manuel Avila Camacho, Los Rios Atoyac y Zahuapan, la Cuenca de Oriental y el Valle de Puebla; de estas posibles fuentes es el Valle de Puebla, por su localización, la que podría utilizarse para cubrir las demandas de agua potable a corto plazo.

#### I.5 CARACTERISTICAS DEMOGRAFICAS, ACTIVIDADES ECONOMICAS Y EDUCACION.

A continuación se describen las características de las zonas comprendidas en los Estados de Puebla y Tlaxcala separadamente.

### ESTADO DE PUEBLA

#### CARACTERISTICAS DEMOGRAFICAS

La población en el Estado de Puebla, según el censo realizado por INEGI en el año de 1990 asciende a 4'118,059, constituyendo el 5.08 % del total del país, con una densidad de población de 121.41 habitantes por Km<sup>2</sup>.

Las principales entidades en cuanto a número de habitantes se refiere corresponden a las ciudades de Puebla con 1'054,921, San Martín Texmelucan con 94,532, San Pedro Cholula con 77,923, Atlixco con 104,186, Huejotzingo con 41,802, San Andrés Cholula con 37,791 y Amozoc con 35,699.

## AGRICULTURA

Aunque la Agricultura en el Estado de Puebla no es la actividad económica más importante en cuanto a la generación de ingresos, proporciona empleo a cerca del 40% de la población económicamente activa, se caracteriza por la predominancia de la agricultura de temporal (90%) sobre la de riego.

Los cultivos de temporal más importantes son maíz, frijol, cebada, haba, café, manzana, aguacate, durazno, pera, cacahuete, ajonjolí, papa y tomate verde.

La producción en la agricultura de riego se obtiene también básicamente en los ciclos anuales. Los cultivos principales en la zona de riego son: maíz, frijol, alfalfa, caña de azúcar, aguacate, chile y tomate verde, ocupando algunas áreas de los valles y los llanos del Eje Neovolcánico.

Dentro de la agricultura de temporal sobresale en la producción de aguacate los municipios de Atlixco y Tochmilco, ambos localizados al oeste de la Ciudad de Puebla. En la producción de manzana destaca el municipio de Huejotzingo.

Es importante la producción de café en las partes cálido-húmedas del Eje Neovolcánico.

En los llanos de la provincia del eje Neovolcánico se siembran principalmente cultivos básicos y forrajeros, de los que sobresalen por su producción la papa, cebada, cacahuete, tomate y haba; por su área ocupada el maíz y el frijol. La agricultura nómada se realiza en los lugares de pendiente fuertes del eje Neovolcánico, es básicamente una agricultura de subsistencia, sus cultivos principales son el maíz y el chile.

## GANADERIA

Solo tiene importancia la explotación de ganado lechero que se concentra en las cuencas lecheras de San Martín Texmelucan, Huejotzingo y Chipilo.

## INDUSTRIA

Esta ha recibido un gran impulso en el Estado de Puebla, actualmente se cuenta con lo que se conoce como el "Corredor Puebla Industrial", el cual comprende una faja de dos Km de ancho a ambos lados de la autopista de Cuota México-Puebla, desde San Martín Texmelucan hasta la Ciudad de Puebla.

Dentro de este corredor industrial destacan la industrias automotriz, de maquinaria, la de cemento, de cerámica y la de productos químicos, en Xoxtla, la industria básica del hierro y el acero, la petroquímica en San Martín Texmelucan, y la de elaboración de sidra en Cholula y Huejotzingo.

## EDUCACION

El Estado de Puebla es una de las entidades que cuenta con mayor número de centros de enseñanza superior dependientes del gobierno federal, del gobierno del Estado y de instituciones privadas. Como principales instituciones de educación superior podemos citar a la Universidad Autónoma de Puebla, La Escuela Normal Superior de Puebla, el Conservatorio de Música y Declamación, El Instituto de Artes Plásticas, El Centro Escolar Niños Héroes de Chapultepec y la Escuela Militar de Ingeniería en la Ciudad de Puebla; en Cholula se encuentra la Universidad de Las Américas.

## ESTADO DE TLAXCALA

### CARACTERISTICAS DEMOGRAFICAS

De acuerdo con el censo realizado por INEGI en 1990, el Estado de Tlaxcala cuenta con una población total de 763,683 habitantes, con una densidad de población de 195.12 hab. por Km<sup>2</sup>. Los municipios con mayor número de habitantes y que se encuentran dentro del área de estudio son: Chiautempan con 61,256, Huamantla con 51,925, Tlaxcala, con 50,631, San Pablo del Monte con 40,916, Zacatelco, con 36,653 e Ixtacuixtla de Mariano Matamoros con 30,711.

### AGRICULTURA

Esta actividad continua siendo la más importante para la entidad, aunque se desarrolla dentro de un marco poco favorable debido a las graves limitaciones físicas y climáticas.

La agricultura de temporal se lleva a cabo principalmente en los llanos de Apan, de Huamantla y al sur del Estado en el Valle de Tlaxcala-Puebla. El uso de Fertilizantes es más limitado que el de pesticidas y solo se utiliza para el cuidado de cultivos de ciclo anual y semiperene, como maíz, frijol, cebada, papa, alfalfa, trigo, haba, garbanzo, lenteja y chile. El hecho de ser agricultura de temporal proporciona un mayor rendimiento, destinándose la producción al comercio nacional y regional. Una segunda forma de agricultura de temporal se desarrolla principalmente en partes de las faldas del volcán Matlalcuéyatl en la meseta o bloque de Tlaxcala y en los lomeríos y llanos del centro. Los cultivos que se destinan principalmente al comercio regional son: maíz, frijol, haba, arvejón, papa, cebada, avena y alfalfa.

La agricultura de riego es la de mayor importancia ya que, aunque su área es reducida, reporta grandes rendimientos. Está distribuida a lo largo del corredor llano, en el valle de laderas tendidas y en los lomeríos y llanos del centro. El uso de fertilizantes y pesticidas es generalizado. Los cultivos en su mayoría de ciclo anual y semiperene se destinan al comercio nacional y regional, maíz, frijol, cebada, haba, papa, alfalfa, calabacita, acelga, epazote, espinaca, rábano y jitomate.

## **GANADERIA**

En materia de ganadería destaca la cría de ganado lechero y de toros de lidia, aunque también tiene importancia la cría de ganado para carne, bovino, caprino, porcino y ovino.

## **INDUSTRIA**

Dentro del área de estudio y en el Estado de Tlaxcala hay diferentes industrias de transformación, como son: la textil en Chiautempan, Tlaxcala, Ixtacuixtla y Apizaco, la de artículos de plata en Chiautempan, la de celulosa y papel en Apizaco y la de productos químicos en Ixtacuixtla y Apizaco.

Además, se ha establecido un gran número de industrias a lo largo de la carretera Puebla-Tlaxcala, cerca de los límites con el Estado de Puebla.

## **EDUCACION**

Las principales instituciones de enseñanza superior en el Estado de Tlaxcala son: el Instituto de Estudios Superiores de Tlaxcala, la Escuela Normal Superior y el centro de Capacitación Industrial localizado en la Ciudad de Apizaco.

## CAPITULO II

### METODOLOGIA

En todas las actividades que se desarrollan en el área de Geohidrología es muy importante el diseño, planeación y realización de las actividades de gabinete, esto redundará en la rapidez del trabajo de campo, así como una mejor calidad de la información obtenida.

Por sus características, las actividades se han dividido en dos tipos: las de Campo (realizadas en el lugar mismo de estudio) y las de Gabinete (realizadas en oficina).

#### II.1 ACTIVIDADES DE CAMPO

Las actividades desarrolladas en el campo fueron de diversa índole, consistiendo principalmente en un reconocimiento general del área, con el cual, se adquirió un conocimiento global de las características geológicas, fisiográficas hidroloogicas, climáticas y de vegetación. En esta etapa se ubicaron los aprovechamientos del agua subterránea en cartas topográficas de la zona (escala 1:50,000) y se pudo apreciar las condiciones en que se encuentran las vías de acceso a los mismos; una vez realizado lo anterior, se procedió a realizar una medición de la profundidad de los niveles estáticos de los mismos, así como una nivelación topográfica para acotar los brocales de los aprovechamientos elegidos para hacer las observaciones piezométricas. Simultáneamente se llevo a cabo una actualización del censo de los aprovechamientos del agua subterránea.

Cabe aclarar que los datos de la nivelación topográfica fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, y que también gran parte de la medición de niveles estáticos fue realizado por personal de ésta dependencia.

Se realizó un reconocimiento geológico, así como un muestreo de las diferentes unidades litológicas y reconocimientos geohidrológicos, además de pruebas de bombeo a caudal constante y la determinación del régimen de operación de los pozos existentes.

El censo de los aprovechamientos del agua subterránea se dividió en dos actividades, éstas fueron la recolección de información existente (en las diferentes dependencias del Gobierno Federal y empresas particulares) y el censo directo en el campo.

La información ya existente fue proporcionada principalmente por la Comisión Nacional del Agua, las actividades de campo con respecto al censo se llevaron a cabo simultáneamente a las mediciones piezométricas durante los meses de Junio, Julio y Agosto de 1990.

La localización de los aprovechamientos censados se realizó en cartografía de INEGI escala 1:50 000, para el censo se utilizaron las formas aprobadas por la Comisión Nacional del Agua.

Los aprovechamientos en el área de estudio son pozos profundos, norias y manantiales.

Los pozos profundos fueron censados casi en su totalidad, lo cual no ocurrió con las norias debido al gran número de aprovechamientos de este tipo, los manantiales censados fueron doce, distribuidos en los municipios de Domingo Arenas y San Martín Texmelucan en el estado de Puebla y en los municipios de Tepeyanco, Xicohtzingo, Xicohtécatl, Ixtacuixtla, Apetatitlán y Zacatelco en el estado de Tlaxcala.

El número total de aprovechamientos censados fue de 547, Con 470 pozos profundos, 64 Norias, 12 Manantiales y una galería filtrante.

La medición de los niveles piezométricos se realizó en tres diferentes períodos para poder observar la variación de los niveles durante el año, la primera nivelación piezométrica se realizó durante los meses de Abril y Mayo, la segunda durante los meses de Julio y Agosto y la Tercera en los meses de Octubre y Noviembre de 1990.

Los aprovechamientos que se utilizaron para realizar estas tres mediciones fueron : 131 Pozos profundos y 59 Norias.

Las mediciones de los niveles se realizaron siempre a partir del brocal y con una sonda eléctrica.

También se realizó una nivelación topográfica para referir los brocales de todos los aprovechamientos (pozos y norias) al nivel del mar, para con ello poder obtener la elevación de los niveles estáticos con respecto al nivel del mar.

Una de las actividades indispensables es la Geología de Campo, ésta consistió en varios recorridos cuyo objetivo fue el de verificar la información obtenida en gabinete con el estudio de fotointerpretación geológica , que se efectuó sobre pares estereoscópicos de fotografías aéreas para posteriormente elaborar un mapa fotogeológico. Durante estos recorridos se verificó la existencia de contactos geológicos, estructuras geológicas (fallas, fracturas, anticlinales, etc.), afloramientos, litologías inferidas en la fotogeología, etc. Toda esta información ayudó a configurar el marco geológico del área de estudio, así como determinar características íntimamente



relacionadas con el comportamiento del agua en el acuífero.

Durante esta etapa se identificaron físicamente las diferentes unidades litológicas, así como también se obtuvieron muestras de ellas para hacer una clasificación macroscópica en campo y posteriormente una clasificación microscópica en el laboratorio, lo cual dependerá de las necesidades del trabajo.

Una etapa de vital importancia en este tipo de estudios corresponde a la recolección de muestras de agua (este muestreo se realizó simultáneamente con el levantamiento piezométrico), se tomaron muestras de 77 aprovechamientos. En el lugar del muestreo se determinaron los siguientes parámetros: Conductividad, Temperatura, pH, Turbidez y Sabor.

Estas muestras de agua fueron utilizadas para hacer el análisis químico cuyos resultados se explican a detalle en el Capítulo VIII.

Otra de las actividades importantes en campo fue la realización de pruebas de bombeo a caudal constante, previa selección de los aprovechamientos más adecuados para este fin.

Se realizaron 22 pruebas de bombeo a caudal constante con distintas duraciones cada una, lo anterior está en función de las necesidades de uso del propietario del pozo, así como de las características del mismo pozo.

Estas pruebas de bombeo consisten de dos etapas, una de abatimiento y otra de recuperación. La primera corresponde al abatimiento que experimenta el nivel dinámico durante el bombeo y la segunda corresponde a la recuperación del nivel después que se ha dejado de bombear. Durante estas dos etapas se miden los niveles con una sonda eléctrica con cable de 50 a 100 metros de longitud.

Se recomienda que las mediciones que se realicen sean representadas en papel logarítmico; conviene, por lo tanto, elegir, una tabla de tiempos lo más acorde posible con la comodidad de su representación.

Normalmente suele utilizarse los siguientes intervalos en minutos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40, 45, 60 (1h), 90 (1 h 30 min), 120 (2h), 180 (3h), 240 (4 h), 300 (5h) y, a partir de aquí, se aumenta de dos en dos horas, las mediciones pueden ampliarse cada 4 o 6 horas, llegando a ampliar los intervalos tanto como se prolongue el bombeo y su representación sea suficientemente clara, estos intervalos dependerán del tiempo en que el nivel estático alcance su equilibrio.

Así mismo, en el intervalo de tiempo en que ocurre el abatimiento y la recuperación se mide el caudal con una "regla de aforo" cuando se tiene descarga libre o se cuenta el tiempo que tarda en llenarse un recipiente de volumen conocido, o algún otro método según el caso lo requiera, ésta medida del caudal se

obtiene en litros por segundo.

## II.2 ACTIVIDADES DE GABINETE

Las actividades de gabinete se dividieron en dos etapas principales que son: La primera de recopilación de información y planeación de las actividades de campo y la segunda que corresponde a la interpretación de la información obtenida:

### 1a. Etapa. Recopilación de Información y Planeación.

Esta etapa se inició con la recopilación de toda la información disponible del área de estudio como son: Trabajos previos, información climatológica, cartas topográficas, geológicas y fisiográficas (INEGI), información demográfica, urbana y de comunicaciones, así como recopilación bibliográfica de temas afines al estudio, fotografías aéreas, imágenes de satélite e información del área proporcionada por la Comisión Nacional del Agua.

Se procedió a elaborar un mapa fotogeológico utilizando para ello la información obtenida con la fotointerpretación geológica efectuada sobre pares estereoscópicos de fotografías aéreas.

Otra de las actividades importantes en ésta etapa fue la selección de los aprovechamientos en los cuales se realizaron las pruebas de bombeo, así como aquellos en los cuales se realizó la nivelación topográfica

### 2a. Etapa. Interpretación de la información obtenida.

Una de las actividades fue la elaboración del mapa geológico definitivo que resultó de las correcciones realizadas al mapa fotogeológico a partir de los reconocimientos geológicos de campo.

Así mismo se elaboraron las configuraciones de los niveles estáticos con los datos obtenidos en campo.

Las pruebas de bombeo fueron interpretadas por dos métodos diferentes: Jacob y Theis.

Se realizó la configuración de los iones más importantes utilizando para ello los análisis químicos de laboratorio (realizados por la Comisión Nacional del Agua, estos fueron utilizados para determinar la calidad del agua así como para la clasificación de las diferentes muestras de agua.

## CAPITULO III

### CLIMATOLOGIA

La Geología, la Geomorfología y la Climatología son factores determinantes en las características del agua subterránea de una región, condicionando la recarga, permanencia en el terreno y descarga.

En el presente capítulo se tratan los fenómenos atmosféricos tales como la Temperatura, Precipitación Pluvial, evapotranspiración, así como la infiltración y el escurrimiento, cuya intervención es importante en el Ciclo Hidrológico.

Para la realización del presente trabajo se consideraron trece estaciones climatológicas donde se obtuvieron datos de temperatura, precipitación y evaporación. Los nombres y localización de las estaciones aparecen en la tabla III.1.

#### III.1 CARACTERISTICAS GENERALES

El clima se define como el conjunto de los fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio del tiempo en un punto dado de la atmósfera terrestre (García 1986).

Los climas predominantes en el área de estudio corresponden de acuerdo con la clasificación de Koeppen al Grupo de Climas Fríos y muy Fríos y al Grupo de Climas Templados.

Cada Grupo se ha subdividido en Subgrupos, que a su vez comprenden varios tipos de climas, de tal forma que una región queda dividida en zonas con características climatológicas propias para cada una de ellas.

El Grupo de Climas Fríos y muy Fríos se caracteriza porque en el mes más cálido se registra una temperatura media menor de 6.5 grados Centígrados, lo que solo permite el desarrollo de líquenes, musgos y hierbas, este Grupo se encuentra representado por el tipo E(T)H, donde la temperatura del mes más frío es menor a los cero Grados Centígrados, presentándose en las zonas más elevadas del Popocatepetl y del Iztaccíhuatl a más de 4,000 msnm y en la cumbre de la Malinche, cubriendo el 1% de su superficie.

El Grupo de Climas Templados se encuentra representado por el Subgrupo de Climas Templados y el Subgrupo de Climas Semifríos. El Subgrupo de Climas templados presenta una temperatura media anual de entre 12 y 18 Grados Centígrados; la del mes más frío oscila entre 3 y 18 Grados Centígrados y se presenta en los tipos C(w2)(w) y C(w1)(w), el primero de ellos corresponde a los climas templados subhúmedos con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor del 5 %, es el más húmedo de éste Subgrupo. Este tipo de Clima se desarrolla en lugares como la parte más baja de las faldas de la

**TABLA III.1**

<b>ESTACION CLIMATOLOGICA</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>ALTITUD MSNM</b>
<b>TLAXCO, TLAX.</b>	<b>19 35' 22"</b>	<b>98 57' 33</b>	<b>2,516</b>
<b>ATLANGA, TLAX</b>	<b>19 33' 21"</b>	<b>98 12' 12</b>	<b>2,478</b>
<b>SANCTORUM, TLAX.</b>	<b>19 28' 45"</b>	<b>98 28' 00</b>	<b>2,730</b>
<b>HUEYOTLIPAN, TLAX</b>	<b>19 18' 30"</b>	<b>99 20' 30</b>	<b>2,545</b>
<b>RIO FRIO, PUE</b>	<b>19 21' 00"</b>	<b>98 40' 00</b>	<b>2,970</b>
<b>STA. RITA TLAHUAPAN, PUE.</b>	<b>19 19' 38"</b>	<b>98 14' 27</b>	<b>2,720</b>
<b>TLAXCALA, TLAX.</b>	<b>19 18' 45"</b>	<b>98 14' 10</b>	<b>2,260</b>
<b>APIZACO, TLAX.</b>	<b>19 14' 25"</b>	<b>98 11' 09</b>	<b>2,426</b>
<b>S.M. TOCATLAN, TLAX.</b>	<b>19 23' 45"</b>	<b>98 02' 00</b>	<b>2,540</b>
<b>HUEJOTZINGO, PUE.</b>	<b>19 09' 00"</b>	<b>98 23' 00</b>	<b>2,280</b>
<b>SN. MIGUEL CANOA, PUE.</b>	<b>19 09' 00"</b>	<b>98 05' 07</b>	<b>2,515</b>
<b>21 PONIENTE, PUE.</b>	<b>19 12' 14"</b>	<b>98 12' 14</b>	<b>2,162</b>
<b>ECHEVERRIA, PUE.</b>	<b>18 58' 11"</b>	<b>98 16' 56</b>	<b>2,070</b>

Malinche y la Sierra Nevada (Popocatépetl e Iztaccíhuatl) a menos de 2,600 msnm, además, cruza a la zona de estudio hacia la parte centro y sur en una franja de orientación este-oeste con un ancho de 20 Km aproximadamente.

El Clima C(w1)(w) representa a los climas templados con un porcentaje de precipitación invernal menor del 5 %, localizándose en la porción norte del área de estudio en una franja este-oeste que va de Santa Ana Chiautempan a San Martín Texmelucan, con una longitud de aproximadamente 15 Km.

El rasgo que caracteriza al Subgrupo de Climas Semifríos es un régimen térmico medio anual menor de 12 grados Centígrados. Los tipos de vegetación que comunmente se desarrollan en estas condiciones son bosques y praderas de alta montaña. Este Subgrupo se encuentra representado en el área por el tipo C(E)(w2)w que es el más húmedo de los Semifríos y tiene lluvias en verano. La precipitación del mes más seco registra un valor de 40 mm y un porcentaje de lluvia invernal menor del 5 %. La precipitación media anual va de 700 a 1,000 mm y la Temperatura media anual tiene un valor de 12 Grados Centígrados, se desarrolla en lugares con más de 2,600 m de altitud, como en las faldas de la Malinche y del Popocatépetl e Iztaccíhuatl.

### III.2 TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES

La Temperatura del aire es un importante elemento en el análisis climatológico; a pesar de la escasa conductividad del aire, el calor suministrado por las radiaciones solares se transmite con bastante rapidez por los movimientos de convección que se producen en la atmósfera, la temperatura se expresa en términos de la diferencia entre el calor absorbido por la superficie terrestre y el emitido por radiación.

Para medir la temperatura se utiliza un termómetro de mercurio en una estación climatológica, evitando que el sol insida directamente y el aire permanezca estacionario alrededor del mismo, de lo contrario, la mayor masa específica del mercurio haría que cediese su calor al aire dilatándose menos de lo debido. La Temperatura del aire varía rápidamente desde el nivel del suelo hasta una altura aproximada de 1.5 m., a una altura mayor la variación comienza a ser más pequeña.

Las Temperaturas más elevadas se localizaron en la estación Puebla, ubicada en la capital del Estado, con un promedio anual de 16.39 grados Centígrados a una elevación de 2162 m.s.n.m.; las más bajas se registraron en la Estación Río Frío, la cual se localiza en la Sierra Nevada donde se presentaron temperaturas con un promedio anual de 9.89 grados Centígrados a una elevación de 2,970 msnm, para lo anterior se consideró un período de 20 años a partir de 1970.

En general, las Temperaturas más altas se registraron en las estaciones localizadas en la parte baja de la Cuenca (Tlaxcala, Echeverría, Puebla, Huejotzingo, etc.). Las Temperaturas más bajas corresponden a las estaciones que se localizan en las zonas con mayor elevación como Río Frío, San Miguel Canoa, etc.

En la tabla III.2 se muestran las temperaturas medias anuales para cada estación.

La temperatura media mensual más baja se registra en el mes de Enero y en promedio es de 10.12 Grados Centígrados, la Temperatura más alta corresponde al mes de Mayo con 15.16 Grados Centígrados (gráfica III.1).

### III.3 PRECIPITACION PLUVIAL MEDIA MENSUAL

La precipitación pluvial es el principal componente del ciclo hidrológico, llegando a la superficie de la tierra como agua, ya sea en estado líquido o sólido. Por efecto del movimiento general de la atmósfera que se efectúa en las zonas de baja presión, el vapor de agua contenido en ésta se condensa alrededor de pequeños núcleos de material sólido en suspensión, formando gotas o cristales que se precipitan en forma de lluvia, granizo o nieve.

La lluvia es un fenómeno de tipo discontinuo, por lo que no se puede hablar de su variación anual o diaria como con otros elementos meteorológicos.

La cantidad de lluvia se expresa por la altura que el agua precipitada ocuparía en el suelo como superficie ideal plana y horizontal permaneciendo sin infiltrarse ni evaporarse. Las medidas se realizan por medio del Pluviómetro, que registra la cantidad de lluvia recibida en el intervalo de tiempo comprendido entre dos lecturas consecutivas (generalmente un día). Los Pluviómetros consisten en esencia de un colector que recibe el agua de lluvia através de un cilindro receptor de sección conocida colocado en posición vertical, para evitar la evaporación, se canaliza el agua mediante un embudo a una probeta graduada de acuerdo a la sección del cilindro, donde mide la altura en milímetros de agua recogida.

Analizando las precipitaciones en un período de 20 años (1970 - 1989), se obtuvo una precipitación media anual de 797.07 mm y una lámina media mensual de 66.42 mm (ver Tabla III.3).

De acuerdo con la Gráfica III.2, se tiene que la temporada de lluvia se inicia de finales del mes de Mayo y se prolonga hasta el mes de Septiembre, teniendo que la mayor parte de la precipitación ocurre en éstos meses, de los cuales Junio es el más lluvioso con una lámina promedio de 140.00 mm.

**TABLA III.2**

**TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES POR ESTACION**

<b>TLAXCO</b>	<b>14.04</b>
<b>ATLANGA</b>	<b>12.88</b>
<b>SANCTORUM</b>	<b>13.52</b>
<b>HUEYOTLIPAN</b>	<b>13.98</b>
<b>RIO FRIO</b>	<b>9.89</b>
<b>TLAHUAPAN</b>	<b>13.89</b>
<b>TLAXCALA</b>	<b>15.52</b>
<b>S.M. TOCATLAN</b>	<b>13.96</b>
<b>HUEJOTZINGO</b>	<b>15.93</b>
<b>ECHEVERRIA</b>	<b>14.96</b>
<b>PUEBLA</b>	<b>16.39</b>
<b>APIZACO</b>	<b>13.65</b>
<b>SN MIGUEL CANOA</b>	<b>12.83</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>13.96</b>

**TABLA III.3**

**PRECIPITACION MEDIA ANUAL  
POR ESTACION**

<b>ESTACION</b>	<b>(mm)</b>
TLAXCO	674.95
ATLANGA	648.30
SANCTORUM	765.56
HUEYOTLIPAN	783.36
RIO FRIO	975.69
TLAHUAPAN	827.28
TLAXCALA	809.85
STA MA TOCATLAN	755.42
HUEJOTZINGO	804.48
ECHEVERRIA	839.05
PUEBLA	826.84
APIZACO	804.21
SN MIGUEL CANOA	847.02
PROMEDIO	797.07

**PRECIPITACION MEDIA MENSUAL  
POR ESTACION**

<b>ESTACION</b>	<b>(mm)</b>
TLAXCO	56.25
ATLANGA	54.03
SANCTORUM	63.80
HUEYOTLIPAN	65.28
RIO FRIO	81.31
TLAHUAPAN	68.94
TLAXCALA	67.49
STA MA TOCATLAN	62.95
HUEJOTZINGO	67.04
ECHEVERRIA	69.92
PUEBLA	68.90
APIZACO	67.02
SN MIGUEL CANOA	70.59
PROMEDIO	66.42



### III.4 EVAPOTRANSPIRACION

La evaporación es el paso de un cuerpo del estado líquido al estado gaseoso por debajo del punto de ebullición, esta depende de la temperatura del agua, de la temperatura del aire que esta en contacto con el agua, de la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y de la velocidad del viento.

Generalmente se trata a la evaporación en forma independiente de la transpiración, en condiciones naturales es preciso reunirlos, ya que en terrenos provistos de vegetación, los dos procesos se efectuan en forma simultanea e interactiva.

La evapotranspiración es el resultado del proceso por el que el agua cambia del estado líquido al gaseoso a través de las plantas, retornándola a la atmósfera en forma de vapor, por lo que solo se aplica en aquellas áreas provistas de vegetación, de lo contrario solo se hablara de evaporación. Por lo tanto no es posible la ocurrencia exclusiva de la transpiración en condiciones naturales, aun teniendo sus características propias.

Para expresar las pérdidas por evapotranspiración se utilizan los mm de altura y de agua referidos a un determinado intervalo. Generalmente no se considera en un balance, ya que intervienen factores como la temperatura, la humedad, intensidad de iluminación, apertura de estomas de las hojas de las plantas, humedad del suelo, desarrollo vegetal, etc., sin embargo, incide directamente en la cuantificación de la disponibilidad de agua en un área; entonces, al tener al menos órdenes de magnitud, se aceptan los valores deducidos de fórmulas empíricas apoyados en datos meteorológicos de fácil acceso.

Para estimar a la evapotranspiración, algunos investigadores han desarrollado métodos empíricos, ya que no existen métodos exactos o científicos para determinarla (Custodio y Llamas, 1976). Para calcular la evapotranspiración real del área de estudio se utilizaron las fórmulas Turc y Coutagne.

La Fórmula de Turc se representa por la expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración Real (mm/año)

P = Precipitación (mm/año)

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

T = Temperatura Media Anual en Grados Centígrados.

De acuerdo con los datos registrados en el área de estudio y utilizando la expresión de Turc, la evapotranspiración real resulta:

$$ETR = 518.402 \text{ mm/año}$$

La fórmula de Coutagne es válida para valores de precipitación media anual comprendidos entre:

$$\frac{1}{8x} \text{ y } \frac{1}{2x}$$

Donde:

$$x = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$$

T = Temperatura Media Anual en Grados Centígrados.

Coutagne propone la siguiente fórmula:

$$ETR = P - xP^2$$

En la que:

ETR = Evapotranspiración real en mm/año.

P = Precipitación en m/año

Para el presente estudio:

$$T = 13.96$$

$$P = 797.07 \text{ mm/año} = 0.79707 \text{ m/año}$$

$$x = \frac{1}{0.8 + 0.14(13.96)} = 0.363055$$

$$ETR = 0.79707 - 0.363055(0.79707)^2$$

$$ETR = 0.8 - 0.36(0.8)^2 = 566.413 \text{ mm/año}$$

El valor de  $x = 0.363055$  es válido si la precipitación media del área queda comprendida entre 0.34 y 1.38 m/año.

Como puede observarse, la Evapotranspiración Real del área obtenida por métodos empíricos varía entre 518.4 mm y 566.41 mm, dicho de otra forma, el porcentaje evapotranspirado de la lluvia total anual varía entre 65.038 % y 71.0621 %, es decir, que aproximadamente de un 29 a un 35 % del agua precipitada durante un año escurre o se infiltra en el subsuelo, es decir que de cada 100 litros precipitados, de 65 a 71 se pierden por evapotranspiración.

En adelante, cuando se tome en cuenta la evapotranspiración, se considerará una lámina de evaporación de 542 mm la cual corresponde al promedio de los dos métodos y que representa al 68 % de la precipitación.

### III.5 VOLUMENES INFILTRADOS

La infiltración es el proceso por medio del cual el agua penetra en el subsuelo hasta alcanzar el nivel freático. Primero, el agua tiende a satisfacer la deficiencia de humedad del suelo, y posteriormente a escurrir superficialmente o a infiltrarse a estratos más profundos. El escurrimiento superficial también puede ocurrir cuando la intensidad de precipitación excede la capacidad de infiltración.

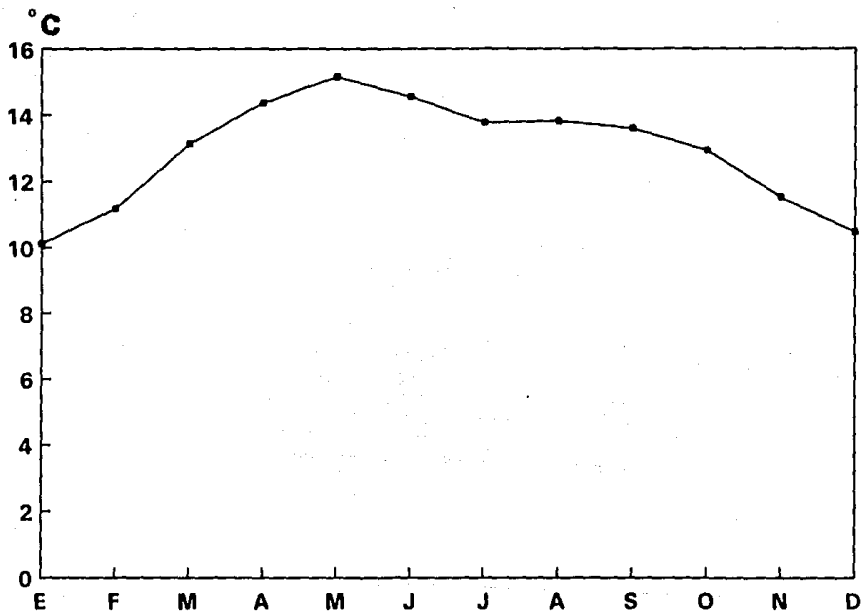
Se denomina capacidad de infiltración de un suelo a la máxima cantidad de agua de lluvia que puede absorber en la unidad de tiempo y dependerá de la textura y humedad del suelo. Al ocurrir la lluvia en exceso durante una tormenta es cuando se satisface la capacidad de infiltración que junto con la intensidad de la lluvia determinan la cantidad de agua que penetra en el suelo y la que escurre por cauces superficiales. Cuando el suelo alcanza la saturación superficial que incluye solo una capa delgada superficial en el suelo no mayor de 5 cm. comienza la infiltración.

La infiltración se ve afectada por las condiciones de superficie tales como la compactación natural, cobertura vegetal, pendiente del terreno, áreas urbanas, fracturamiento y tipo de rocas, etc., también la afectan las condiciones ambientales como son la humedad inicial, temperatura etc., por último, un factor que también influye en la infiltración serían las características propias de la precipitación pluvial, es decir, el espesor de la lámina de agua, intensidad de la lluvia, turbidez del agua, contenido de sales, viscosidad, etc.

La cuenca hidrológica dentro de la cual se ubica el área de estudio comprende una superficie de 3512.11 Km<sup>2</sup>, un volumen de precipitación de 2,799.4 millones de metros cúbicos, un volumen de evapotranspiración de 1,903.6 millones de metros cúbicos y un volumen de escurrimiento registrado en la estación Echeverría de 355.11 millones de metros cúbicos. De lo anterior se tiene que se infiltra un volumen de 540.7 millones de metros cúbicos que dividido entre la superficie de la cuenca nos da una lámina de 153.9 mm, lo cual corresponde a un 19.3 % de lo precipitado. Es decir, que de cada unidad de volumen precipitada, 0.193 se infiltra para alimentar el acuífero.

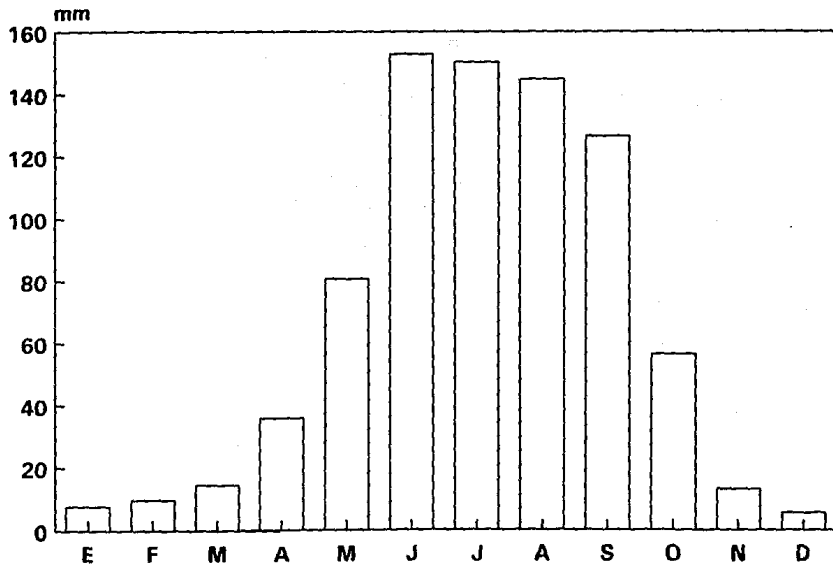
Los datos que se presentan en este capítulo solo son valores apreciativos, y solo con la obtención de medidas directas que reflejen fielmente las condiciones naturales podrá darse una validez real a los resultados que aquí se presentan, sin embargo son valores representativos de lo que realmente ocurre en el área estudiada.

## TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES



GRAFICA III.1

## PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES



GRAFICA III.2

## CAPITULO IV

### GEOLOGIA

#### IV.1 FISIOGRAFIA Y GEOMORFOLOGIA.

El Valle de Puebla queda comprendido dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico.

El valle tiene una superficie aproximada de 3,512.11 km<sup>2</sup>. Está limitado al norte por la Serranía de Tlaxcala en la cual sobresalen los Cerros de Tlapacoya, La Puerta, Del Carmen, El Aguila y San Simón, quedando dentro del valle los Cerros de San Miguel, Zompitcatl y Tlacomulco; al sur, está limitado por la Serranía de Santa Isabel Buenavista, que se localiza en la parte media entre las Ciudades de Puebla y Atlixco; al poniente por las estribaciones de la Sierra Nevada en el cual sobresalen los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl y por el oriente lo limitan, en parte, el volcán de La Malinche y la Sierra de Amozoc en su parte correspondiente al Cerro Grande.

Hidrográficamente está drenado por el Río Atoyac, que nace al noroeste de San Martín Texmelucan en el Estado de Tlaxcala, el cual esta integrado por los ríos Zahuapan, Atotonilco, Turín y Tlahuapan; dicho río pasa por el límite occidental de la Ciudad de Puebla y continúa con una dirección aproximada norte-sur hasta confluir con el Río Amajac que a su vez forma parte del Río Balsas que desemboca en el Océano Pacífico.

Este valle se caracteriza por estar conformado por una planicie ligeramente ondulada con pendientes suaves y moderadas cuya amplitud se estima en 30 km en el sentido este-oeste y una longitud de 40 km en el sentido norte-sur. Hacia la porción oriental se localiza el volcán de La Malinche y hacia el poniente los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, eminencias volcánicas que forman parte de la provincia del Eje Neovolcánico Transmexicano, la cual tiene una longitud aproximada de 950 km y una anchura que varía de 50 a 150 km. La porción más angosta se localiza en el área de la Ciudad de Puebla.

##### IV.1.1 FISIOGRAFIA

El área de estudio se encuentra comprendida, de acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas establecido por Raisz en 1959 y modificado por INEGI en 1985, dentro de la subprovincia de los Lagos y Volcanes de Anáhuac, la cual pertenece a la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico.

## PROVINCIA DEL EJE NEOVOLCANICO

Esta Provincia colinda al norte con la Llanura Costera del Pacifico, la Sierra Madre Occidental, la Mesa Central, la Sierra Madre Oriental, la Llanura Costera del Golfo norte; al sur con la Sierra Madre del sur y la Llanura Costera del Golfo sur. Por el oeste llega al Océano Pacifico y por el este alcanza al Golfo de México. Abarca parte de los Estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y Veracruz, así como todo el Estado de Tlaxcala y el D.F. Se caracteriza como una enorme maza de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables etapas desde mediados del terciario, hasta el presente. Sus grandes Sierras volcánicas y coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios volcanes de escudo y depósitos de arena y cenizas, entre otras estructuras, se encuentran dispersos entre extensas llanuras. Incluye la Cadena de Grandes Estratovolcanes denominada como Eje Neovolcánico: Volcán de Colima, Tancitaro, Zinantécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccihuatl, Matlalcuéyetl (la Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesa al país, aproximadamente sobre el paralelo 19°.

Las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos (Pátzcuaro, Cuitzeo, Texcoco y el Carmen entre otras) o por depósitos de lagos antiguos (Zumpango, Chalco, Xochimilco, varios llanos del Bajío Guanajuatense, el Valle de Puebla, etc.) constituyen otro rasgo esencial de la Provincia. Estos lagos se han formado por el bloqueo del drenaje original, debido a lavas u otros productos, o bien por el fallamiento, que es otro de los rasgos característicos de ésta Provincia.

El Eje Neovolcánico se divide en 14 subprovincias, de las cuales solo trataremos la de los Lagos y Volcanes de Anáhuac, ya que ésta comprende el área de estudio (INEGI 1985).

### SUBPROVINCIA DE LOS LAGOS Y VOLCANES DE ANAHUAC

Esta subprovincia, en cuyo territorio se encuentran la capital de la República y cinco capitales estatales (Toluca, Pachuca, Tlaxcala, Puebla y Cuernavaca) está integrada por grandes sierras volcánicas o aparatos individuales que se alternan con amplios vasos lacustres. A ella pertenecen también algunos de los más elevados volcanes del país, como el Citlaltépetl, Popocatepetl, Iztaccihuatl, Zinantécatl y Matlalcuéyetl.

La parte central del Valle está constituida principalmente por materiales aluviales Cuaternarios y tobas, ha sido clasificado por Raisz como Llanura con Lomeríos. Esta llanura se encuentra interrumpida ocasionalmente por derrames lávicos que aún conservan sus cráteres volcánicos cubiertos por tobas o constituidos únicamente por tobas. A los primeros se les ha clasificado como lomeríos con cráteres y a los segundos como lomeríos suaves de tobas.

En la porción Centro norte del área, entre Santa Inés Zacatelco y la Ciudad de Tlaxcala, el paisaje cambia para dar lugar a una serie de prominencias que deben su origen a la Falla Malinche, estando compuestos por sedimentos lacustres y tobas. Esta unidad fue clasificada como Lomerío de Colinas Redondeadas

El Volcán Matlalcuéyatl (La Malinche) se localiza en la parte Oriental y se le ha clasificado como Gran Sierra Volcánica Compleja o grandes estratovolcanes aislados.

Al norte de la Ciudad de Tlaxcala el área se caracteriza por una serie de Mesetas producidas por la Falla Tlaxcala y se les ha clasificado como Gran Meseta con Cañadas.

De la Ciudad de Tlaxcala hacia el noreste se encuentra una pequeña franja clasificada como Valle de laderas tendidas.

Al oeste de la Ciudad de Cholula se encuentra un extenso derrame básico al cual se le clasifica como Malpaís. En la porción occidental del área, la cual corresponde a las laderas de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, se le ha clasificado como Lomerío Suave con Cañadas.

Por último, al sureste de la Ciudad de Puebla se tienen sedimentos calcáreos parcialmente cubiertos por tobas, a los cuales se les clasifica como Lomeríos Suaves de Sedimentos.

#### IV.1.2 GEOMORFOLOGIA

La Geomorfología es la descripción y análisis de las formas del relieve y procesos que lo cambian en el espacio y tiempo. Estos procesos se dividen en dos grandes grupos: Endógenos y Exógenos. Los Primeros son todos aquellos que se originan de fuerzas provenientes del interior de la Corteza Terrestre, tales como diastrofismo y vulcanismo. Los procesos Exógenos son aquellos como intemperismo y erosión que son el resultado de procesos externos.

#### PROCESOS ENDOGENOS

A grandes rasgos, los procesos endógenos que han actuado en el área participando en la creación del relieve son dos principalmente: el vulcanismo y la tectónica.

Al vulcanismo se debe la gran cantidad de estructuras volcánicas que van desde los grandes estratovolcanes (La Malinche, Popocatepetl e Iztaccíhuatl) hasta los pequeños conos volcánicos y las emisiones de materiales piroclásticos, sin olvidar los grandes derrames basálticos como el que se presenta al oeste de la Ciudad de Cholula.



Al segundo creador del relieve, se deben las elevaciones al sureste de la Ciudad de Puebla. Estas prominencias no son otra cosa que los sedimentos marinos que fueron plegados y levantados durante la Revolución Laramídica. Otras formas producidas por el diastrofismo son las mesetas formadas por fallas que se encuentran al norte y sur de la Ciudad de Tlaxcala.

#### PROCESOS EXOGENOS

Todas las formas del relieve producto de los procesos endógenos permanecerían intactas si no actuaran sobre ellas los agentes modeladores del paisaje, los cuales han actuado en el área modificando la forma original del mismo.

Uno de los rasgos más notorios dentro del paisaje son los abanicos en las laderas de la Malinche, que forman parte del pie de monte, el cual, también es producto de estos agentes modeladores. Estas formas del relieve son producto de la erosión y el transporte de los materiales que forman a la Malinche.

Un agente muy activo son los ríos que escurren a lo largo y ancho del valle y que lo van rellenando de materiales que transportan. Estos materiales provienen de las elevaciones que circundan el Valle.

Al norte, los procesos exógenos han actuado redondeando o suavizando las formas de los escarpes producto de las fallas Malinche y Tlaxcala, así mismo, han producido cañadas perpendiculares a la traza de la falla.

Por último mencionaremos que estos procesos han estado muy activos removiendo la cubierta de tobas que tenían las calizas al sureste de Puebla, así como disolviendo a estas últimas.

El volcán de La Malinche no es el único que ha sufrido el ataque de los procesos modeladores sino todas las formas volcánicas, unas en menor grado que otras debido a la edad de cada una de ellas. Lo anterior es un aspecto muy importante, ya que nos permite determinar una edad relativa para las diferentes estructuras volcánicas de acuerdo con el grado de destrucción que presenten, es decir, aquellas que conservan sus formas originales casi intactas serán más jóvenes y aquellas cuyas formas primarias estén más destruidas serán más viejas.

#### IV.2 ESTRATIGRAFIA.

Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio son las calizas del Cretácico Superior que tentativamente se han correlacionado con la Formación Maltrata que aflora en los Valles de Maltrata y Acultzingo, descansando discordantemente sobre esta unidad se tiene a las rocas Andesítico-Basálticas que se les ha asignado una edad del Terciario Medio y las rocas andesíticas del volcán La Malinche de una edad Terciario Medio-Superior.

Durante el Terciario Superior se formaron los depósitos lacustres al mismo tiempo que se inicia la formación del pie de monte de los estratovolcanes, producto de conos de deyección o abanicos aluviales interdigitados con flujos de lodo y brechas.

En el Terciario Superior-Cuaternario ocurren los derrames de Andesitas-basálticas que en el Cuaternario son cubiertos por tobas arenosas de color café.

En el Cuaternario se tiene la formación del travertino en lo que ahora es la Ciudad de Puebla, así como los depósitos aluviales recientes.

## CRETACICO

### Cretácico Superior Formación Maltrata (Kmt)

Los afloramientos de estas rocas calcáreas se localizan hacia el sureste de la Ciudad de Puebla, en donde forman parte de lo que se conoce como Serrijón de Amozoc. Esta Formación consta de Calizas compactas, arcillosas, de color claro a gris oscuro con bandas y nódulos de pedernal, presentan interestratificaciones de lutitas, hacia la parte superior las calizas se tornan más arcillosas. Se calcula que tienen un espesor de 300 a 400 metros, pero en el área de estudio no se pudo observar sus límites. Los estratos tienen espesores muy variables, predominando los de 50 cm, se encuentran intensamente plegados y fracturados. Las calizas son bastante duras y presentan una fractura concoidea, su textura va de Mudstone a Wackstone, aunque se llega a tener Packstone, es decir, son de textura microcristalina y a veces criptocristalina.

Dos kilómetros al sur del poblado de Chachapa presentan un color gris al fresco y blanco al intemperismo, huellas de disolución (lapiáz o lenar), estilolitas paralelas a la estratificación, pedernal en forma lenticular de unos dos metros de largo y 15 centímetros de espesor. El espesor de los estratos en este punto es de 50 cm. en la parte inferior y 1 a 1.5 metros hacia arriba. Presentan textura Wackstone.

Al norte de Santo Tomás Chautla, esta unidad se presenta con color gris claro en estratos gruesos a muy gruesos y con gran cantidad de bandas y nódulos de pedernal negros.

Aproximadamente a 3 km. al norte del poblado de San Francisco Totimehuacan en el río La Malinche, la unidad está representada por calizas en estratos delgados a gruesos, se presentan con una estructura laminar con gran cantidad de bandas y nódulos de pedernal negro.

A dos kilómetros de Santo Tomás Chautla por la terracería que va de este poblado a Santa Cruz Alpuyea (punto 24) la unidad está compuesta por estratos de calizas intercalados con calizas arcillosas. Las calizas son de color gris a gris claro, fractura

concoidea, presentan bandas y lentes de pedernal con espesor de 4 a 8 centímetros, los estratos van de 15 a 50 centímetros de espesor y presentan textura Wackstone.

Los estratos más arcillosos van de textura mudstone a calizas arcillosas (margas), el espesor de los estratos es de 5 a 10 centímetros.

Hacia la parte superior la unidad se hace más arcillosa, encontramos estratos de caliza arcillosa intercalada con estratos de arcilla de color gris claro, fácilmente deleznable.

El contenido de pedernal en esta unidad nos indica que estos materiales fueron depositados en un ambiente de cuenca marina. Esta unidad se encuentra probablemente descansando sobre otras unidades calcáreas más antiguas y esta soportando los derrames andesítico-basálticos del Terciario Medio y Superior.

## TERCIARIO

### Terciario Medio, Volcánico Andesítico-Basáltico (Tman)

Hacia el suroeste de la Ciudad de Puebla y al sur de Cholula, afloran rocas volcánicas de tipo lávico, las cuales han sido fuertemente erosionadas al grado que ya no se pueden reconocer sus estructuras originales (conos volcánicos, derrames, etc.). Esta unidad consta de andesitas de color gris oscuro, de textura afanítica-porfirítica y de andesitas basálticas de color café rojizo a rojo vino de textura afanítica. Esta unidad altamente fracturada descansa discordantemente sobre las calizas cretácicas.

Existe un banco de material localizado entre los poblados de Santa Martha Hidalgo y San Bernardino Chalchihucán al sur de Cholula, en el cual, las rocas de esta unidad presentan una textura afanítica, color gris oscuro al fresco y negro verduzco al intemperismo en la parte superficial, pero a unos 20 o 30 metros de profundidad, en la obra, se presentan con un color café rojizo a rojo vino. Los minerales presentan cierta orientación que le da un aspecto de fluidez. Estas rocas fueron clasificadas como andesitas.

A unos 300 metros del afloramiento anterior, se presentan con una coloración rojo rosáceo. Estos dos afloramientos se presentan sobre la nueva carretera Federal Puebla-Atlixco, a unos 12 kilómetros de la Ciudad de Puebla.

Estas rocas han sido designadas como Lava Ixcalo según Malde (1968). Por el contenido de minerales son fenoandesíticas olivínicas y según dos análisis químicos, una leucocuarzoandesita y una andesita olivínica (Von Erffa, Klaus, Knoblich, Weyl y Hilgwer 1978).

### Terciario Medio-Superior Volcánico de La Malinche (Tmsm)

Las rocas volcánicas que constituyen el volcán de La Malinche son una serie de derrames andesíticos parcialmente cubiertos por tobas. Estos materiales se encuentran afectados por diversas fallas y fracturas que han destruido la forma original de estos derrames. Al parecer, en un tiempo estuvieron afectados también por glaciares.

Estas rocas varían desde las andesitas de color gris oscuro y textura afanítica, hasta las andesitas de color gris claro y textura porfídica. Estas últimas presentan un color gris claro-blanco con fenocristales de plagioclasas, anfíboles y piroxenos.

Knoblich, Von Erffa, Hilger y Weyl (1978), clasifican las rocas tipo Malinche como dacitas, Leucocuarzoandesitas, Leucoandesitas. Minerales típicos: Hornblenda y Biotita.

En otros trabajos han sido clasificadas como andesitas con fenocristales de Oligoclasa y Augita (Manuel Reyes Cortés 1979).

### Terciario Superior Lacustre (Tslac)

Por los perfiles de pozos perforados en el Valle de Puebla se sabe que los sedimentos lacustres descansan en forma discordante sobre rocas andesíticas y se encuentran infrayaciendo a tobas y lavas del Cuaternario.

Esta unidad aflora en las mesetas originadas por las Fallas Malinche y Tlaxcala, es decir, al norte de la Ciudad de Tlaxcala y al sur de la misma, a la altura del poblado de Zacualpan y Santa Isabel Tetlatlahuaca.

Estos sedimentos lacustres son materiales piroclásticos granulares que fueron depositados en lagos. Predominan los sedimentos arcillosos sobre los materiales arenosos. La coloración de estos materiales va del gris claro al gris claro verdoso.

Los materiales más finos son materiales piroclásticos depositados en lagos y los de clastos más gruesos (lentes y estratos de arenas) son productos de erosión de los materiales volcánicos que ya existían en el área (principalmente tobas).

La presencia de estratos arcillosos verdes en los que se ha formado el mineral "nontronita" nos ayuda a deducir que la sedimentación tuvo lugar en agua salobre (Von Erffa, Knoblich, 1978).

Debido a la falta de fósiles se les asigna una edad relativa de acuerdo a su posición estratigráfica, del Plioceno.

A dos kilómetros al suroeste del poblado de San Felipe Ixtacuixtla, por la terracería que va a San Joaquín, se presenta en un afloramiento un paquete de pómez de color café claro al intemperismo a blancos al fresco, no están muy consolidados y se observan fragmentos negros de obsidiana, la estratificación en estos materiales no está bien definida, el tamaño de los clastos varía de 1 a 5 mm, presentan redondeamiento que va de subangulosos a subredondeados. Existe cierta gradación, ya que los clastos más gruesos se presentan en la parte inferior.

Siguiendo por esta terracería, 500 metros después, hay una barranca a la derecha del camino, donde se encontró un afloramiento de sedimentos perfectamente estratificados, con estratos de 10 a 20 cm de espesor, con una coloración gris claro al fresco y gris oscuro al intemperismo, estos materiales se encuentran muy fracturados y cubiertos por tobas. Los estratos están constituidos por limos bien consolidados a los cuales se les pudieron tomar datos estructurales de rumbo N 82 E con un buzamiento de 14 grados al sureste.

Los sedimentos limosos poco consolidados de color gris claro a blanco al fresco y gris verdoso al intemperismo, de grandes espesores (se observan cortes de mas de 150 metros) son los sedimentos lacustres predominantes, estos materiales presentan estratificaciones y lentes arenosas, afloran a lo largo de la carretera Sn. Martín Texmelucan-Tlaxcala en los poblados de Sn. Antonio Tecocac, Techachalco, Totolac y en los cerros al norte de la Ciudad de Tlaxcala. Estos materiales también afloran a lo largo del escarpe producido por la Falla Malinche en los poblados de San Miguel Xochitecatitla, Nativitas y Zacualpan, donde también tienen espesores importantes y ocasionalmente están cubiertos por derrames de basaltos como en el poblado de San Miguel Xochitecatitla y Tepeyanco.

#### Terciario Superior-Cuaternario Volcánico Andesítico-Basáltico (TsQab)

Esta unidad está constituida por derrames lávicos y conos volcánicos de composición andesítico-basáltica, estos materiales afloran principalmente al sur de Amozoc y al sureste de la Ciudad de Puebla.

Estos materiales se encuentran descansando discordantemente sobre las rocas calcáreas del Cretácico Superior y sobre la ladera norte del volcán Matlalcuéyatl. Presentan fuerte erosión, pero aun se pueden observar las estructuras volcánicas que los forman, tales como derrames y conos, estos últimos compuestos por brechas volcánicas básicas y escorias, así mismo, en algunos casos se pueden observar las formas de los derrames, aunque estos últimos casi siempre están cubiertos por materiales piroclásticos más jóvenes.

El cerro la Cocotera, que pertenece a esta unidad, se localiza a 3 kilómetros al oeste de Santa Cruz Alpuyecá, está formado por lavas y brecha volcánica básica con un color rojo al intemperismo y negro al fresco. Esta estructura volcánica tiene su parte inferior y los derrames lávicos cubiertos por tobas cuaternarias.

Se presentan grandes bloques de basalto con vesículas pequeñas, estos bloques presentan un color negro.

La mesa Calderón y el Cerro Huaxo que se localizan al este de San Francisco Totimehuacan y Santo Tomás Chautla a 5 y 2 kilómetros de distancia respectivamente, también pertenecen a esta unidad; los conos volcánicos de ambos están constituidos por brecha volcánica básica que presenta un color negro al fresco y rojo al intemperismo. Este material es altamente poroso debido a la gran cantidad de vesículas que presenta. En este lugar se encuentran sobreyaciendo discordantemente a las calizas del Cretácico.

Otros materiales que presentan las mismas características y que forman parte de esta unidad son: Cerro Tlmacas, Cerro Sosocala, Loma Los Muertos, Cerro Tlatague, Cerro Astepec, etc.

#### Cuaternario Volcánico Andesítico-Basáltico (Qvab)

Esta unidad la separamos de la anterior por ser mas joven, para ello nos basamos en las expresiones morfológicas que presentan sus estructuras. A diferencia de la unidad anterior, las estructuras tales como conos volcánicos y derrames lávicos conservan perfectamente sus formas originales, lo cual es un rasgo inequívoco de que han estado menos tiempo expuestos a agentes físicos como el intemperismo y la erosión.

Dentro de esta unidad incluimos los derrames y conos de composición básica distribuidos por toda el área.

Estos materiales cubren en forma discordante a las andesitas terciarias, a las calizas Cretácicas y a los sedimentos lacustres. Afloran al este de Cholula, al este, norte y oeste de Puebla, en la ladera Occidental de la Malinche y en las mesetas al norte y sur de la Ciudad de Tlaxcala. La unidad esta compuesta por basaltos y andesitas-basálticas con pocas variaciones en cuanto a textura y composición en los diferentes afloramientos, son de color gris oscuro a negro con algunas vesículas, los derrames son bastante fluidos.

En el poblado de San Felipe Ixtlacuixtla se encuentra un derrame de basaltos color negro, con vesículas alargadas que presentan cierta orientación, se encuentra parcialmente cubierto por tobas, tiene textura afanítica. Otros dos derrames con las mismas características se localizan al este de la Ciudad de Tlaxcala, en el poblado de Techachalco y en Santa Justina Ecatepec.

En el escarpe de la Falla Malinche en la zona Centro sur del área de estudio, al norte de Zacualpan y Tepeyanco, afloran dos derrames de composición básica de color negro sobreyaciendo a los sedimentos lacustres y cubiertos por tobas. Ambos derrames presentan un espesor de 10 a 15 metros aproximadamente, presentan textura afanítica, color gris y no presentan vesículas.

Cinco kilómetros al este de Santa María Moyotzingo se encuentra una brecha volcánica básica con fragmentos que van de unos cuantos centímetros hasta un metro de diámetro aproximadamente, esta brecha tiene un espesor aproximado de 15 metros, con una coloración negra al fresco con tonos rojizos cuando está intemperizado, los fragmentos son angulosos y presentan abundantes vesículas, se encuentra cubriendo a los sedimentos lacustres.

El poblado de San Miguel Papaxtla a 9 kilómetros al sur de Huejotzingo, se encuentra sobre un derrame de basalto coronado por el Cerro Tecajete, el cual está compuesto de brecha volcánica básica.

El derrame presenta una forma aplanada de 3 kilómetros de ancho por 4.5 kilómetros de largo, de color gris oscuro a negro, textura afanítica porfirítica y cristales de olivino de 1 a 2 mm de diámetro. Este basalto de olivino presenta estructuras acordonadas y vesículas. Su espesor estimado es de 15 a 20 metros y se encuentra muy fracturado.

En la parte extrema, al sureste, se localiza un extenso derrame básico de color negro, en el centro de este derrame hay un cono de brecha volcánica básica. Este derrame presenta lavas cordadas y vesículas alargadas orientados en la dirección del flujo.

Otros afloramientos de esta unidad los encontramos en la Ciudad de Puebla, en sus alrededores y a lo largo de la carretera que va a Amozoc.

#### Cuaternario Piroclástico-Continental (Qpc)

Sin tomar en cuenta el Aluvión, este complejo piroclástico es el que cubre mas área que cualquier otra unidad. Lo encontramos rodeando la parte alta de La Malinche, cubriendo la parte baja de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, cubriendo la parte sur del Valle y parcialmente a las calizas cretácicas, así como a los sedimentos lacustres en el norte y Centro del área.

Esta unidad varía en composición y espesor, se consideró también dentro de ella a la cubierta superficial.

En general se encuentra formada por arenas, limos, arcillas y tobas. Los tres primeros son materiales piroclásticos retrabajados por agua y viento y modificados por los procesos de

meteorización y formación de suelos.

Por su extensión y abundancia, este complejo piroclástico se encuentra sobreyaciendo a las calizas Cretácicas, a las andesitas de La Malinche, a las andesitas basálticas del sur de Cholula, a los sedimentos lacustres y en ocasiones a las rocas volcánicas cuaternarias. A su vez se encuentra cubierta por algunos derrames basálticos recientes, por el travertino y por el aluvial, se le calcula una edad del Plioceno Superior.

En el área de San Martín Texmelucan la unidad está formada por tobas de color café claro, interdigitadas con pequeños derrames de basalto, depósitos de arcillas, limos y arenas gruesas y finas de origen aluvial. A tres kilómetros de San Martín Texmelucan, por la carretera San Martín Texmelucan-Tlaxcala (punto de verificación # 1) se presenta en forma de lomeríos suaves constituidos por tobas café amarillento poco consolidadas que presentan lentes y horizontes de materiales terrígenos de origen volcánico de color café oscuro, granos con cierto redondeamiento (subredondeados), poco consolidados y de tamaño de arenas gruesas y gravas.

Ochocientos metros al este de San Felipe Ixtacuixtla, a un lado de la carretera, (punto 5 de verificación) se presenta un material de color café cuyos fragmentos subangulosos tienen tamaños que varían de arenas gruesas a gravas. Estos materiales están bastante consolidados.

Se presenta variación en las características del material de esta unidad en los afloramientos de la parte sur y sureste, donde predominan las tobas arenosas de color café claro (más claro que en la parte norte).

En los lomeríos al sur de Tlaxcala la unidad está representada por arenas de color café claro con fragmentos de subredondeados a redondeados con un alto contenido de material tobáceo. El tamaño de las arenas varía de mediano a fino. Como en otros afloramientos de esta unidad existen lentes de arena gruesa y grava.

En general podríamos decir que el material forma lomeríos con pendientes suaves y presenta, en conjunto, forma masiva, tiene cierta tendencia horizontal siguiendo la topografía de los materiales sobre los que descanza.

#### Cuaternario Travertino (Qt)

Dentro del área de estudio este material únicamente se presenta en la Ciudad de Puebla y sus alrededores. Esta zona está ligada al área donde se presentan las rocas calcáreas cretácicas en donde las aguas con ácido carbónico han disuelto la cal, habiéndola precipitado nuevamente sobre la superficie terrestre, en los lugares donde esta agua aparece en formas de manantiales.



El travertino, se encuentra en la Ciudad de Puebla en canteras de una profundidad de 12 a 15 metros, se aprovecha principalmente en la industria del cemento.

Los travertinos se desarrollaron después del Pleistoceno Tardío ya que en ninguna parte están cubiertos por tobas o sedimentos de tobas de la unidad Cuaternario Piroclástico-Continental (Qpc).

Según Werner, la formación de estos travertinos aun no ha terminado, sino por el contrario ésta continúa. Por ejemplo en Agua Azul cerca de Puebla, Río Atoyac cerca de Atoyatempan y Molcaxac, en el "Puente de Dios" y en las galerías filtrantes entre Tepeaca y Acatzingo.

Estos travertinos presentan un color café muy claro, es poroso, los campesinos lo conocen con el nombre de "piedra de agua", debido a que poco después de la conquista excavaron socavones profundos en forma horizontal de manera que el agua se colectó en forma central ("Galerías Filtrantes") y se pudo regar sistemáticamente, este sistema aún es utilizado.

#### Cuaternario Volcano-Sedimentario (Qvs)

Esta unidad está compuesta por gravas, brechas, arenas y conglomerados. Estos materiales son fragmentos de origen volcánico que han sido transportados y depositados por corrientes fluviales, gravedad y por deshielos de los glaciares (Corrientes de lodo).

V. Erffa y Hidger (1977) describen las corrientes de lodo que aparecen en las laderas de La Malinche y el Popocatepetl como "depósitos caóticos de origen volcánico. Se componen de una mezcla de cantos rodados de distintos tamaños en un conjunto caótico de sedimentos arcillosos hasta bloques del tamaño de una casa". En la literatura estos materiales también son denominados "Lahares", nombre que se usa en el Sudeste de Asia. Heine (1975) clasifica a los lahares en el grupo de brechas volcánicas y los describe como "con matriz de toba que se moviliza mediante agua y fuerza de gravedad", por lo que el material de lahares se encuentra en los valles.

Los lahares, como se dijo antes, aparecen en las faldas del volcán Matlalcuéyatl, en las laderas al sureste de Chachapa.

Dos kilómetros al este de San Luis Teolocholco, en la Barranca Lecontitla, Marcoxtla y Huentepec, estos materiales se presentan como una alternancia de gravas, arenas y tobas de color café, los fragmentos van de semiangulosos a angulosos, existen clastos desde gravas hasta bloques de 50 centímetros de diámetro. Estos materiales están distribuidos en forma caótica, es decir, no hay ninguna continuidad en los horizontes y lentes que se presentan. En este punto (10 y 10') predominan los limos y arcillas. Los fragmentos son de composición andesítica, en la

parte superior hay una cubierta de toba arenosa de unos tres metros aproximadamente.

En la parte media y baja de las laderas del volcán la Malinche la unidad esta representada por materiales eluviales y aluviales (conos de deyección) producto de la desintegración y del transporte de los materiales volcánicos. Estos materiales se encuentran cubriendo los flujos de lodo que se aprecian en las barrancas.

Esta unidad también se presenta en la Barranca San Diego, Los Alamos al sureste de Chachapa, donde se encuentran cubierta por materiales aluviales con clastos más redondeados y estos a su vez con una cubierta de suelo.

El espesor de estos materiales como es de suponerse varía teniendo en algunas partes más de 150 metros, como en el poblado de Muñoztla, en la falda de la Malinche, en donde se perforó un pozo de más de 150 metros.

Con seguridad se encuentran corrientes de lahares de diferentes edades en el Popocatepetl y en el Iztaccíhuatl, los cuales aparecen al sur del área en la punta sur del Pedregal de Nealtican. Estos depósitos se encuentran cubiertos por tobas en toda la zona occidental al oeste de Huejotzingo, San Martín Texmelucan y San Buenaventura Nealtican.

Esta unidad cubre en forma discordante a las rocas andesíticas del Iztaccíhuatl y La Malinche y muy probablemente llegue a interdigitarse lateralmente hacia el Valle con los depósitos lacustres ya mencionados, aunque esto no se puede verificar debido a que en el Valle la unidad se encuentra cubierta por arenas y material tobáceo reciente.

Después de la depositación de los Lahares en el Terciario Superior, hubo una fase de emparejamiento por erosión y acumulación que aún no ha terminado y que se puede observar en cada período de lluvia, una evidencia de esto son los abanicos aluviales que se observan en las laderas de la Malinche, estos abanicos aluviales se encuentran cubriendo e interdigitados con los flujos de lodo en la parte media y baja de la Malinche.

A un material semejante al de esta unidad, localizado en el lado oeste del Iztaccíhuatl, Mooser, (1960) le denominó Formación Tarango con una edad del Terciario Superior.

#### Cuaternario Aluvial (Qal)

Estos depósitos se originan por erosión. Estos materiales son depositados en la parte central del área de estudio por las corrientes fluviales. Las cuencas y/o las zonas topográficamente más bajas son las regiones donde se acumulan estos materiales. Estas zonas están rodeadas por sus regiones correspondientes de abastecimiento de sedimentos, que son los estratovolcanes, lomas

de tobas, derrames lávicos y lomas de rocas calcáreas. La mayoría del material se origina de los sedimentos sueltos volcanoclásticos del Pleistoceno.

La Sierra Nevada y la Malinche entregan, en la zona central, el material aluvial que rellena esa zona.

Estos depósitos están formados principalmente de arenas y limos y secundariamente de arcillas y gravas no consolidadas, el espesor de estos materiales varía desde 1 metro hasta mayores de 20 metros. Se le asigna una edad Cuaternaria, ya que está sobre los otros materiales antes descritos.

#### IV.3 TECTONICA Y GEOLOGIA ESTRUCTURAL

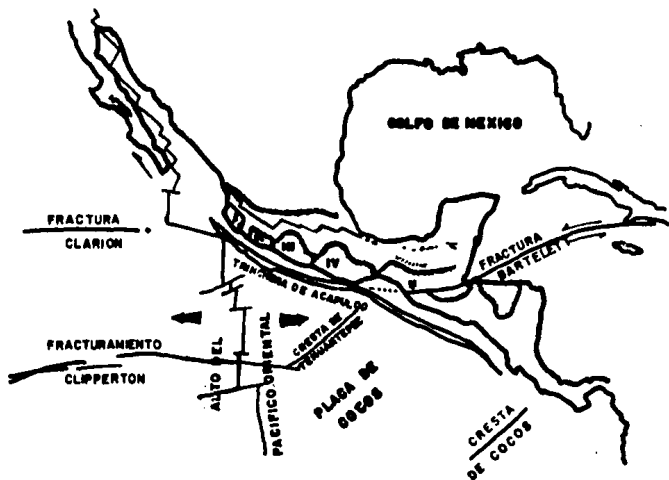
##### IV.3.1 TECTONICA MAYOR O CONTINENTAL

La era geológica denominada Cenozoico se caracteriza por la extraordinaria actividad volcánica. Aparentemente hay una conexión directa entre dicho vulcanismo y el movimiento de los continentes y los fondos oceánicos que los circundan.

El modelo tectónico a escala continental que es ahora válido para el caso de la República Mexicana es el siguiente: el Alto del Pacífico Oriental, siendo la zona de creación y expansión de la corteza marina, se extendía durante el Terciario Inferior en dirección norte-sur en el Océano Pacífico, muy al oeste del Continente Norteamericano. A lo largo de las costas existía una trinchera, en la cual la corteza marina se hundía, produciendo un vulcanismo inicial dentro del continente. Dicho vulcanismo fue principalmente riolítico y cubrió gran parte del sur y oeste de México.

A mediados del Terciario, el Alto del Pacífico Oriental se introdujo debajo del continente, en la región de Puerto Vallarta, reduciendo así la antigua trinchera únicamente a su tramo meridional, la moderna Trinchera Mesoamericana, la cual también recibe el nombre de Trinchera de Acapulco ( Figura IV.1). En ese momento nació, a consecuencia del hundimiento de la Placa de Cocos en dicha trinchera, el vulcanismo del sur de México, expresándose primero en el vulcanismo oligocénico de la Faja Temascaltepec - Taxco - Oaxaca y más tarde en aquel de la moderna Faja Volcánica Transmexicana, que también recibe el nombre de Eje Neovolcánico, que comenzó su actividad principal en el Mioceno (Figura IV.2).

Es apenas en el Plioceno que se produjo la separación de Baja California de la masa continental mexicana, ocurriendo esto a lo largo de una zona de debilidad cortical, que probablemente representaba la prolongación, al noroeste de aquella zona mayor en el sur, en la que se desarrolló el Eje Neovolcánico. Al comparar los alineamientos que describe el Alto del Pacífico Oriental en el Mar de Cortés con el fracturamiento fundamental



**BLOQUES CRATONICOS**

- I BLOQUE DE JALISCO
- II BLOQUE DE MICHOACAN
- III BLOQUE DE GUERRERO
- IV BLOQUE DE OAXACA
- V BLOQUE DE CHIAPAS


**FAJA VOLCANICA  
TRANSMEXICANA**

Segun Meeuw, 1975

UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
	ESTUDIO GEOHIDROLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.
TECTONICA	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA. RODRIGO MALDONADO VILLALON.	
FIG. IV. I	1991



- I FVM Occidental
- II FVM Oriental
- III Fosa de Colima

Según Moser, 1973

UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA
	DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESTUDIO GEOLÓGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.	
EJE NEOVOLCANICO	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ NICHACA, RODRIGO MALDONADO VILLALON.	
FIG. IV.2	1991

del Eje Neovolcánico, se nota una coincidencia marcada: ambas reflejan probablemente el mismo fracturamiento antiguo, posiblemente Precámbrico, común a toda la masa continental de México, que se desarrolla en elementos dirigidos al noroeste y noreste. En el Eje Neovolcánico este fracturamiento está evidenciado por la distribución de las chimeneas volcánicas, que lo aprovechan en su ascenso a la superficie, y la expansión cortical termal acompañante; en el Mar de Cortés se revela porque a lo largo de estas debilidades se quiebra el continente y se separa la Península de Baja California.

#### IV.3.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL Y TECTONICA DEL AREA

El "Valle de Puebla" es una Cuenca exorreica (debido a que tiene salida al mar). Esta cuenca se formó debido a la emisión de los materiales volcánicos que forman la Sierra Nevada al oeste y el Volcán La Malinche al este. Dichas emisiones formaron una planicie central, la cual se encuentra interrumpida al norte de la Ciudad de Tlaxcala por una serie de Mesetas.

Estas formas del relieve deben su origen a la Falla de orientación este-oeste conocida como Falla Tlaxcala, otras prominencias en forma de mesetas se presentan entre la Ciudad de Tlaxcala y Santa Inés Zacatelco. Las cuales deben su origen a la Falla Malinche, que tiene una orientación este-oeste.

Así mismo, el Valle tiene un gran número de aparatos volcánicos que presentan cierta alineación o fracturas con orientación este oeste.

Como se puede observar, el principal sistema de fracturas en el área tiene una orientación este-oeste, lo integran fallas normales que forman un sistema de fallas escalonadas con la parte más profunda situada en el centro del valle a la altura de Santa Inés Zacatelco. Esta Fosa tectónica o Graben, se encuentra relleno por materiales lacustres, volcánicos (piroclastos y derrames de lava) y clásticos principalmente.

Al sur de la Ciudad de Puebla se presentan rocas calcáreas plegadas y muy fracturadas formando un anticlinal, estas rocas deben su plegamiento a los esfuerzos compresivos que sufrieron durante la Revolución Laramídica.

En la parte media y baja de las laderas del volcán La Malinche, la unidad está representada por materiales eluviales y abánicos aluviales o conos de deyección.

#### Fracturamientos

Uno de los rasgos característicos del Eje Neovolcánico es su sistema básicamente ortogonal de fracturas, que controlan el ascenso de los magmas dentro de la corteza y rigen la formación de fosas y pilares en todo su espacio. Este sistema de fracturamiento está constituido por dos sistemas principales, uno

de orientación NE-SW y el otro NW-SE. Este fracturamiento ha impuesto su sello al desarrollo de la Faja Volcánica Transmexicana, la cual obedece en su recorrido zigzagueante a través del continente a sus direcciones en detalle (Fig IV.3).

Existe otro fracturamiento llamado fracturamiento de los grandes volcanes que se desarrolla en la parte central y oriental del Eje Neovolcánico; se le denominó de esta manera porque sus elementos dirigidos de este-oeste controlan en parte las chimeneas del Nevado de Toluca, Popocatepetl, Malinche y Pico de Orizaba.

#### Transcurrencias

Los desplazamientos horizontales a lo largo de Fallas (transcurrencias) son fenómenos que ocurren con cierta frecuencia en el Eje Neovolcánico, llegando a medir hasta varios kilómetros. Dentro de los dos sistemas de fracturas que forman el fracturamiento fundamental del Eje Neovolcánico, aquel cuya orientación es NE-SW cobra especial importancia gracia a tales transcurrencias, sobre todo a su porción central y oriental, donde se verificaron estas en el Mioceno Medio y antes.

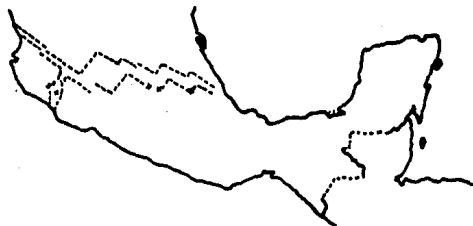
Abundan los desplazamientos horizontales en el espacio entre los volcanes del Nevado de Toluca y el Pico de Orizaba. Este fenómeno es perfectamente visible en las fallas al sur y este de la Malinche, donde anticlinales del Cretácico sufren transcurrencia de hasta un kilómetro a la derecha (fig IV.4).

De una manera general es posible definir dentro del zigzagueo fundamental del Eje Neovolcánico los tramos dirigidos al noreste como zonas de transcurrencia y los tramos dirigidos al noroeste simplemente como áreas de fracturamiento.

#### IV.4 GEOLOGIA HISTORICA

Durante el Cretácico Superior el área de estudio se encontraba sumergida bajo el mar, durante este período se depositaron los lodos calcáreos y arcillas que dieron lugar a la Formación Maltrata, por la presencia de nódulos de pedernal deducimos que era un ambiente de cuenca.

Durante el cierre del Cretácico, la serie de movimientos tectónicos que recibe el nombre de Revolución Laramídica (que dió lugar a la Sierra Madre Oriental) plegaron y levantaron estos materiales que ahora forman el Serrijón de Amozoc al este de Puebla y sur de Amozoc. En estas prominencias, el arrumbamiento de los ejes se desvía del rumbo general de la Sierra Madre Oriental, formando un arco abierto hacia el sur. Según Salazar M. (1970) y Gutiérrez H. (1971), la desviación del arrumbamiento se explica por la expansión del basamento, que llegaba como "Península de Oaxaca" hasta la zona de Puebla, e influyó en el curso de los pliegues. El plegamiento de los estratos mesozoicos tuvo lugar en la Orogénesis Laramídica, que durante el Terciario



\* Volcanes Grandes  
 Principales Sistemas de Fracturamientos  
 del Eje Neovolcánico

Según Massey, 1979

UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA
	DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.	
PRINCIPALES SISTEMAS DE FRAGT.	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA.	
RODRIGO MALDONADO, VILLALON	
FIG. IV.3	1991





Inferior-Medio había concluido en su mayor parte.

Durante el terciario Medio se inicia la actividad volcánica asociada a los sistemas de fracturamiento noreste-suroeste y norte-sur, dando lugar a La Malinche, la Sierra Nevada y las andesitas del sur de Cholula.

Con la formación de estas estructuras volcánicas, junto con el Serrijón de Amozoc, se formó una cuenca endorréica en la que durante el Terciario Superior se depositaron los sedimentos lacustres que afloran en el norte y centro del área.

Durante este lapso, tenía lugar la formación de los materiales volcánicos que encontramos cubriendo las andesitas de La Malinche, estos materiales son depósitos aluviales y flujos de lodo, estos últimos mas angulosos y peor clasificados que los primeros y producto de deshielos de antiguos glaciares.

Las fallas Malinche y Tlaxcala tuvieron lugar después del depósito de los materiales lacustres y continentales-volcánicos de La Malinche. Según Mooser (1972) esto ocurrió durante el Plioceno-Cuaternario Inferior.

Durante el Terciario Superior se Produce la emisión de materiales andesítico-basáltico asociado principalmente al fracturamiento este-oeste.

El proceso de fracturamiento continuó y dió origen a nuevas emisiones de lavas, de escorias y de cenizas de composición basáltica que formaron los conos más recientes que cubren casi en su totalidad el área de estudio.

#### IV.5 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

La descripción de las características hidrogeológicas de las rocas existentes en el área de estudio que se presentará a continuación se basa en observaciones directas, así como en la información contenida en estudios y levantamientos anteriores.

En la cuenca se encuentran las aguas subterráneas en las cenizas, arenas volcánicas y sedimentos lacustres como agua de poros y deben extenderse a gran profundidad a un cuerpo de aguas de profundidad uniforme. En las afueras de la cuenca aparecen aguas subterráneas de poros en las gravas arenosas de las faldas de La Malinche. Agua de fracturas se encuentra en rocas volcánicas compactas y en calizas cretácicas al sur de Amozoc.

## Unidades Acuíferas

Las unidades acuíferas son aquellas que contienen agua y tienen la capacidad de cederla en cantidades considerables. Las unidades que cumplen con estas características dentro del área de estudio son las calizas del Cretácico Superior (Kma), los sedimentos lacustres (Tslac) del Terciario Superior, el Terciario Superior-Cuaternario y volcánico andesítico Basáltico (TsQab y Qvab) y el Cuaternario volcano-sedimentario (Qvs).

### Cretácico Superior Calizas (Kma)

Las calizas, calizas arcillosas y lutitas del Cretácico Superior que se encuentran expuestas en la porción sureste del área de estudio en el Serrijón de Amozoc se consideran permeables debido a la porosidad secundaria adquirida por fracturamiento, alteración y disolución, dando lugar a depósitos subterráneos de bajas permeabilidades y a pequeños manantiales.

Se cree que el agua se infiltra a través de las fracturas y cavidades de disolución, así como entre sus planos de estratificación.

La presencia de los manantiales nos indica que el agua es captada, en la superficie expuesta de esta unidad, para después seguir por las grietas hasta aflorar en algún manantial, como los que hay al sur de Amozoc y al este de Santa Cruz Alpuyeca, o bien almacenarse en zonas más profundas, se considera que tiene posibilidades a profundidad.

### Terciario Superior Lacustre

Esta unidad se encuentra expuesta principalmente en los escarpes producidos por las fallas Malinche al centro del área y la falla Tlaxcala cuya traza se localiza al norte de la Ciudad de Tlaxcala con una orientación este-oeste.

Esta unidad debido a su carácter litológico y a que contiene agua de poro se le considera como acuífero. La unidad no es homogénea, y en los lugares donde presenta lentes impermeables de arcilla le da al acuífero un carácter de confinamiento o semiconfinamiento local.

En las partes donde aflora, la pendiente y sus lentes arcillo-limosos propician más el escurrimiento que la infiltración.

### Cuaternario volcano Sedimentario

Esta unidad se presenta principalmente en las estribaciones de la Malinche y la Sierra Nevada debido a su composición de gravas, arenas y conglomerados y a su baja consolidación, además de ser una unidad transmisora, es también muy buena productora cuando se encuentra por debajo del nivel freático como lo pueden atestiguar perfectamente los pozos perforados por la Comisión

Nacional del Agua (SARH) al este de San Miguel Contla y el Pozo en Muñoztla; las galerías filtrantes localizadas al noreste de Puebla y los pozos perforados al oeste y noroeste de Huejotzingo.

Terciario Superior-Cuaternario volcánico andésítico-basáltico  
y Cuaternario Volcánico Andesítico Basáltico  
(TsQab) y (Qvab)

Estas dos unidades las describiremos como una sola debido a que las características hidrogeológicas son muy semejantes.

Estas unidades se encuentran distribuidas por toda el área, presentan porosidad secundaria debido al alto grado de fracturamiento.

Estas unidades se consideran, cuando están sobre el nivel freático, como transmisoras ya que el agua que se infiltra por sus fracturas y brechas basales pasa hacia las rocas del subsuelo, las que a su vez la transmiten o almacenan y cuando están bajo el nivel freático ceden el agua que contienen en sus fracturas.

#### Cuaternario Aluvial

Esta unidad compuesta principalmente por arenas y en menor proporción gravas y arenas, aflora principalmente en el centro del valle y en la porción norte y noroeste del área de estudio.

En general es buena transmisora de agua debido a sus características litológicas, aunque ocasionalmente presenta lentes arcillo-limosos. Una consecuencia de estos lentes arcillosos son las cienegas que ocasionalmente se forman a lo largo de la carretera San Martín Texmelucan-Tlaxcala durante la época de lluvia.

Cuando esta unidad se encuentra bajo el nivel freático es buena productora, esto ocurre en la porción norte, donde alcanza también su mayor espesor.

#### Travertino

El travertino, por su porosidad primaria y secundaria funciona como transmisor y cuando esté bajo el nivel freático se considerará productor. Como sabemos, durante mucho tiempo se han explotado estos materiales por medio de galerías filtrantes.

#### Terciario Medio Superior Volcánico de La Malinche

Rocas de composición andesítica con porosidad secundaria producto de fracturamiento. Estas rocas tienen posibilidad de transmitir agua y si se encuentran bajo los niveles de saturación se les considera con posibilidad de contener agua en sus

fracturas . En los lugares donde la unidad no se encuentra muy fracturada actua como barrera impermeable del acuífero.

#### Cuaternario Volcánico Continental (Qpc)

Esta unidad tiene gran heterogeneidad en su comportamiento hidrogeológico, principalmente en la zona norte del área de estudio. En esta zona, la unidad está representada por tobas arenosas con gran contenido de limos y arcillas que le dan un carácter semipermeable, razón por la cual la transmisión y producción se vuelve bastante pobre. Estas características de la unidad dan lugar a la formación de lagunas, como la de Acuitlapilco. Además sobre esta unidad se han construido presas y bordos.

No obstante, existen pozos y norias en esta unidad que han resultado productores debido a los horizontes de tobas arenosas y arenas. En la parte sur del área la unidad esta formada principalmente por tobas arenosas y gravas, por ello funciona como productora cuando esta bajo el nivel freático, pero por su consolidación y contenido de arcillas no son lo suficientemente permeables como se desearía.

#### Unidades Acuífugos

##### Terciario Medio Andesítico-Basáltico

Las rocas de esta unidad afloran al sur de Cholula. Son rocas andesíticas de textura afanítica, características que la vuelven poco permeable. Presenta fracturamiento pero las fracturas no alcanzan gran profundidad y se encuentran generalmente rellenas de limos y arcillas. Todas estas características la vuelven poco permeable y por lo tanto con pocas posibilidades de contener agua.

## CAPITULO V

### GEOFISICA

#### V.1 INTRODUCCION

La implantación de algunos métodos de prospección geofísica a un estudio geohidrológico está en función del conocimiento de la geometría del sistema acuífero en cuestión.

De acuerdo con las características geológicas de la región, los contrastes en sus propiedades físicas y los objetivos que se persiguen en la investigación, se seleccionará el tipo de método geofísico a usar. Los resultados geofísicos se encuentran supeditados a la cantidad y calidad de información geológica disponible, ya que ésta permitirá calibrar los modelos derivados del proceso de interpretación, minimizando la ambivalencia de resultados.

Los métodos eléctricos son los más útiles para proporcionar información acerca de las características hidrológicas del subsuelo.

Las empresas I.T.S., S.A. y EXYCO realizaron estudios geofísicos utilizando el método de resistividad eléctrica en los años de 1984 y 1990 respectivamente, con esto se definieron las propiedades eléctricas de las rocas en diferentes puntos del área de estudio. En el presente trabajo se utilizaron y reinterpretaban esos datos a manera de representar las características litológicas y/o estructurales que se presentan en el subsuelo del valle de Puebla.

#### V.2 FUNDAMENTOS TEORICOS DEL METODO.

Los campos terrestres presentan corrientes eléctricas asociadas a ellos y que constituyen un complicado sistema de cargas móviles, a profundidad, estas corrientes pueden ser electrónicas, pero en las rocas saturadas de agua son netamente iónicas.

Existen muchos factores que hacen variar a los campos eléctricos naturales, por ejemplo la influencia de los campos magnéticos, por lo que en los métodos de prospección eléctrica se utilizan campos producidos artificialmente con características conocidas.

La mayoría de los minerales de las rocas son aislantes, por lo que la electricidad deberá fluir por el electrolito que se encuentra en los espacios porosos interconectados de las rocas, de esta forma, la resistencia o resistividad de la roca está determinada por la resistividad del electrolito y por la geometría de los poros.

Para obtener datos de resistividad se utilizan dos electrodos (electrodos de corriente) por donde se introduce la corriente en el terreno y se mide la diferencia de potencial entre dos electrodos adicionales (electrodos de potencia), con esto, se mide el gradiente de potencial en superficie, la cual se encuentra asociada a una corriente conocida que circula por el suelo.

Las resistencias que se relacionan con la diferencia de potencial y la corriente dependen unicamente de las distancias entre los electrodos y son independientes de las condiciones del subsuelo, por lo que la ecuación de la resistividad se puede expresar de la forma siguiente:

$$p = k \frac{DV}{I}$$

Donde:

k : es una constante que depende de la disposición de los electrodos.

DV: es la diferencia de potencial (Voltaje).

I : es la intensidad de la corriente.

La resistividad que se obtiene al existir varias capas de propiedades eléctricas distintas es aparente y en realidad solo representa un valor intermedio entre las resistividades de las diferentes capas del subsuelo.

Dependiendo de las características eléctricas de las capas y del coeficiente k de la disposición de los electrodos se conocerán las diferentes resistividades aparentes de las capas en el subsuelo, de esta forma, si la distancia entre los electrodos es corta (aproximadamente el espesor de la capa), la resistividad aparente se aproxima al valor de la resistividad de la primera capa; si la separación entre los electrodos es larga, entonces tiende al valor de la resistividad de la segunda capa. En la tabla V.1 se presentan las resistividades de algunos materiales en ohm-metro.

Para obtener los datos de resistividad aparente, se han diseñado diferentes tipos de arreglos los cuales presentan diferentes ventajas, en el presente trabajo la empresa I.T.S., S.A. empleo el método Wenner, que se caracteriza por que la distancia entre los electrodos es la misma, en este método, la medida de la resistividad entre los electrodos de potencia se obtiene por la siguiente relación:

$$p = \frac{2(3.1416)a}{a} \frac{DV}{I}$$

Donde:

DV: Es la diferencia de potencial medida.

I: Es la intensidad de la corriente medida, pasando por el subsuelo.

a: Es la distancia que separa dos electrodos consecutivos.

Por otro lado, EXYCO utilizó el arreglo electródico Schlumberger, en el cual se considera que los electrodos de potencia son colocados a una distancia infinitesimal con respecto al centro del dispositivo, para fines prácticos, es suficiente con hacer que la distancia entre los electrodos de potencia sea menor o igual a la quinta parte de la distancia de separación que existe entre los electrodos de corriente, permitiendo un mínimo de error en las mediciones, en este caso, la resistividad entre los electrodos de potencia estará dado por la relación:

$$p = (3.1416) \frac{n^2}{a} \frac{DV}{I} \quad \text{a Menor que } 2n.$$

Donde:

n : Es la semidistancia entre los electrodos de corriente.

En la figura V.1 se presentan esquemáticamente los métodos utilizados por ambas empresas.

### V.3 CARACTERISTICAS DEL EQUIPO EMPLEADO

A continuación se describirán las características del equipo empleado por las empresas anteriormente mencionadas.

I.T.S., S.A. empleó un galvanómetro de cero, no produce deformaciones del campo eléctrico obtenido por la corriente enviada en el subsuelo al momento de las mediciones. Está constituido por dos partes o circuitos distintos, la primera corresponde al circuito de envío de corriente y la segunda corresponde al circuito de medición de diferencia de potencial, consta en realidad de un doble circuito, el primero, a través del galvanómetro, anula la corriente que originan las tensiones naturales existentes en el subsuelo (polarización) y el segundo, a través del milivoltímetro y del galvanómetro, mide por oposición la diferencia de potencial que existe en el terreno entre los electrodos de potencia.

EXYCO utilizó un equipo de recepción o resistivímetro modelo RESU-688, con un motor generador integrado a un transmisor TRSU-2.5 Kw, cuatro carretes con sus respectivos cables y cuatro electrodos metálicos de cobre. El resistivímetro presenta pantalla digital con alta legibilidad. Es de alta precisión, las escalas permiten leer desde varias decenas de Volts a fracciones de milivolt. Presenta un sistema de compensación para el



potencial natural del terreno y tiene una impedancia de entrada de 10 mega-ohms. El resistivímetro RESU-688 permite realizar lecturas directas de potencial natural y por sus características es adecuado para la realización de Sondeos Eléctricos Verticales cortos y largos. El transmisor modelo TRSU-2.5 Kw, genera corriente continua con un amplio intervalo de valores de voltaje de salida (50, 100, 150, 200, 250, 300, 600, 800 y 1000 Volts), este permite proporcionar corrientes de hasta 10 amperes, combinado con un motor generador de 2.5 Kw dando una salida de hasta 2,500 VA.

#### V.4 RESULTADOS DE LA REINTERPRETACION DE LOS SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

La ubicación de las secciones y de los pozos con corte litológico se muestran en un mapa base del anexo cartográfico. En éste, se observa que los estudios realizados por I.T.S.,S.A. abarcan las zonas noroeste y centro del área de estudio, mientras que las secciones realizadas por EXYCO se localizan en la Ciudad de Puebla, al sur de ésta y al sur de la Ciudad de Cholula.

Para la obtención de los resultados I.T.S.,S.A. y EXYCO realizaron Sondeos Eléctricos Verticales los cuales consistieron en incrementar las separaciones entre los electrodos en un punto determinado, con lo que aumenta la penetración de la corriente y por lo tanto la profundidad de medición.

Los valores de la resistividad eléctrica pueden ser interpretados en términos de la geología general del subsuelo a profundidades limitadas y varían ampliamente dependiendo del material, densidad, porosidad, tamaño de los poros, de la forma de los estratos, del contenido de agua, de su calidad y de la temperatura. Las rocas ígneas y metamórficas tienen valores comprendidos entre cien y cien millones de ohms-metros, las sedimentarias y las no consolidadas de diez a diez mil ohms-metro (tabla V.1).

Los perfiles obtenidos por I.T.S.,S.A. y EXYCO se reinterpretaron siguiendo el mismo criterio. Correlacionando todas las resistividades obtenidas a lo largo de los perfiles, se presentan seis diferentes unidades las cuales se agruparon en tres diferentes grupos de formaciones:

1) Formaciones Arcillosas: Este grupo engloba todas las resistividades menores a 30 ohms-metro y corresponde a unidades arcillosas de origen aluvial, materiales lacustres de origen volcánico, tobas alteradas o por alteración "in situ" del material rocoso volcánico. Se encuentran principalmente en la parte central del valle y su espesor llega a sobrepasar los 400 metros. En los perfiles P2, P3, P4, P5, P6 y P12, principalmente, se observan fuertes espesores de estos materiales.

Este grupo se ha subdividido en dos unidades: La primera es aquella en la que los valores resistivos quedan comprendidos

TABLA V.1

RESISTIVIDADES DE ALGUNOS MATERIALES  
EN OHMIOS-METRO

Aguas subterráneas en granito y roca hipogénica.....	20 - 100
Aguas subterráneas en caliza y acarreos.....	20 - 50
Aguas salobres.....	1 - 10
Aguas potables superficiales.....	20 - 300
Agua del mar.....	menor de
Agua destilada.....	mayor de
Arcillas y margas.....	10 - 100
calizas y areniscas.....	50 - 3,0
pizarras.....	50 - 300
rocas hipogénicas y metamórficas.....	100 - 10,
gravas.....	130 - 1,0
Arenas.....	130 - 1,0
Limos.....	30 - 500
Grafito.....	30,000
Pirita.....	.001
Salmuera.....	.05
Arcilla.....	1.0
Yeso.....	10
Agua Dulce.....	50
Gravas y arenas saturadas de agua dulce.....	100
Serpentina.....	300
Caliza.....	3,000
Granito.....	1'000,000
Cuarzo.....	1 X 10EXP
Calcita.....	5 X 10EXP

Tomado de Orellana

entre 6 y 20 ohms-metro, se identifica en los perfiles como Ia, dentro de esta unidad encontramos los materiales con un alto contenido de arcillas-limos como es el caso de los materiales lacustres, arcillas de tipo aluvial, tobas arcillosas y/o alteradas.

La segunda unidad es aquella cuyos valores quedan comprendidos entre 20 y 30 ohms-metro. Esta unidad se caracteriza por tener un mayor porcentaje de materiales granulares embebidos en una matriz generalmente arcillosa, estos materiales pueden estar representados por tobas arenosas con matriz arcillosa, materiales aluviales, con mayor porcentaje de materiales granulares que de arcillas, o rocas volcánicas intemperizadas in situ. En los perfiles están indicadas como Ib y presenta los mayores espesores en los perfiles P2, P3, P8, P9 y P10.

Todos estos materiales tendrán permeabilidades que van de bajos a muy bajos, tienden a mejorar conforme va creciendo el valor óhmico hasta alcanzar valores de permeabilidad, que podríamos llamar, bajos a medios.

2) Formaciones Granulares: Este grupo se encuentra asociado a las resistividades comprendidas entre 30 y 100 ohms-metro y está representado por materiales granulares que van de poco consolidados a sin consolidar para los valores bajos, muy compactos y a veces cementados para los valores altos.

Este grupo se dividió en dos unidades, la primera de ellas está comprendida dentro de los valores resistivos 30 y 45-50 y consideramos que pueden estar representados por materiales piroclásticos bien graduados y poco compactos, por materiales aluviales con un bajo contenido de arcillas, en ocasiones estos valores resistivos serán dados por lentes u horizontes de materiales granulares presentes en los sedimentos lacustres.

Esta unidad en general tendrá buena permeabilidad y fue representada en los perfiles como IIa, apareciendo en todos ellos.

La segunda unidad la hemos asociado a las resistividades comprendidas entre 45-50 y 90-100 ohms-metro y estará representada por tobas compuestas de fragmentos del tamaño de arenas y gravas, gravas aluviales, por materiales volcánico sedimentarios (brechas sedimentarias de material volcánico, en los límites de la Sierra Nevada y la Malinche. Puede también indicar la presencia a profundidad de materiales volcánicos andesítico-basálticos. Estos materiales proporcionan una buena permeabilidad y se representan en los perfiles como IIb.

Esta unidad aparece en casi todos los perfiles, pero en los que presenta mayores espesores son P7, P8, P9, P10 y P11.

3) Formaciones volcánicas: Este último grupo engloba los valores de resistividad superiores a 90-100 ohms-metro. Corresponde a los materiales granulares (gravas, arenas), tobas

de materiales mal clasificados y poco consolidados, así como los derrames volcánicos fracturados. Esta unidad se localiza en las zonas cercanas a la Sierra Nevada y a la Malinche, siendo subdividida en dos unidades: la primera unidad agrupa a las resistividades entre 90-100 y 160-180 ohms-metro, las cuales pueden estar dadas por brechas volcánicas, derrames volcánicos y brechas volcano sedimentarias, generalmente se presenta en los límites de la Sierra Nevada y la Malinche, en los perfiles se presenta como IIIa.

La segunda unidad abarca los valores de resistividad mayores a 160-180 ohms-metro, pudieran representar brechas, flujos de lodo, derrames lávicos, con un grado de fracturamiento menor que la unidad anterior, los materiales como brechas y flujos de lodo estarán bien consolidados, también dentro de esta unidad están comprendidas las rocas calcáreas fracturadas. Están representados en los perfiles como IIIb.

Como un apoyo para la interpretación de los sondeos eléctricos, se contó con un número de 15 pozos donde fue posible realizar una breve descripción litológica; a continuación se indican las características que presentan cada uno de éstos:

- Pozos Pcc1, Pcc2 y Pcc4: Estos pozos fueron perforados por la Dirección General de Captaciones y Conducciones de Agua a lo largo de la autopista México-Puebla, cerca de Sta. María Xalmimilulco.

El pozo Pcc1, con 186 metros de profundidad, presenta una capa superficial de material aluvial (Qal) con dos metros de espesor; desde 2 a 68 metros de profundidad se presentan tobas arenosas y gravas que han sido clasificadas como material piroclástico continental del Cuaternario (Qpc). A partir de los 68 metros y hasta una profundidad de 186 metros, se encuentran materiales compuestos por arcillas, arenas y gravas volcánicas con matriz arcilloarenosa que han sido considerados como sedimentos lacustres del Terciario Superior (Tslac). Las resistividades asociadas a estos materiales son: Ia de 0 a 35 metros de profundidad, IIb de 35 a 68 metros de profundidad, IIa de 68 a 110 metros y Ia desde los 110 metros hasta 186 metros de profundidad.

El pozo Pcc2, con una profundidad de 178 metros, presenta una capa de 2 metros de suelo (Qal), un espesor de 68 metros de material piroclástico continental (Qpc) que subyace a la capa de suelo y que está constituido por tobas arcilloarenosas y gravas; las profundidades que van de 70 a 178 metros están representadas por material lacustre del Terciario Superior (Tslac) compuesto por intercalaciones de arcillas y arenas. Las resistividades asociadas a estos materiales son: Ia para profundidades de 0 a 28 y de 161 a 178 metros, IIb para profundidades entre 28 y 70 metros, y IIa para las profundidades entre 70 y 161 metros de profundidad.

El pozo Pcc 4 tiene una profundidad de 78 metros, presentando material aluvial hasta los dos metros de profundidad y material piroclástico continental (Qpc) de los 2 a los 70 metros de profundidad, representado por tobas arenosas, gravas y arcillas. De 70 a 73 metros se reportan materiales lacustres (Tslac) representado por un conglomerado ígneo. Las resistividades asociadas a éstos materiales corresponden a la clasificación Ia para profundidades de 0 a 28 metros, IIB de 28 a 40 metros y IIA de 70 a 73 metros.

-Pozo 7: Este pozo se localiza en el municipio de San Andrés Cholula, en el poblado de San Andrés Calvario, presenta material piroclástico continental (Qpc) a profundidades entre la superficie y 87 metros, este material está constituido por un espesor de tres metros de tobas alteradas en la superficie y por materiales clásticos gruesos con tobas de 3 a 87 metros de profundidad. A partir de los 87 metros y hasta los 117 metros se encontró andesita muy alterada que se ha relacionado con la unidad Cuaternaria volcánica andesítica basáltica (Qvab). Las resistividades que se asocian a estos materiales son Ia de 0 a 3 metros, IIA de 3 a 30 y de 42 a 117 metros de profundidad y IIB de 30 a 42 metros de profundidad.

-Pozo 23: se localiza en el poblado de Sta. Cruz Analco, dentro del municipio de San Salvador el Verde, con una profundidad de 110 metros, se encuentra representado en su parte mas superficial por tobas alteradas (0 a 3 metros de profundidad) y por material piroclástico arcilloso con intercalaciones de rocas ígneas (de 3 a 18 metros de profundidad que corresponden a la unidad Cuaternaria piroclástica continental (Qpc). Al aumentar la profundidad en este pozo, de 18 a 107 metros, se presenta la unidad Tslac, representada por arenas, arcillas y cantos de origen ígneo, presentando ocasionalmente intercalaciones de basaltos alterados. De 107 a 110 metros de profundidad se encuentran basaltos alterados que corresponden a la unidad Tmsm (Terciario Medio Superior de la Malinche). Las resistividades que se asocian a este pozo son: Ia de 0 a 3 y de 51 a 71 metros de profundidad, Ib de 3 a 18 metros, IIA de 18 a 36 metros, IIB de 36 a 51 y de 71 a 107 metros y IIIA de 107 a 110 metros de profundidad.

-Pozo 24: Este pozo se localiza en el municipio de Juan C. Bonilla, en el Estado de Puebla, con una profundidad de 150 metros. Presenta un espesor de 2 metros de material aluvial arcilloarenoso (Qal), por debajo de este y hasta 80 metros de profundidad se encuentra material piroclástico continental (Qpc) constituido por tobas arenosas, arcillas y conglomerados de material ígneo, de los 80 y hasta los 150 metros de profundidad se encuentran basaltos sanos y alterados que corresponden a la unidad Qvab (Cuaternario volcánico andesítico basáltico). Las resistividades que se asocian son: Ia de 0 a 2 metros, IIA de 2 a 54 metros, IIIb de 54 a 80 metros y IIB de 80 a 150 metros.

-Pozo 25: Localizado en el municipio de San Pedro Tlaltenango, Puebla, con 160 metros de profundidad, presenta un espesor de 16

metros de material piroclástico (Qpc) en la superficie, constituido por materiales tobaceos arcillosos y arenas. de 16 a 160 metros de profundidad se presentan materiales que corresponden a la unidad Qvab representada por andesitas sanas, basaltos alterados y por clásticos igneos gruesos en matriz arcilloarenosa. Las resistividades que se asocian a estos materiales son Ia de 0 a 16 metros, IIB de 16 a 42 y de 54 a 160 metros y IIIa de 42 a 54 metros de profundidad.

-Pozo 44: localizado en el poblado de San Simón Atzintzintla, en el municipio de Teotlaltzingo, Puebla, con una profundidad de 170 metros, presenta tobas alteradas en un espesor que va de los 0 a 3 metros de profundidad y cantos de material igneo de 3 a 24 metros de profundidad que corresponden a la unidad Qpc. De 24 a 81 metros se presenta la unidad Qvab (Cuaternario volcánico andesítico basáltico), representado por basaltos alterados y andesitas sanas, de 81 a 87 metros se presentan arenas volcánicas que pueden ser representativas de la unidad Tslac, de 87 a 170 metros de profundidad se encuentran basaltos alterados que corresponden a la unidad Tman (Terciario Medio andesítico basáltico). Las resistividades que se asocian a estos parámetros son: Ia de 0 a 3 metros, IIB de 3 a 24 metros, IIIa de 24 a 54 y de 63 a 170 metros y IIIb de 54 a 63 metros de profundidad.

-Pozo San Miguel Xoxtla: Presenta una profundidad de 200 metros, se encuentra la formcación Qpc (Cuaternario piroclástico continental) representado en la parte superficial por tobas alteradas (de 0 a 2 metros), tobas de arenas, gravas y arcillas en un espesor que va de 0 a 72 metros de profundidad. En las profundidades de 72 a 200 metros se encuentran materiales lacustres del Terciario Superior (Tslac), representados por materiales arcilloarenosos, arenas, gravas y cenizas volcánicas finas. Las resistividades asociadas serían: Ia de 0 a 2 metros, IIa de 2 a 72 metros y Ia de 72 a 200 metros de profundidad.

-Pozo 47: Localizado en San Juan Tianguismanalco, Puebla, con 200 metros de profundidad. Se presenta la unidad Qpc a profundidades desde la superficie hasta 88 metros, representada por tobas alteradas en la superficie (de 0 a 2 metros de profundidad) e intercalaciones de basaltos alterados con materiales tobaceos arcillosos y arenas con clásticos igneos de los 2 a 88 metros de profundidad; De 88 a 200 metros se encuentra la unidad Qvab, representada por basaltos alterados, arenas y basalto sano. Las resistividades asociadas a este pozo son IIB de 0 a 88 metros de profundidad, IIIb de 88 a 112 metros y IIa de 112 a 200 metros.

## CAPITULO VI

### HIDROLOGIA SUPERFICIAL

En el Capítulo que nos ocupa se describirá la ocurrencia, circulación y distribución de las aguas superficiales dentro del área de estudio.

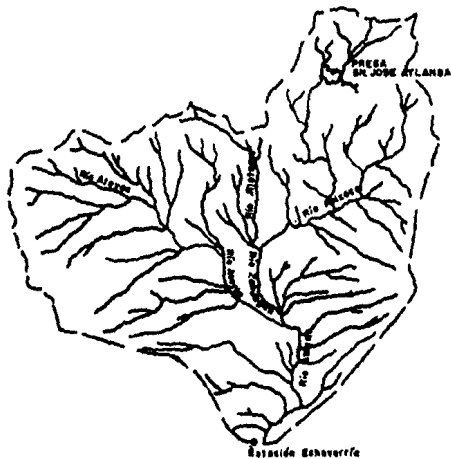
El área de estudio forma parte de la Región Hidrológica "Río Balsas" (No. 18). El río Balsas es conocido durante su recorrido como Atoyac, Mezcala o Zacatula, es uno de los más importantes de la República Mexicana. El tramo donde al río Balsas se le conoce como Atoyac será el que se describa, ya que este se localiza en el área de estudio (Fig. VI.1).

#### VI.1 CARACTERISTICAS GENERALES

El río Atoyac se forma, en parte, a partir de los escurrimientos ocasionados por los deshielos que descienden, desde altitudes superiores a los 4,000 metros, del flanco Oriental del Volcán Iztaccíhuatl, en los límites de los Estados de México y Puebla. En su recorrido recibe aportaciones relevantes por una y otra margen, como son las de los ríos Nexapa, Mixteco, Acatlan, Alseseca y Zahuapan. El Nexapa Mixteco y Acatl'm se unen al Atoyac en la parte sur del estado de Puebla (fuera del área de estudio), el Alseseca desemboca en la presa de Valsequillo también al sur del área de estudio. El río Zahuapan es el afluente más importante del Atoyac dentro del área de estudio, esta corriente nace a unos 40 kilómetros al norte de la Ciudad de Tlaxcala, en los límites de este estado con el de Puebla. Ambas corrientes unen sus aguas a la altura de San Lorenzo Almecatla, unos 10 kilómetros al norte de la Ciudad de Puebla.

En la Ciudad de San Martín Texmelucan, las aguas de esta corriente y sus afluentes se aprovechan en las actividades agrícolas, domésticas e industriales. Esta porción se caracteriza por lo accidentado de su topografía y el grado de pendiente de los cauces de sus corrientes, mismas que sin control pueden causar pérdidas a la agricultura.

En esta cuenca se localizan las Ciudades de Puebla, Atlixco y Tlaxcala. Hay un desarrollo industrial importante basado principalmente en las fábricas textiles; en cuanto a la agricultura, la cuenca incluye el distrito de riego Atoyac-Zahuapan, con 6,029 hectáreas regadas, así como el distrito de riego de Valsequillo con 34,340 hectáreas regadas, ambos distritos de riego se localizan parcialmente dentro del área de estudio.



**Cuenca Hidrológica de los ríos Atoyac y Zuhuapán  
hacia la estación Echeverría**

UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA
	DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
	ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.
	CUENCA HIDROLOGICA DEL ATOYAC
	TESIS PROFESIONAL
	JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA. RODRIGO MALDONADO VILLALON.
FIG. VI.1	1991



## OBRAS HIDRAULICAS

El Atoyac y Zahuapan cuentan con Presas de almacenamiento y presas derivadoras utilizadas para almacenar y derivar sus escurrimientos y utilizarlos para el riego (dentro y fuera del área de estudio) así como la Presa derivadora de Panotla, situada aguas abajo de la Ciudad de Tlaxcala. Estas Presas son las únicas que regulan los escurrimientos del río Zahuapan antes de su confluencia con el río Atoyac. La construcción de la primera se llevó a cabo de 1957 a 1961 y fue construida para regularizar y aprovechar los escurrimientos del río Zahuapan con el objeto de beneficiar 4,000 hectáreas distribuidas en la zona de Panotla, Ixtacuixtla y San Martín Texmelucan. La Capacidad total del vaso, a la elevación de 2,486.4 m es de 54.5 millones de metros cúbicos, de los cuales, 4.5 corresponden a la parte del vaso que ha sido asolvado y 50 a la capacidad útil. El área de embalse, cuando el nivel del agua tiene una elevación de 2,486.4 metros (que corresponde a la cresta del vertedor), es de 1,158 hectáreas, y cuando este nivel alcanza los 2,486.87 metros de elevación (que corresponden al nivel de aguas máximas), es de 1,202 hectáreas. La Presa consiste esencialmente de una cortina de tierra, provista en el extremo de la margen izquierda de una obra de toma del tipo de Torre, cuyo caudal máximo de diseño es de 4 metros cúbicos por segundo, la obra de excedencias se encuentra alojada también en la margen izquierda y está constituida por un canal de acceso, cimacio de cresta libre y canal de descarga. El gasto de la avenida de diseño es de 470 metros cúbicos por segundo y la capacidad máxima de descarga del vertedor es de 19 metros cúbicos por segundo, con carga de 0.47 metros sobre la cresta.

En las inmediaciones del poblado de Zacatelco se encuentra la unidad de riego Zacatelco, que, aunque aprovecha las aguas subterráneas mediante la operación de ocho pozos profundos, de alguna manera afecta directamente los escurrimientos del río Zahuapan, lo anterior se debe a que al bajar los niveles por el bombeo, el río aporta agua al acuífero.

El área beneficiada con el riego es de 513 hectáreas (Boletín Hidrológico No. 48). La operación de la unidad se inició a partir del año de 1962.

El aprovechamiento de las aguas superficiales del río Atoyac se hace principalmente en el distrito de riego de Valsequillo, bajo la supervisión de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Estos aprovechamientos se localizan aguas abajo de la estación hidrométrica Echeverría.

Las aguas se almacenan en la Presa Manuel Avila Camacho (Valsequillo) y se derivan por el Canal Portezuela que alimenta la planta hidroeléctrica del mismo nombre. Los escurrimientos de este canal fluctúan entre 3 y 5 metros cúbicos por segundo.

La construcción de la Presa Manuel Avila Camacho se llevó a cabo de 1941 a 1946. Esta Presa se construyó para regularizar y aprovechar en el riego los escurrimientos del Atoyac, beneficiando 33,380 hectáreas comprendidas en el Valle de Tecamachalco, San Jerónimo Tlacotepec y Tehuacán (todos fuera del área de estudio). La capacidad total del vaso cuando el nivel del agua alcanza los 2,059 metros de elevación es de 304 millones de metros cúbicos. La Presa consiste esencialmente de una cortina del tipo de tierra provista en la margen izquierda de una obra de excedencias y de una obra de toma del tipo de tierra con un gasto máximo de diseño de 50 metros cúbicos por segundo. Esta obra es del tipo de canal lateral con cresta vertedora de perfil Creager y canal de descarga en régimen acelerado que remata en un deflector. El gasto de la avenida de diseño es de 2,000 metros cúbicos por segundo y el gasto de la capacidad máxima de descarga de 1,200 metros cúbicos por segundo con carga de 3.00 metros sobre la cresta del vertedor.

## CONTAMINACION

El desarrollo industrial de la entidad en los últimos años ha provocado problemas de contaminación, ya que únicamente cuenta con un cuerpo receptor: el río Zahuapan. El municipio de Santa Ana Chiautempan es una gran fuente de contaminación, ya que ahí se concentra la mayor parte de las industrias textiles, que son las que mas afectan la ecología de la región. Sigue en grado de contaminación el sector de la celulosa y el papel, ubicado en la zona de Apizaco.

Actualmente se esta elaborando el proyecto de control para las zonas prioritarias de Apizaco, Tlaxcala, Santa Ana Chiautempan, Ixtacuixtla y Panzacola.

## ANALISIS DE LOS ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES

Debido a que la estación Echeverría contaba con mayor información hidrométrica, se consideró la cuenca hidrológica del río Atoyac hasta ese punto para poder determinar los parámetros de escurrimiento.

La cuenca hidrológica del río Atoyac hasta la estación Echeverría cuenta con una superficie de 3,512.11 kilómetros cuadrados. El volumen medio anual registrado en esta estación para un periodo de 12 años es de 355.11 millones de metros cúbicos para el periodo de 1978 a 1989.

El escurrimiento superficial de un río es el resultado de dos componentes principales del ciclo hidrológico: el volumen de agua que escurre sobre la superficie del terreno y que no encuentra ningún obstáculo que lo retenga, así como la parte del volumen de agua infiltrada durante la época de lluvia y que vuelve a la superficie en el cauce de los ríos. Esta 2a. componente en algunos casos representa la infiltración total y en otros, solo una parte.

La cuenca analizada en este estudio se encuentra drenada principalmente por el río Zahuapan, que capta los escurrimientos de la región norte y por el río Atoyac que hace lo mismo en la región noroeste y oeste de la cuenca.

En la actualidad existen en operación únicamente las estaciones hidrométricas de Tlaxcala sobre el río Zahuapan y la de Echeverría sobre el río Atoyac.

Debido a que de estas dos, la estación Echeverría contaba con más información, además de abarcar toda el área de estudio fue con la que se trabajó.

La falta de estaciones hidrométricas en operación, así como la poca confiabilidad de los datos no permiten conocer el volumen real que aporta el río Zahuapan al río Atoyac.

Antes de que el río Atoyac sea aforado en la estación Echeverría, capta las aguas de un gran número de corrientes, entre ellas los ríos Tlahuapan, Turín, Tlamalapan, Temixco, San Jerónimo, Ajejela, Zahuapan, Coronango y la Barranca Huejotitlan (Fig VI.1). Finalmente cuando los escurrimientos del Atoyac son aforados en la estación hidrométrica Echeverría, se registró un escurrimiento medio anual de 398.2 millones de metros cúbicos durante el período de 1963 a 1970 y 355.11 millones de metros cúbicos para el período de 1978 a 1989.

## VI.2 VOLUMENES DE ESCURRIMIENTO

La precipitación es el punto de partida de todo el ciclo hidrológico, por lo que debe conocerse con la mayor precisión posible, para lo anterior se contaron con 13 estaciones climatológicas (tabla VI.2). Para determinar el volumen total precipitado en la cuenca hidrológica del Atoyac hasta la estación Echeverría, se utilizó el método de Polígonos de Tiesen, el cual consiste en dividir el área (3,512.11 km<sup>2</sup>) en polígonos, a cada uno de ellos le corresponderá el valor de precipitación registrado en la estación ubicada en el centro del mismo.

El volumen obtenido con este método es de 2,799.4 mill. de metros cúbicos al año, de los cuales 1,903.6 mill. de metros cúbicos se evaporan y 540.7 mill. de metros cúbicos se infiltran (capítulo III), los 355.1 mill. de metros cúbicos restantes escurren, es decir, que por cada 100 unidades de volumen precipitada, 12.7 unidades escurren, esto considerando lo que el acuífero cede al río hasta la estación Echeverría. (ver Tabla VI.1).

Al alcanzar la superficie del terreno, el agua precipitada se infiltra hasta que las capas superiores se saturan, es entonces cuando empieza a escurrir llenando las depresiones en el terreno, a esto se le llama "flujo en la superficie del terreno, al llegar a un cauce bien definido se le llamará "escurrimiento en corrientes". Al escurrimiento en corriente junto con el flujo

TABLA VI.1

VOLUMENES DE ESCURRIMIENTO MENSUALES EN LA ESTACION ECHEVERRIA EN MILLONES DE METROS CUBICOS

ANO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
78	17.38	12.75	15.21	12.80	15.03	60.96	47.09	41.11	44.43	41.30	25.12	16.10	349.28
79	11.25	10.74	6.99	10.50	23.65	19.70	32.57	70.15	90.33	25.02	18.35	21.56	340.80
80	19.79	14.61	9.48	12.49	21.11	23.64	30.48	64.76	54.95	29.70	28.18	17.86	327.06
81	13.31	12.53	15.05	14.13	32.44	126.72	129.98	92.70	78.36	53.27	21.05	15.80	605.34
82	13.39	13.16	14.70	16.15	38.84	27.01	38.62	27.61	19.83	25.82	12.08	10.77	257.98
83	11.60	12.31	12.11	20.63	8.89	15.84	46.55	50.70	71.51	25.82	18.82	13.18	307.96
84	14.33	11.02	9.59	8.27	15.83	50.16	69.53	61.66	100.10	35.33	18.74	14.62	409.18
85	13.61	13.21	11.68	16.82	25.50	56.12	53.57	43.52	44.27	37.20	20.01	15.45	350.96
86	12.19	10.40	10.87	20.30	41.09	78.54	42.35	34.79	40.18	39.18	14.18	14.73	358.79
87	10.82	10.77	9.72	14.18	18.03	62.05	69.18	48.72	47.12	20.57	12.47	11.49	335.12
88	8.30	8.47	10.20	7.21	7.50	39.68	54.26	67.74	78.80	26.49	14.85	9.59	333.09
89	8.97	7.45	7.36	7.85	15.64	30.25	33.94	65.22	48.52	35.14	14.13	11.33	285.78
MEDIOS	12.91	11.45	11.08	13.44	21.96	49.22	54.01	55.72	59.87	32.90	18.16	14.37	355.11

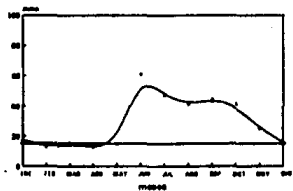
TABLA VI.2

## PRECIPITACION MEDIA MENSUAL

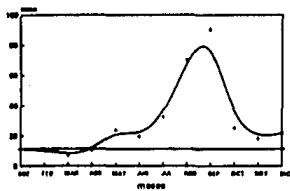
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
TLAXCO	6.45	11.35	16.05	43.15	67.40	128.20	130.00	110.05	106.15	41.60	11.80	2.67	674.95
ATLANGA	4.95	9.85	16.50	34.20	67.15	101.05	124.70	131.35	99.35	38.05	16.55	4.60	648.30
SANCTORUM	7.63	11.24	15.82	35.81	74.41	132.27	153.64	155.12	101.63	53.59	17.02	7.38	765.56
HUEYOTLIPAN	5.59	11.39	13.38	30.34	89.29	143.80	164.55	153.73	101.36	48.83	13.53	7.57	783.36
RIO FRIO	15.02	13.22	19.67	48.91	97.94	172.65	182.03	171.00	151.44	79.03	12.70	11.28	975.69
TLAHUAPAN	6.94	10.30	14.12	37.83	84.63	169.26	158.59	148.60	123.66	59.55	8.54	5.26	827.28
TLAXCALA	2.90	7.41	9.46	26.23	76.20	163.06	159.41	160.86	127.10	63.00	11.40	2.82	809.85
STA MA TOCATLAN	5.92	7.64	16.78	46.95	82.95	145.55	142.52	133.16	103.32	49.20	13.31	8.12	755.42
HUEJOTZINGO	10.45	5.68	15.15	31.52	63.80	146.43	135.73	164.45	153.75	55.43	15.75	6.34	804.48
ECHERRIA	9.02	9.53	9.00	22.70	71.72	136.41	163.36	143.13	144.86	53.77	12.59	2.36	839.05
PUEBLA	7.23	3.98	8.82	25.56	71.28	159.96	149.86	149.89	146.54	75.06	23.66	5.00	826.84
APIZACO	6.81	9.73	16.12	46.05	91.39	155.16	145.26	135.58	128.67	53.25	11.12	5.07	804.21
SN MIGUEL CANOA	8.59	12.96	16.12	36.04	109.64	172.78	143.85	124.41	155.45	62.45	2.05	2.68	847.02
PROMEDIO	7.50	9.56	14.38	35.79	80.60	152.81	150.27	144.78	126.41	56.37	13.88	5.52	797.07

sobre el terreno se le llama "escurrimiento superficial", a la parte del agua que se infiltra y que corre cerca de la superficie y más o menos en forma paralela a ésta se le denomina "escurrimientos subsuperficial" y a la que se infiltra a niveles inferiores al freático se le denomina "escurrimiento subterráneo". De estos, el que sale más rápido de la cuenca es el escurrimiento superficial, por esto se dice que está relacionado con una tormenta en particular, constituyendo así el "escurrimiento directo". El escurrimiento subterráneo llega de manera más lenta a la salida de la cuenca y como se produce bajo el nivel freático es el que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias, conociéndose entonces como "escurrimiento base". En la figura VI.2 se presentan los hidrogramas del escurrimiento en la estación Echeverría, donde puede observarse que el área de la curva que se encuentra sobre la línea horizontal de cada gráfica representa al escurrimiento directo, mientras que el área que se encuentra por debajo de ésta línea estará indicando al escurrimiento base, que sería la cantidad de agua que el acuífero cede al río Atoyac hasta la Estación Echeverría, el volumen que este aporta ha ido disminuyendo con el tiempo, sin embargo obteniendo el área de los rectángulos que representan el volumen del escurrimiento base y obteniendo un promedio para los 12 años analizados, se puede decir que el acuífero proporciona un valor medio de 138.8 millones de metros cúbicos anuales distribuidos en el valle, hacia la corriente del río Atoyac, medido en la estación Echeverría.

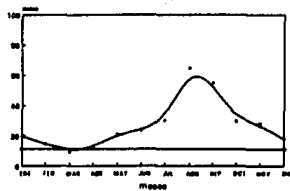
ESCURRIMIENTOS MENSUALES  
PARA EL AÑO DE 1978



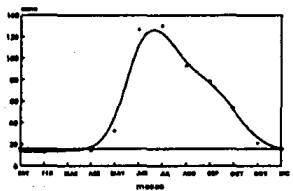
ESCURRIMIENTOS MENSUALES  
PARA EL AÑO DE 1979



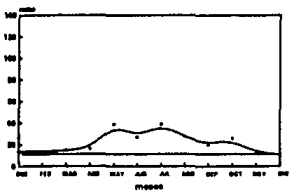
ESCURRIMIENTOS MENSUALES  
PARA EL AÑO DE 1980



ESCURRIMIENTOS MENSUALES  
PARA EL AÑO DE 1981



ESCURRIMIENTOS MENSUALES  
PARA EL AÑO DE 1982



ESCURRIMIENTOS MENSUALES  
PARA EL AÑO DE 1983

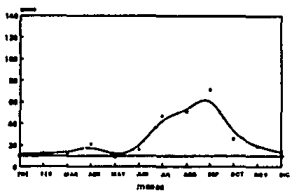
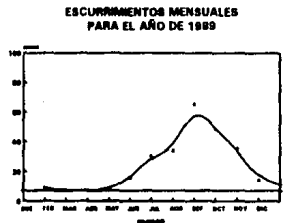
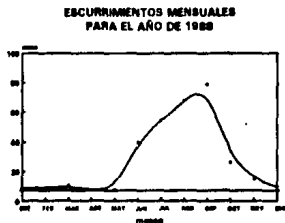
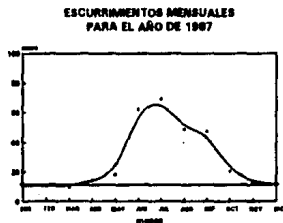
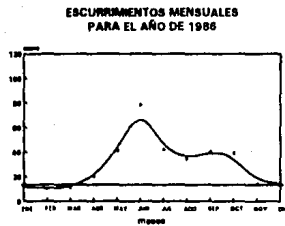
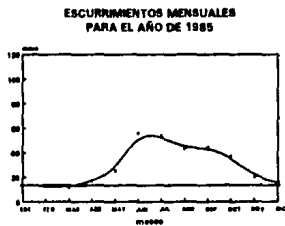
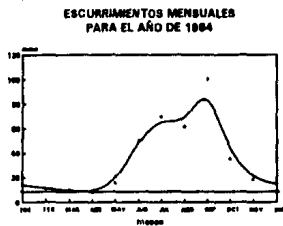


Figura VI.2



**Figura VI.2**



## CAPITULO VII

### HIDROLOGIA SUBTERRANEA

#### INTRODUCCION

La Hidrología Subterránea es aquella parte de la Hidrología que trata al almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre.

De acuerdo a la definición anterior, en el presente capítulo se tratará de presentar las características inherentes al funcionamiento de los acuíferos, mediante la interpretación de los datos obtenidos de las captaciones presentes en el área de estudio, para lo cual se realizaron las siguientes actividades: censo de aprovechamientos, tres lecturas diferentes de sus niveles de agua, así como veintidos pruebas de bombeo. Los resultados obtenidos nos indican cual es el comportamiento hidrodinámico y su posible esquema de funcionamiento.

#### VII.1 CENSO DE APROVECHAMIENTOS

A pesar de la disponibilidad del agua superficial, el mayor aprovechamiento de este recurso proviene de las aguas subterráneas, lo anterior se debe a la disponibilidad que se tiene del recurso en cualquier parte de la cuenca, lo que no ocurre con las aguas superficiales.

Durante los trabajos de campo, una de las principales actividades fue el censo de los aprovechamientos, este censo consistió en recopilar la información sobre el tipo de aprovechamiento, gasto, uso, características de construcción, características del equipo de bombeo, así como el régimen de operación del aprovechamiento.

Dentro del área de estudio, se pudieron censar un total de 547 aprovechamientos, de los cuales, 470 fueron Pozos profundos, 64 Norias, 12 Manantiales y una Galería Filtrante.

En general, puede decirse que el 43.4 % de los aprovechamientos es destinado al uso público y doméstico, el 22.77 % para uso industrial y el 39.79 % es destinado al uso agrícola y solo el 10.4 % se destina al uso comercial, lo cual no quiere decir que el uso que tenga mayor número de aprovechamientos sea el que utilice un mayor volumen de agua (ver Tabla VII.1). Lo anterior se debe a que los gastos de extracción son muy variables.

TABLA VII.1

VOLUMEN DE EXTRACCION ANUAL  
( millones de metros cúbicos )

USO	PUEBLA	TLAXCALA	TOTAL
POTABLE	83.3	30.0	113.3
INDUSTRIAL	30.2	5.5	35.7
COMERCIAL	30.2	0.3	30.5
AGRICOLA	38.8	34.8	73.6
			253.1

Los aprovechamientos destinados al uso público y doméstico tienen en general un régimen de operación de 6 a 12 horas diarias aproximadamente durante todo el año, mientras que los aprovechamientos cuyo uso se destina a la agricultura trabajan durante el período de estiaje (de Octubre a Mayo) 24 días al mes y 6 horas por día con gastos aproximados para los pozos profundos de 40 a 60 litros por segundo. Los aprovechamientos para uso comercial trabajan durante todo el año con gastos muy variables.

En la siguiente tabla se clasifica a los aprovechamientos mencionados de acuerdo con el uso al cual se les destina:

APROVECHAMIENTO	POTABLE	INDUSTRIAL	COMERCIAL	AGRICOLA
Pozos Profundos	155	100	46	169
Norias	42	6	3	13
Manantiales	6	1	-	5
Galerías filtrantes	1	-	-	-
TOTAL	204	107	49	187

En la tabla VII.2 se presenta la relación de los aprovechamientos acotados con sus respectivas elevaciones de brocales y niveles estáticos.

## VII.2 PIEZOMETRIA

La información relativa a la posición y evaluación de los niveles estáticos del agua subterránea es de vital importancia para un estudio como el que nos ocupa, ya que es uno de los principales factores que se deben tomar en cuenta para seleccionar los lugares donde se van a perforar los pozos, así como la terminación de los mismos, la profundidad de la cámara de bombeo y el costo de extracción del recurso.

Los niveles estáticos tendrán evoluciones negativas debido a diversos factores como son: evaporación (con niveles freáticos muy someros), extracción por aprovechamientos (pozos, norias o galerías filtrantes), salidas subterráneas, aporte del acuífero a manantiales y ríos (cuando el agua subterránea tiene mayor elevación que que el nivel del río). Los factores que intervienen en las evoluciones positivas son: infiltración del agua de lluvia y de riego, entradas horizontales, aporte de ríos (cuando el nivel freático del agua subterránea está por debajo del río), recarga artificial.

Los datos con las elevaciones de los niveles estáticos, que se encuentran en la tabla VII.2, fueron localizados en un mapa base, para posteriormente unir con una curva los puntos con igual elevación (carga hidráulica) y de esta manera obtener la configuración de la superficie del espejo de agua. Las líneas que unen los puntos con igual carga hidráulica reciben el nombre de equipotenciales y en este caso se elaboraron con una equidistancia de carga hidráulica de 20 metros.

Esta configuración es de gran importancia porque nos ayuda a determinar las direcciones del flujo subterráneo, pues debe recordarse que en el subsuelo el agua se desplaza siguiendo trayectorias normales a las curvas de igual elevación o carga hidráulica y en el sentido en que decrece más rápidamente la carga hidráulica. Las fluctuaciones que se presentan en estos niveles reflejan la distribución en el tiempo de la recarga y descarga de los acuíferos, así como la relación entre ambas. Por ejemplo en el área de estudio los niveles subirán durante el período de lluvia (que se presenta de fines de Mayo a fines de Septiembre) y tenderán a bajar durante el período de estiaje (de Octubre a Mayo).

Es importante recordar que la carga hidráulica total en un punto estará dada por la siguiente ecuación:

$$h = h_z + h_p$$

Donde  $h_z$  será la carga por elevación, es decir, la elevación en metros con respecto al nivel del mar, hasta el punto donde el pozo o piezómetro esta ranurado y  $h_p$  será la carga por presión que ejerce la columna de agua desde el nivel estático hasta el punto donde la tubería está ranurada.

Otro dato importante que podemos obtener a partir de esta configuración son los gradientes hidráulicos, que están dados por la diferencia de carga hidráulica que hay entre dos líneas equipotenciales y la distancia horizontal entre ellas, representada por la línea de flujo que las une en un punto dado.

De acuerdo con la configuración del mapa de piezometría se pudo deducir que las principales zonas de recarga son la Sierra Nevada y la Malinche, esto se puede afirmar porque las mayores elevaciones de los niveles estáticos se presentan en esta zona y van disminuyendo hacia el centro del valle y hacia la Ciudad de Puebla, lo que indica claramente que el flujo tiene una dirección hacia el centro del valle primero y luego al sur hacia el poblado de San Francisco Totimehuacán.

Partiendo de las configuraciones piezométricas se desarrollaron las redes de flujo del agua subterránea, mediante las cuales se establecieron las direcciones del movimiento del agua y se pudieron calcular los volúmenes que pasan a través de las unidades acuíferas durante cierto período de tiempo.

Estas redes de flujo están constituidas por las líneas equipotenciales y las líneas de flujo que son perpendiculares a las primeras, de esta forma, los dos grupos de líneas forman un patrón ortogonal de pequeños cuadros (fig. VII.1).

En el área de Sta. Inés Zacatelco, el gradiente hidráulico es casi nulo y la profundidad al nivel del agua es muy pequeña, lo que nos hace pensar que en esa zona existe evaporación del agua subterránea por la poca velocidad con que se desplaza.

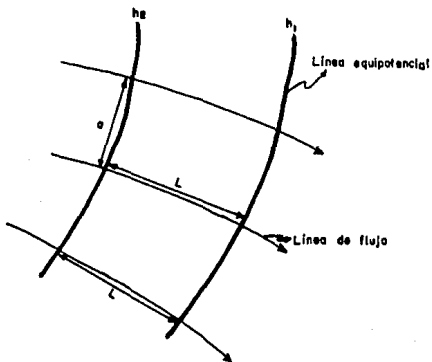
Debemos recordar que la velocidad con que se desplaza el agua subterránea va a estar en función de la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico del acuífero en esa zona.

$$v = Ki$$

donde K es la conductividad hidráulica e i será el gradiente hidráulico.

En las zonas de recarga la velocidad con que el agua subterránea se desplaza hacia el centro del área es mayor que en la parte central del valle, lo anterior se debe a que en esa zona los gradientes hidráulicos y la conductividad hidráulica de los materiales son mayores.

La falta de información impidió que se pudiera realizar una configuración de evolución de niveles estáticos, sin embargo se realizaron varios hidrógrafos, tres de ellos cercanos a la zona de recarga en la Sierra Nevada (636, 638 y 342), tres en la parte central del valle (620, 532 y 617) y dos en la Ciudad de Puebla (792 y 517). Los hidrógrafos de los pozos 636, 638 y 342 presentan un descenso marcado de los niveles durante el período de estiaje y en los meses de abril y mayo en que inicia la precipitación donde empiezan a recuperarse, mientras que los



Porción de una red ortogonal de flujo formada por líneas equipotenciales y de flujo.

UN	FACULTAD DE INGENIERIA
AM	DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.	
RED ORTOSONAL DE FLUJO	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA. RODRIGO MALDONADO VILLALON.	
FIG. VII.1	1991

hidrógrafos de los pozos alejados de la zona de recarga presentan descensos menos marcados, lo anterior se debe a que la respuesta a la infiltración es más rápida en las zonas de recarga.

En general puede decirse que los niveles estáticos han venido sufriendo descensos, posiblemente por el incremento en la extracción del agua subterránea que ha experimentado el valle. Estos abatimientos no han sido muy marcados como lo atestigua la presencia de manantiales y niveles estáticos muy someros en algunas zonas.

### VII.3 PRUEBAS DE BOMBEO

El Coeficiente de Transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica por el espesor del acuífero. En la Tabla VII.3 se presentan los resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo por los métodos de Jacob y Theis en su etapa de abatimiento y recuperación, así como el valor medio aceptado para cada una de las pruebas, además, en el presente apartado se muestran algunas gráficas utilizadas en la interpretación.

Se realizaron 22 pruebas de bombeo en el área de estudio, las cuales fueron interpretadas por los métodos de Thies y Jacob.

Estas pruebas consisten en observar los niveles dinámicos del agua durante intervalos de tiempo previamente establecidos (1, 2, 3, ..., 60, 90 minutos...) mientras se bombea el agua a un caudal constante, esta medición de los niveles dinámicos continúa hasta que el nivel se ha estabilizado. Para el período de recuperación se deja de bombear y se miden los niveles, durante los mismos intervalos de tiempo que en el período de bombeo, hasta que el nivel del agua llega al punto donde se inició el bombeo o se estabiliza.

Los pozos que presentaron menores coeficientes de transmisividad fueron el pozo EXY 113 con  $0.65 \times 10^{-3}$  localizado al este de la Ciudad de Cholula, el pozo 1280 con  $0.378 \times 10^{-3}$  localizado al sur del área de estudio cerca del poblado de San Ramón Castillotla y el pozo Aurora con  $0.812 \times 10^{-3}$  localizado al noroeste del área de Estudio, al sur de Chiautempan en el poblado de Santa Isabel al sur de Chiautempan. Estos valores se deben a que en la zona de estos pozos el espesor de los materiales permeables es menor que la de los demás pozos. Los valores de transmisividad aceptados se muestran en la tabla VII.3

Los valores más altos de coeficientes de transmisividad derivado de un alto valor de la conductividad hidráulica de los acuíferos, se encontraron en los pozos 1557 con un valor de  $16.43 \times 10^{-3}$ , localizado en Sta. Bárbara Almoloya al norte de la

Ciudad de Cholula, el pozo 647 con 17.0686 X 10 EXP -3 en San Lucas el Grande al noroeste del área de estudio, el pozo 941 con 19.89 X 10 EXP -3 localizado en Santa Isabel Tetlatlahuaca, al norte del área de estudio y el pozo 1134 con 12.71 X 10 EXP -3 al norte de la Ciudad de Puebla, en la ladera Occidental del volcán La Malinche.

En general los valores de transmisividad más altos se pueden atribuir a la presencia de rocas volcánicas fracturadas o a los materiales granulares poco consolidados que se localizan en las laderas de la Malinche, y los más bajos podrían ser ocasionados por la presencia de lentes arcillosos o a espesores menores en los materiales permeables.

#### VII.4 MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ACUIFERO

El sistema acuífero que se ha definido consta de un acuífero somero que se comporta en algunas zonas como libre y en otras como semiconfinado y un acuífero de tipo confinado que infrayace al anterior. El primero se encuentra formado principalmente por los materiales volcánicos y lacustres representados por las formaciones Qal, Qpc y Tslac, así como los conglomerados, brechas y lahares de la formación Qvs que se localizan al pie de la Sierra Nevada y el volcán La Malinche. Este acuífero se alimenta del agua de lluvia que se infiltra a través de las zonas de recarga localizadas en la Sierra Nevada y en el volcán La Malinche y que están constituidas por las rocas andesíticas de la unidad Tmsm, así como por los depósitos aluviales y laháricos de la unidad Qvs. Para poder determinar las zonas de recarga se consideraron diferentes características como son: un alto contenido de  $\text{HCO}_3$ , lo cual es característico de aguas jóvenes recientemente precipitadas; un bajo contenido en sólidos totales disueltos, lo cual representa en este caso el poco tiempo que el agua de estas zonas ha estado en contacto con las rocas y el corto trayecto recorrido; la presencia en estas áreas de los niveles estáticos con mayor elevación, que en este caso indica que el agua fluye de estas zonas hacia la parte central del valle.

El agua que se infiltra a través de las rocas andesíticas es transmitida por estas a los depósitos volcanosedimentarios (Qvs), los cuales a su vez lo ceden a los materiales Cuaternarios aluviales (Qal) y a los sedimentos lacustres Terciarios (Tslac).

Al volumen de agua que se infiltra por las zonas de recarga se debe agregar el infiltrado directamente por los materiales aluviales del Cuaternario (Qal) y el material piroclástico continental (Qpc).

El agua subterránea se encuentra en las unidades Qal, Qvs, Qpc y Tslac como agua de poro. En las tres primeras, el acuífero se comporta como libre, mientras que en la última se presenta tanto en forma libre como en condiciones de semiconfinamiento, esto último entre estratos impermeables discontinuos.

Como se mencionó anteriormente, el agua subterránea fluye de las zonas de recarga hacia el centro del valle, para posteriormente continuar su trayecto hacia el sur de la Ciudad de Puebla, donde se encuentra la salida natural del valle.

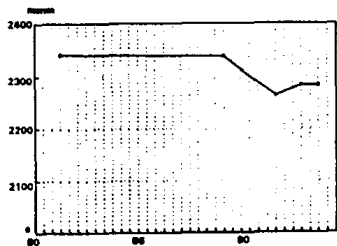
El acuífero profundo se encuentra en las rocas calcáreas del Cretácico Superior, funciona como un acuífero confinado por la presencia de estratos arcillosos en la parte superior de la formación Maltrata. Este acuífero mantiene comunicación con el acuífero somero a través de las fallas regionales por las cuales asciende el agua de mala calidad que aparece en la Ciudad de Puebla y Huejotzingo. La zona de recarga de este acuífero se localiza probablemente en la Sierra de Amozoc localizada al este de la Ciudad de Puebla, en la cual afloran las rocas de la formación Maltrata.

De acuerdo con los datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, el volumen total de agua que se extrae en la zona es de 253.1 mill. de metros cúbicos, de los cuales 73.6 mill. de metros cúbicos se destinan al uso agrícola, de estos, 12 millones de metros cúbicos retornan al acuífero por infiltración.

Para el presente trabajo no se consideró dentro de los objetivos la realización de un balance hidrológico, además de que los parámetros necesarios para llevarlo a cabo no se obtuvieron en este estudio, por lo que se considera que éste bien podría ser incluido en un trabajo posterior, tomando como antecedente la presente tesis.

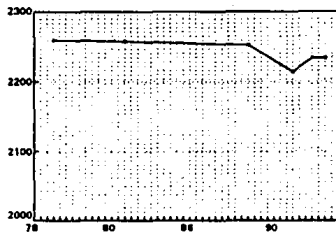


HIDROGRAFO DEL POZO 638

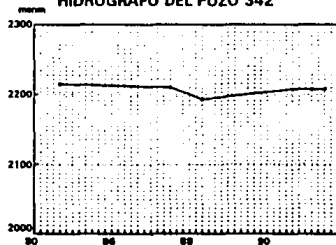


localizadas en la Sierra Nevada

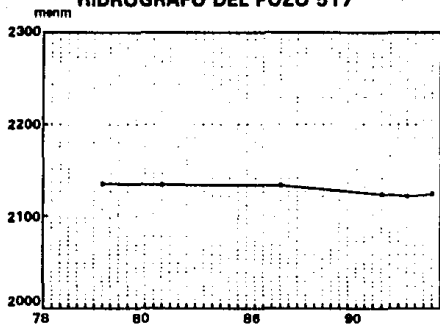
HIDROGRAFO DEL POZO 636



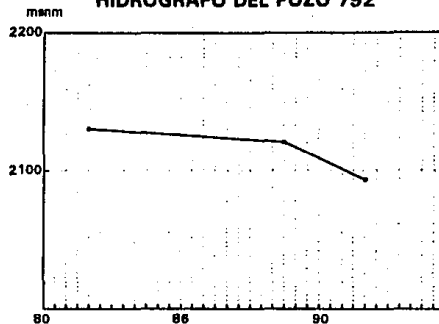
HIDROGRAFO DEL POZO 342



### HIDROGRAFO DEL POZO 517

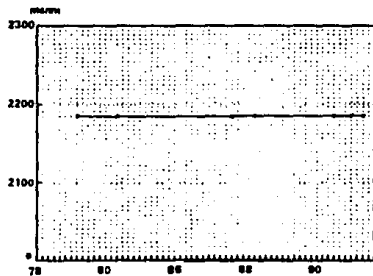


### HIDROGRAFO DEL POZO 792



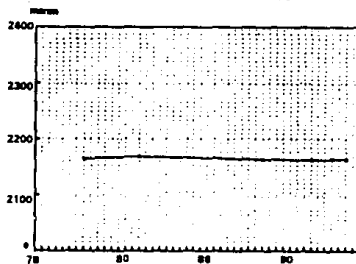
localizados en la Ciudad de Puebla

**HIDROGRAFO DEL POZO 620**



localizados en la parte central del Valle

**HIDROGRAFO DEL POZO 532**



**HIDROGRAFO DEL POZO 617**

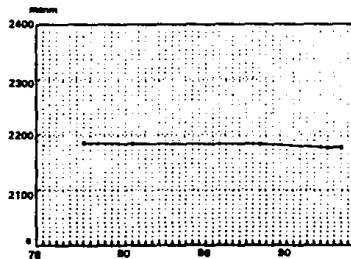


TABLA VII.2

## PIEZOMETRIA

CLAVE	ELEVAC MROCAL	PROF M. E.	ELEVAC M. E.	FECHA	PROF M. E.	ELEVAC M. E.	FECHA	PROF M. E.	ELEVAC M. E.	FECHA
M10	2146.42	14.98	2131.44	21/05	14.23	2132.1	15/08	13.50	2132.9	01/11
P19	2123.13	NSPS		26/05	68.20	2054.9	02/08	69.39	2053.7	07/11
M20	2112.53	11.62	2100.91	25/05	11.34	2101.1	04/08	10.61	2101.9	07/11
M24	2115.25	16.25	2099.00	17/05	17.68	2097.5	14/08	-----	-----	-----
P26	2118.09	22.13	2095.96	24/05	22.07	2096.0	14/08	26.69	2091.3	24/11
P27	2117.02	-----	-----	-----	15.51	2101.5	13/08	16.67	2100.3	24/11
P30	2126.40	64.66	2061.74	25/05	64.34	2062.0	02/08	64.43	2062.2	08/11
M32	2137.22	5.89	2131.33	24/05	5.09	2132.1	16/08	5.00	2132.2	01/11
P33	2336.39	48.36	2288.03	10/05	47.61	2288.9	24/07	47.66	2288.7	23/10
M34	2126.87	-----	-----	-----	6.90	2119.9	02/08	-----	-----	-----
M35	2143.64	3.61	2140.03	24/05	3.20	2140.4	02/08	-----	-----	-----
P39	2168.71	54.63	2114.08	28/05	55.94	2112.7	14/08	57.58	2111.1	24/11
M39a	-----	-----	-----	-----	7.02		15/08	5.86		01/11
P40	2163.89	58.57	2105.32	28/05	NSPS		-----	61.23	2102.6	24/11
P41	2166.57	57.97	2108.60	26/05	58.37	2108.2	16/08	-----	-----	-----
P43	2165.47	10.92	2154.55	25/05	10.73	2154.7	02/08	10.50	2154.9	01/11
P44	2169.73	4.65	2185.08	29/05	4.82	2164.9	16/08	4.68	2185.0	24/11
P46	2265.39	25.02	2240.95	11/05	7.98	2257.9	17/08	7.85	2258.1	10/11
P48	2176.87	51.68	2125.19	01/06	52.08	2124.7	15/08	-----	-----	-----
P48B	2175.30	49.58	2125.72	01/06	50.01	2125.2	15/08	-----	-----	-----
P49	2208.68	68.57	2132.11	27/05	69.33	2131.3	11/08	70.55	2130.1	24/11
P53*	2124.88	2.22	2122.66	26/05	NSPS		-----	-----	-----	-----
P63	2129.70	30.22	2099.48	25/05	28.58	2101.1	02/08	-----	-----	-----
P83		3.42		11/05	5.95		26/07	3.13		23/10
P88		8.34		11/05	7.50		06/08	7.35		21/10
P90*		89.77		30/05	NSPS		-----	-----	-----	-----
M91		16.13		14/05	16.14		06/08	-----	-----	-----
P95	2300.62	55.67	2244.95	14/05	54.97	2245.6	17/08	-----	-----	-----
P113	2322.75	23.55	2299.20	28/04	23.35	2299.4	23/07	22.54	2300.2	20/10
M148	2164.07	27.50	2136.57	20/05	26.49	2137.5	09/08	26.66	2137.4	01/11
M178	2155.36	15.56	2139.80	22/05	15.52	2139.8	14/08	15.41	2139.9	31/10
M247		11.49		21/05	10.18		14/08	-----	-----	-----
P297	2389.66	63.02	2326.64	04/05	61.93	2327.7	24/07	62.61	2327.8	20/10
P308	2188.58	-----	-----	-----	82.43	2026.1	15/05	85.70	2022.8	05/11
P329	2226.43	7.94	2218.49	11/05	5.81	2218.6	28/07	5.47	2218.9	06/11
P341		10.69		15/05	10.60		28/06	10.49		28/10
P342	2240.53	33.48	2207.05	11/05	33.09	2207.4	05/08	32.92	2207.6	28/10
P349	2390.92	44.39	2346.53	06/05	36.18	2354.7	24/07	29.92	2361	20/10
P350*		20.01		12/05	NSPS		-----	-----	-----	-----
P353		13.81		11/05	12.88		04/08	12.80		23/10
P354	2277.36	15.41	2261.95	10/05	14.78	2262.5	06/08	14.75	2262.6	23/10
P355	2288.47	27.98	2252.49	10/05	27.19	2253.2	25/07	26.84	2253.6	21/10
P357		22.11		10/05	21.86		06/08	22.16		21/10
P386		-----		-----	6.61		26/07	6.64		21/10
P483		62.79		28/05	62.75		13/08	-----	-----	-----
M513		9.27		23/05	9.44		11/08	8.79		01/11
M517		19.66		25/05	20.77		14/08	19.32		08/11
P518a*		38.42		25/05	NSPS		-----	-----	-----	-----

M523*	15.11		27/05	MSPS	-----	-----	-----			
P523*	13.32		27/05	MSPS	-----	-----	-----			
M528	19.81		23/05	20.38	11/08	20.01	01/11			
M532	16.16		19/05	15.83	13/08	15.03	31/10			
M548	21.97		22/05	21.99	09/08	21.28	31/10			
M550	2212.09	15.46	2196.63	11/05	15.46	2196.6	28/10			
M577	11.80		23/05	9.80	10/08	10.71	05/11			
P579	2081.65	-----	-----	27.49	2054.1	16/08	27.25	2054.4	28/10	
P587	2113.17	81.41	2031.76	25/05	81.76	2031.4	04/08	85.74	2027.4	28/10
P605		60.85		01/06	60.79		10/08			-----
P613	2212.55	92.62	2119.93	29/05	89.97	2122.5	11/08	91.44	2121.1	24/11
P617	2188.11	-----	-----	-----	11.61	2176.5	04/08	11.41	2176.7	30/10
M620		3.66		20/05	3.08		04/08	3.24		30/10
P636	2274.93	60.79	2214.14	09/05	41.40	2233.5	04/08	41.39	2233.5	22/10
P638	2323.83	60.79	2262.84	09/05	41.40	2282.2	25/08	41.39	2282.2	22/10
P647	2305.72	18.76	2286.96	28/04	18.62	2287.0	23/07	18.89	2286.8	01/11
P648	2373.44	17.54	2355.91	05/05	16.65	2356.7	24/07	16.66	2356.7	21/10
P650	2350.11	26.62	2323.50	05/05	25.69	2324.4	24/07	25.56	2324.5	20/10
P654		17.07		27/04	17.14		21/07	17.40		23/10
P662	2341.49	44.84	2296.65	27/04	44.00	2297.4	21/07	44.54	2296.9	23/10
M695*		24.13		11/05	MSPS					-----
P782		40.30		17/05	39.82		02/08			-----
P792*	2156.65	63.23	2093.42	29/05	MSPS					-----
P810		83.50		17/05	76.45		30/06	67.63		25/10
P814	2400.83	90.86	2309.97	16/05	90.35	2310.4	30/06	91.68	2309.1	25/10
P842	2378.22	85.04	2293.18	16/05	84.28	2293.9	30/06	MSPS		25/10
P843	2256.43	82.46	2233.97	20/05	23.74	2232.6	28/07	25.44	2230.9	28/10
P859	2289.17	31.67	2257.50	17/05	31.53	2257.6	30/06	31.22	2257.9	25/10
P867	2347.88	35.34	2312.54	16/05	35.40	2312.4	30/06	35.19	2312.8	25/10
P888	2370.99	52.67	2318.32	16/05	52.16	2318.8	30/06	52.37	2318.6	25/10
P889		24.40		15/05	24.20		28/06	24.05		23/10
P890	2236.43	11.05	2225.38	15/05	11.56	2224.8	28/06	11.71	2224.7	23/10
P898	2238.42	13.75	2224.67	15/05	13.88	2224.5	21/06			-----
P903	2232.70	11.39	2221.31	12/05	11.34	2221.3	26/07	11.44	2221.2	23/10
P904	2250.81	28.90	2221.71	11/05	28.80	2221.8	26/07	29.16	2221.4	28/10
P905		-----	-----	-----	3.96		29/07			-----
P906	2249.92	17.80	2232.12	09/05	16.81	2233.1	31/06	16.61	2233.3	28/10
P913	2240.24	5.30	2234.94	09/05	5.60	2234.6	25/07	5.82	2234.4	23/10
P930	2243.98	-----	-----	-----	21.77	2222.2	26/07	22.30	2221.6	23/10
P933		56.65		15/05	50.47		03/07	63.52		27/10
P941		9.88		17/05	10.13		01/08	10.86		28/10
P946	2195.93	3.52	2192.41	17/05	3.43	2192.5	31/08	3.21	2192.7	28/10
P952	2219.88	24.27	2195.41	17/05	24.65	2195.0	01/08			-----
P954	2266.85	-----	-----	-----	6.51	2260.3	13/07	24.98	2241.8	28/10
P957*	2239.53	8.49	2231.04	29/05	MSPS					-----
P968	2397.08	91.30	2305.78	16/05	89.46	2307.6	30/07	90.78	2306.2	25/10
P970	2295.54	50.13	2245.41	17/05	48.37	2247.1	20/07	47.51	2248.0	26/10
P975	2330.37	68.30	2262.07	18/05	68.43	2261.9	31/07	68.83	2261.5	28/10
P979	2302.22	55.48	2246.74	18/05	55.01	2247.2	31/07	55.12	2247.0	28/10
P982		34.87		18/05	35.34		31/07	35.02		24/10
P983	2257.96	34.78	2223.18	18/05	34.69	2223.2	31/07	33.77	2224.1	28/10
P995		-----	-----	-----	13.57		02/08	13.49		24/10
M998 ****		22.52		20/05	22.32		13/08			-----
P1000	2245.65	33.97	2211.88	18/05	34.20	2211.4	01/08	33.99	2211.6	24/10
P1028	2196.51	-----	-----	-----	43.20	2153.3	11/08	43.99	2152.5	24/11
P1029	2182.20	-----	-----	-----	14.38	2167.8	11/08	14.39	2167.8	06/11

P1030	2132.17	40.09	2092.00	26/05	40.64	2091.5	13/08	40.02	2092.1	02/11
P1111		57.10		19/05	56.26		----	57.83		24/10
P1115	2181.46	0.40	2181.06	18/05	0.00	2181.4	04/08	0.60	2180.8	30/10
N1120		4.75		19/05	4.27		04/08	MSPS		----
P1134	2231.75	85.45	2146.30	30/05	84.63	2147.1	12/08	86.25	2145.5	05/11
P1140	2230.33	57.49	2180.84	25/05	56.82	2181.5	13/08	57.20	2181.1	07/11
P1155	2194.60	52.11	2142.57	26/05	51.44	2143.2	16/08	52.31	2142.3	03/11
P1180	2111.40	64.18	2047.30	27/05	70.33	2041.1	16/08	72.18	2039.3	02/11
P1204	2060.40	----	----	----	28.55	2039.8	14/08	27.51	2040.8	18/10
P1206	2078.53	----	----	----	34.63	2044.8	14/08	31.13	2040.3	18/10
P1208		40.79		30/05	41.76		04/08	SECO		----
N1210		11.70		01/06	12.31		----	----		----
P1215		----	----	----	11.87		16/08	----		----
P1248	2111.40	54.14	2017.34	29/05	MSPS		----	----		----
P1249		77.83		28/05	MSPS		----	----		----
P1280	2128.18	46.69	2081.49	27/05	39.11	2089.0	15/08	----		----
P1282	2118.62	50.45	2060.17	30/05	50.44	2060.1	11/08	50.69	2067.9	05/11
P1305	2291.63	13.09	2278.54	30/04	12.82	2278.8	23/07	13.13	2278.5	22/10
P1322	2364.00	----	----	----	55.91	2308.1	23/07	66.46	2297.6	22/10
P1349	2329.90	27.10	2302.80	26/04	27.50	2302.4	25/07	26.65	2303.3	20/10
P1350	2336.80	32.30	2304.50	26/04	31.63	2305.1	21/07	31.42	2305.3	22/10
N1365		----	----	----	10.87		21/07	----		----
P1419	2316.95	35.85	2281.10	04/05	36.59	2280.3	25/07	37.01	2279.9	21/10
P1436	2248.69	8.10	2240.59	14/05	7.82	2240.8	06/08	7.85	2240.8	23/10
P1438	2239.44	8.19	2231.25	15/05	8.01	2231.4	03/08	7.72	2231.7	30/10
P1440	2274.14	24.60	2249.46	10/05	24.60	2249.5	25/07	24.45	2249.6	21/10
P1460	2225.82	42.15	2193.67	12/05	42.36	2193.4	07/08	41.15	2194.6	28/10
P1478	2299.03	48.04	2250.99	16/05	46.74	2252.2	06/08	47.10	2251.9	28/10
N1556		19.17		19/05	19.16		11/08	18.66		01/11
P1557	2183.54	26.95	2156.59	19/05	25.12	2158.4	11/08	24.43	2159.1	01/11
P1709	2129.53	----	----	----	69.62	2059.9	15/08	71.42	2058.4	31/10
N1857		29.55		23/05	29.53		09/08	29.34		31/11
N1945	2185.24	26.46	2158.38	23/05	26.79	2158.4	14/08	26.32	2158.9	31/10
N1961	2144.71	16.41	2128.30	21/05	14.76	2129.9	14/08	13.75	2130.9	01/11
N1984	2132.18	10.87	2121.31	22/05	10.15	2122.0	15/08	10.39	2121.7	20/10
PEX5	2324.60	38.85	2285.83	28/04	38.52	2286.1	23/07	38.93	2285.7	23/10
PEX 1	2274.91	7.99	2266.92	28/04	8.00	2266.9	25/07	8.08	2266.8	20/10
PEX16	2433.41	32.58	2400.83	10/05	31.92	2401.4	24/07	31.36	2402.0	20/10
PEX18	2324.25	34.85	2289.41	12/05	33.22	2291.0	25/07	33.46	2290.7	21/10
PEX19	2345.19	48.49	2296.70	12/05	48.00	2297.1	29/07	48.02	2297.1	21/10
PEX20	2275.32	27.34	2247.98	11/05	27.28	2248.0	25/07	27.00	2248.3	21/10
PEX22	2226.87	8.52	2228.35	17/05	8.66	2228.2	01/08	8.51	2228.3	26/10
PEX23	2227.54	14.44	2213.10	18/05	14.21	2213.3	14/07	13.65	2213.8	28/10
PEX25	2183.46	0.29	2183.17	18/05	NOTAWTE		07/08	NOTAWTE		30/10
PEX26		21.92		19/05	21.90		07/08	23.39		28/10
PEX30		26.70		19/05	27.11		01/08	27.01		24/10
NEX31		16.13		19/05	16.54		04/08	16.12		30/10
NEX32		22.86		20/05	23.69		10/08	23.35		07/11
NEX33	2184.27	9.33	2174.94	20/05	9.27	2175	04/08	8.97	2175.2	30/10
NEX34		4.48		20/05	4.13		04/08	4.00		30/10
NEX35		11.39		23/05	11.78		18/08	----		----
NEX36	2136.28	16.75	2119.53	23/05	17.27	2119.0	11/08	16.64	2119.6	01/11
NEX38	2158.88	10.30	2148.58	23/05	10.74	2148.1	13/05	10.42	2148.4	01/11
PEX40		58.65		30/05	49.81		14/08	SECO		----
NEX41		13.16		01/06	13.61		17/08	----		----
NEX42		----	----	----	6.60		17/08	5.18		31/10

PEX10	2234.87	2.11	2232.76	11/05	1.86	2233.0	26/07	2.13	2232.7	23/10
NEX10	2251.34	15.61	2235.73	11/05	15.88	2235.4	25/07	-----	-----	-----
PEX10	2267.16	17.59	2249.57	14/05	16.95	2250.2	26/07	16.97	2250.1	24/10
NEX106		8.64		15/05	8.56		03/08	-----	-----	-----
PEX11	2226.48	32.16	2194.32	17/05	31.62	2194.8	31/07	30.79	2195.6	27/10
PEX11	2154.93	17.96	2136.97	19/05	17.73	2137.2	11/08	17.60	2137.3	31/11
NEX11	2152.53	15.20	2137.33	19/05	15.10	2137.4	13/08	14.16	2138.3	31/11
NEX11	2177.95	31.60	2146.35	20/05	31.02	2146.9	24/07	30.44	2147.5	31/11
NEX117		35.71		20/05	31.71		09/08	36.02		31/11
NEX118		22.83		21/05	22.74		09/08	22.60		31/11
NEX119		29.49		21/05	27.01		09/08	26.54		31/10
NEX12	2157.53	19.72	2137.81	21/05	18.96	2138.5	-----	18.81	2138.7	01/11
NEX12	2206.24	32.52	2173.71	22/05	32.16	2174.0	09/08	31.18	2175.0	31/10
NEX123		5.30		22/05	4.94		09/08	4.82		31/10
NEX124		21.63		22/05	21.43		14/08	HSPS	-----	-----
NEX127		30.21		22/05	29.41		14/08	29.44		31/11
NEX12	2161.92	16.99	2144.93	22/05	16.91	2145.0	09/08	16.74	2145.1	31/11
NEX12	2120.50	9.06	2111.44	23/05	7.84	2112.6	-----	7.01	2113.4	05/11
NEX130		17.66		23/05	16.42		10/08	14.22		05/11
NEX131		14.50		23/05	11.47		10/08	9.11		05/11
NEX132		12.29		23/05	11.91		10/08	10.79		05/11
NEX133		17.52		23/05	17.13		10/08	17.29		05/11
PEX20	2295.18	-----	-----	-----	48.29	2246.8	30/07	47.12	2248.0	26/10
PEX208		-----	-----	-----	5.55		03/08	5.50		24/10
PEX21	2289.72	-----	-----	-----	3.42	2206.3	08/08	3.54	2206.1	30/10
PEX212		63.37		13/05	-----		-----	-----	-----	-----
PEX21	2183.77	-----	-----	-----	3.66	2180.1	07/07	0.90	2182.8	30/10
PEX214		-----	-----	-----	1.44		07/07	2.86		04/11
PEX215		11.49		20/05	11.87		16/08	-----	-----	-----
PEX216		12.52		20/05	12.89		16/08	-----	-----	-----
PEX217		8.48		30/05	8.34		05/08	-----	-----	-----

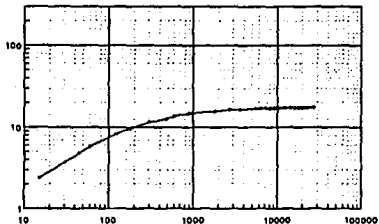
TABLA VII.3

No. de Aprob.	B O N O F I C O		R E C U P E R A C I O N		VALOR
	JACOB (+)	IMEIS (+)	JACOB (+)	IMEIS (+)	ACEPTADO (+)
33		0.987	10.31	6.266	3.876
53	0.228	0.245	0.21	0.945	0.210
113			0.65	0.611	0.65
329	1.316		4.78	4.180	3.853
355	3.310	3.151	3.22	3.256	3.765
517	10.330	12.250	21.63		12.750
	5.651				
547	23.800	16.630	21.20	17.307	17.869
	2.379		5.75		
659	0.469	0.374	0.43	0.623	1.31
	1.310	1.061			
903	12.976	5.063	11.15	9.952	12.863
	5.000		5.29		
906	5.720	5.960	6.70	6.560	6.21
941	36.690	19.890			19.89
970	0.670	0.653	0.64	1.643	2.24
	2.270	2.260	2.21		
1115	1.610	1.615	1.42	3.632	3.735
	3.546		3.93	1.823	
1131	12.710	12.800	16.10	15.250	12.71
1155	2.150	1.660	2.00	1.320	1.870
1180	7.974	6.270	0.53	6.730	6.452
1249			2.05		2.09
1280	0.670	0.665	0.60	0.227	0.370
	0.366	0.239	0.39	0.966	
1290	11.89	25.78	22.67		11.89
1177	1.560	1.213	1.31	5.292	10.515
	10.370		10.70		
1557	10.000	16.830	24.54	32.223	16.43
	0.200				
La Aurora	0.770	0.613	0.85	0.656	0.812

(+): (+)RECIP-2 m2/s)



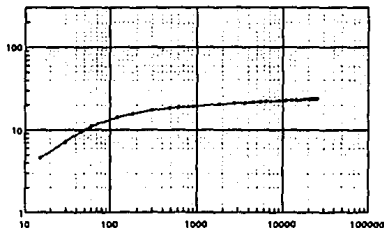
### BOMBEO POZO 53



Interpretado por Thiele

$$T = 0.266 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

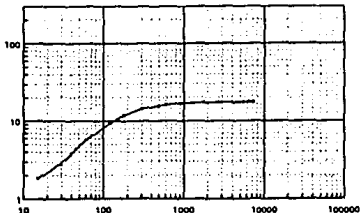
### BOMBEO POZO 979



Interpretado por Thiele

$$T = 2.280 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

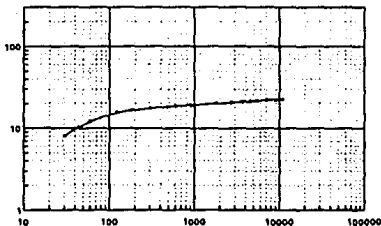
### RECUPERACION POZO 53



Interpretado por Thiele

$$T = 0.915 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

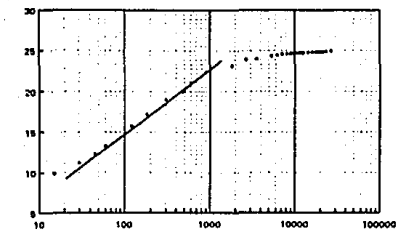
### RECUPERACION POZO 979



Interpretado por Thiele

$$T = 1.849 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

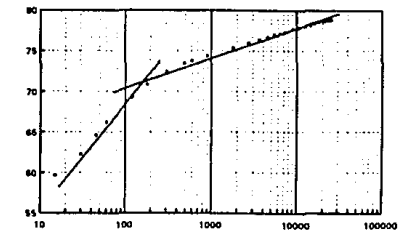
### BOMBEO POZO 53



Interpretado por Jacob

$$T = 0.226 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

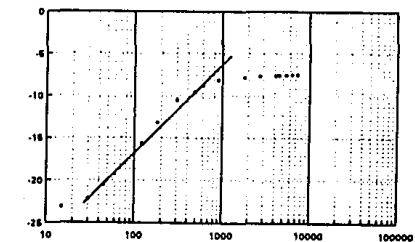
### BOMBEO POZO 979



Interpretado por Jacob

$$T = 2.270 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

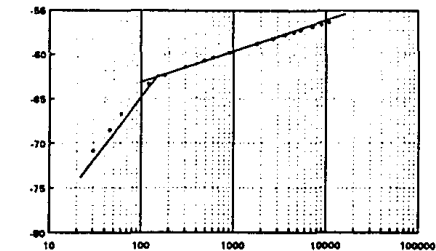
### RECUPERACION POZO 53



Interpretado por Jacob

$$T = 0.21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

### RECUPERACION POZO 979



Interpretado por Jacob

$$T = 2.21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

## CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DEL AGUA (HIDROGEOQUIMICA)

## VIII.1 INTRODUCCION

La Hidrogeoquímica se encarga del estudio de los aspectos geoquímicos del agua en sí, determinando las características y el comportamiento de los elementos químicos que contiene, así como sus dispersiones y concentraciones, además de sus relaciones con las rocas de la corteza terrestre. Esta ciencia también interviene en aspectos prácticos como criterios de potabilidad, usos agrícolas, contaminación, almacenamiento de aguas residuales en embalses subterráneos, etc.

La forma de realizar dicho estudio consiste en tomar muestras de agua de diferentes fuentes, las cuales son analizadas químicamente con el fin de observar los cambios de calidad química que ocurren en el espacio y el tiempo, los cuales proporcionan información que casi siempre es posible relacionar con: las condiciones climatológicas, la geología regional, el funcionamiento hidrogeológico, etcétera.

La interpretación geoquímica del agua subterránea, junto con la geología, hidrología y geofísica pueden conducir al entendimiento del funcionamiento del acuífero, planeando así una explotación más racional del mismo.

Las rocas por las cuales circula el agua subterránea producen cambios importantes en la composición original de ésta, ya que disuelve las sales minerales que las forman. De ésta forma, la química del agua dependerá en gran parte de la composición del agua de recarga, condiciones climáticas, evaporación y transpiración, condiciones de oxidación-reducción, composición de las rocas por las que circula, superficie de contacto, longitud del recorrido, tiempo de contacto, concentraciones de sales en la roca, difusión de las sales, temperatura, presión, permeabilidad, solubilidad de la roca.

Con base en lo descrito anteriormente, podemos decir que la composición del agua está relacionada con el funcionamiento general del acuífero, por lo que a partir de su composición química se puede obtener la dirección del movimiento del agua subterránea, la localización de las zonas de recarga, los tipos de roca por las que circula, así como algunas características físicas del acuífero y la calidad del agua para diversos usos.

Se analizaron un total de 77 muestras, distribuidas en toda el área de estudio. Los parámetros solicitados en los análisis fueron conductividad, pH, dureza, Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Aluminio, Bicarbonato, Sulfato, Nitrato, Cloro, etc. (los resultados en partes por millón se muestran en la tabla VIII.1 y en la tabla VIII.2 se muestran éstos en miliequivalentes por litro) los resultados fueron clasificados y organizados, con

lo que se realizaron los cálculos necesarios para una interpretación adecuada, así como elaborar diagramas y curvas de isovalores en el plano base. Con base en la interpretación se elaboraron curvas de isovalores de Sólidos Totales Disueltos (STD), Mg, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>H, Na y Ca, así mismo, se graficaron los aniones y cationes en diagramas de Palmer-Pipper, a fin de obtener la correlación de las aguas en el acuífero, también se realizaron gráficas de Conductividad Eléctrica contra el valor SAR con fines de uso agrícola y gráficas de Stiff.

Con la interpretación hidrogeoquímica se concluye que el agua que forma el acuífero del "Valle de Puebla" proviene de la lluvia, parte de la cual se infiltra y circula a través de las rocas disolviendo las sales existentes e incrementando su contenido salino conforme avanza. La cantidad y tipo de sales disueltas está en relación directa con el tipo y solubilidad de las rocas con las cuales tiene contacto. En el Valle de Puebla las rocas existentes, volcánicas, sedimentarias continentales y lacustres son las que proporcionan las sales que se encuentran disueltas en el acuífero.

En el área de la Ciudad de Puebla las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos y de todos los iones se salen del esquema anterior, para poder explicar esto se tienen las siguientes teorías:

1) Las aguas son de origen volcánico y ascienden en esta zona debido a sus características estructurales.

2) El agua de mala calidad proviene del acuífero calcáreo profundo y de las capas semiconfinadas del acuífero somero (el acuífero somero presenta lentes y capas de arcilla que le dan un carácter de acuífero confinado o semiconfinado). El agua que asciende por las fracturas y fallas (Falla Profunda Malinche, Falla Puebla, Fractura Valsequillo) que se intersectan en esta zona ha estado mucho tiempo en contacto con estas rocas, por lo que su contenido en sales es muy elevado.

3) El agua de mala calidad proviene de un flujo regional que aprovecha las características estructurales para ascender en esta área.

4) La teoría que parece ser la más acertada es aquella que nos dice que el agua de mala calidad se debe a la combinación de las hipótesis 1 y 2. Un punto a favor de esta hipótesis es la presencia de travertino en el área conflictiva, lo cual indica que el agua que sale a la superficie estuvo en contacto con rocas calcáreas. Otro factor que apoya esta teoría es la presencia de aprovechamientos con temperaturas por arriba del promedio general, lo que nos sugiere alguna relación con una fuente volcánica. Por último, tenemos la presencia de un geiser fósil, lo que nos indica la relación del agua con una fuente volcánica, el agua de éste ha formado travertino, lo que indica que esa agua caliente también estuvo en contacto con los materiales calcáreos.

TABLA VIII.1

## ANÁLISIS QUÍMICO

No. Aprox.	CE Lab	pm Lab	RIK.	Lab Dur	Tot	Dur Cor	ppm Ca	ppm Mg	ppm Na	ppm K	ppm MO3	ppm CO3	ppm Cl	ppm SO4	ppm NO3	ppm F	ppm Fe	ppm STD
5	833.00	7.60	424.00	252.00	384.50	86.74	21.20	10.4	455.32	0.00	20.20	23.00	13.20	0.32	0.44	787.10		
20	276.00	7.57	127.00	73.20	111.20	22.33	13.55	8.51	8.0	154.94	0.00	3.50	7.00	19.00	0.29	0.50	247.60	
24	710.00	7.42	184.00	156.10	255.20	73.91	21.83	12.59	10.8	224.44	0.00	52.10	15.00	13.20	1.16	0.40	440.50	
27	1350.00	7.09	580.00	421.00	640.30	162.49	40.74	13.1	610.00	0.00	44.70	150.00	24.20	0.25	0.40	1132.00		
32	1740.00	6.73	650.00	623.00	544.40	236.33	43.47	51.29	17.6	793.09	0.00	37.00	650.00	28.60	0.69	0.20	1572.00	
34	1911.00	6.96	574.00	677.00	1020.00	255.29	74.45	53.70	13.0	700.20	0.00	51.00	450.00	22.00	1.41	0.10	1659.00	
41	558.00	7.60	197.00	167.00	254.20	78.63	18.99	11.22	5.7	240.34	0.00	19.00	18.00	35.20	0.28	0.20	476.50	
43	1211.00	7.20	486.00	440.10	604.50	167.13	43.61	69.18	8.0	695.32	0.00	52.00	260.00	4.10	0.11	0.40	1013.00	
46	2350.00	6.50	810.00	835.10	1300.50	410.82	66.77	69.18	11.6	997.96	0.00	37.50	580.00	27.00	1.26	0.40	2164.20	
51	2070.00	6.60	678.00	797.50	1212.30	384.78	61.78	66.66	12.0	766.16	0.00	53.50	450.00	22.00	1.26	0.20	1647.00	
53	1260.00	7.23	352.00	410.40	621.00	206.53	26.48	22.20	7.2	429.44	0.00	40.00	340.00	19.00	0.24	0.20	1113.00	
83	381.00	7.31	121.00	92.60	110.00	22.93	20.29	8.71	2.3	117.82	0.00	8.40	25.00	20.00	0.24	0.20	279.80	
85	200.00	7.61	90.50	49.30	75.00	9.88	12.29	5.55	2.0	119.56	0.00	0.30	3.00	15.00	0.76	0.35	180.40	
85	206.00	7.89	93.00	51.30	78.00	11.32	12.14	8.55	2.0	113.46	0.00	2.20	2.00	8.00	0.81	0.20	163.40	
329	803.00	7.74	214.00	177.20	263.70	51.47	21.43	20.02	8.9	281.04	0.00	11.30	12.00	8.00	0.11	0.20	457.20	
349	181.00	7.32	66.50	50.30	76.50	18.59	12.22	2.62	2.5	80.52	0.00	1.60	10.00	15.00	0.20	0.30	142.50	
403	260.00	8.14	104.00	61.40	93.10	27.30	6.09	6.17	3.5	126.00	0.00	2.90	2.00	11.00	0.15	0.30	183.00	
524	287.00	7.31	99.00	73.30	111.50	15.41	16.12	6.46	5.2	120.70	0.00	13.00	3.00	22.00	0.19	0.30	211.40	
605	1710.00	7.22	651.00	524.60	737.90	203.49	70.80	36.31	10.4	843.02	0.00	21.00	250.00	8.00	0.20	0.25	1983.00	
613	135.50	8.00	92.00	49.20	75.00	22.69	4.44	2.63	2.9	152.21	0.00	1.60	7.00	13.20	0.10	0.40	172.30	
629	683.00	7.59	226.00	177.00	270.40	61.70	28.47	13.49	6.0	275.72	0.00	22.40	52.00	41.00	0.23	0.40	528.00	
636	320.00	7.42	114.00	82.40	125.30	28.44	18.12	11.75	7.0	143.96	0.00	4.50	18.00	17.20	0.20	0.40	243.20	
650	315.00	7.52	141.00	82.50	125.50	24.64	15.60	7.59	5.0	307.96	0.00	5.00	1.00	13.20	0.40	0.20	253.00	
800	244.00	7.65	100.00	53.20	80.90	16.91	5.43	7.24	2.7	224.24	0.00	3.40	5.00	13.20	0.20	0.40	260.50	
904	621.00	7.41	177.00	20.30	137.20	18.12	22.47	12.20	4.9	215.94	0.00	2.00	3.00	11.00	0.19	0.25	312.60	
905	525.00	7.45	300.00	155.20	226.00	67.45	28.67	13.49	7.6	286.00	0.00	6.20	15.00	13.20	0.42	0.40	514.40	
906	650.00	7.76	314.00	177.70	270.30	56.64	31.42	15.14	13.4	383.00	0.00	5.00	10.00	15.00	0.40	0.40	545.50	
906	661.00	7.21	352.00	196.20	290.40	58.16	37.36	24.55	12.2	429.44	0.00	7.20	0.00	13.20	0.40	0.50	602.50	
927	625.00	7.20	184.00	121.00	144.00	29.50	26.92	13.00	5.9	224.44	0.00	8.00	12.00	24.20	0.22	0.30	354.50	
933	104.00	7.84	212.00	120.50	183.30	43.31	18.21	18.05	10.2	258.64	0.00	7.50	6.00	20.00	0.51	0.30	410.20	
946	419.00	7.90	190.00	110.00	178.50	37.66	20.83	11.75	8.6	237.00	0.00	12.60	0.00	22.00	0.20	0.20	361.10	
957	197.00	7.52	57.00	31.20	47.50	5.43	5.03	5.25	2.1	303.00	0.00	2.20	3.00	13.20	0.13	0.30	113.50	
955	100.50	7.52	75.00	50.00	76.09	16.55	8.47	5.75	2.7	224.44	0.00	4.70	5.00	17.60	0.44	0.30	155.20	
1024	263.00	8.12	192.00	103.40	157.30	35.16	16.93	10.96	7.0	224.24	0.00	3.20	5.00	13.20	0.23	0.20	324.10	
1029	2110.00	6.59	740.00	769.60	1170.50	318.82	72.41	54.95	10.9	902.09	0.00	4.00	450.00	11.00	1.32	0.80	1847.50	
1030	1006.00	7.27	346.00	322.50	431.10	124.71	43.78	25.70	10.3	422.12	0.00	37.20	160.00	24.20	0.21	0.20	868.00	
1080	667.00	7.87	264.00	140.10	217.10	58.77	16.15	20.51	8.0	324.52	0.00	22.00	57.00	13.20	0.37	0.40	562.90	
1115	680.00	7.65	248.00	128.30	195.10	40.89	23.17	27.54	12.9	351.26	0.00	5.20	18.00	8.00	0.26	0.40	589.00	
1134	205.00	9.09	101.00	62.60	95.20	27.94	6.16	4.90	3.2	123.22	0.00	1.10	2.00	17.60	0.36	0.30	183.40	
1136	333.00	7.50	149.00	34.70	114.00	23.05	26.61	7.24	5.4	181.70	0.00	4.70	2.00	14.00	0.52	0.40	271.20	
1180	219.00	8.00	104.00	18.50	92.00	27.07	5.94	4.57	3.3	126.00	0.00	1.50	6.00	11.00	0.15	0.20	192.20	
1180	219.00	8.00	104.00	40.50	92.00	27.07	5.94	4.57	3.3	429.44	0.00	1.50	6.00	11.00	0.15	0.20	192.20	
1204	1150.00	7.10	476.00	410.00	484.00	163.60	10.74	69.50	7.5	580.72	0.00	40.00	90.00	12.10	1.10	0.10	1067.20	
1210	374.00	7.67	170.00	181.10	153.00	35.47	15.89	9.12	8.0	218.20	0.00	0.60	4.00	10.00	0.33	0.40	322.00	
1240	640.00	7.20	413.00	242.20	360.40	83.59	30.52	21.62	14.9	506.20	0.00	20.00	80.00	11.00	0.19	0.15	841.50	
1249	380.00	7.96	680.00	127.40	850.20	157.44	62.69	21.40	12.1	829.26	0.00	10.00	110.00	32.20	0.25	0.14	1262.20	
1280	1475.00	7.34	382.00	202.10	307.40	72.27	30.33	45.70	15.4	380.44	0.00	10.50	150.00	11.00	0.15	0.40	786.70	
1280	1540.00	6.74	924.00	900.00	564.00	225.60	41.09	111.00	14.4	1127.20	0.00	26.00	150.00	8.00	0.30	0.40	1740.20	
1310	128.50	7.57	62.00	28.80	43.00	6.01	6.34	2.63	2.0	75.64	0.00	2.10	5.00	8.00	0.10	0.20	118.00	
1322	201.00	8.15	91.00	43.50	66.20	18.77	9.58	5.12	4.3	114.60	0.00	2.20	0.00	11.00	0.22	0.20	177.50	

TABLE VIII.1  
(CONTINUATION)

ANALYSIS DATUM

No. Aprox.	CC Lab	pH Lab	Alt. Lab	Dur Tot	Dur Cor	ppm Ca	ppm Mg	ppm Na	ppm K	ppm HCO3	ppm CO3	ppm Cl	ppm SO4	ppm NO3	ppm F	ppm Fe	ppm STD
1364	229.00	0.31	60.00	37.00	56.30	9.73	7.00	15.85	3.2	73.20	0.00	2.50	0.00	17.00	0.20	0.30	123.50
1365	304.00	7.20	100.00	70.00	120.10	21.05	16.45	7.54	6.9	131.76	0.00	4.30	3.00	26.40	0.21	0.30	224.00
1037	300.00	7.52	103.00	75.50	116.00	17.16	17.57	10.72	3.5	174.46	0.00	3.30	10.00	13.20	0.32	0.40	261.60
1448	206.00	7.30	136.00	70.20	106.00	12.41	10.49	13.00	3.9	185.92	0.00	4.00	1.00	0.00	0.20	2.00	213.40
1507	1523.00	7.03	257.00	203.00	520.50	137.73	62.17	51.29	10.4	323.54	0.00	4.00	00.00	0.00	0.20	1.00	1364.30
1703	250.00	6.40	244.00	225.10	342.30	71.60	39.00	25.12	0.3	216.40	0.00	14.50	22.00	50.40	0.22	0.45	532.50
1945	423.00	6.39	204.00	176.00	174.00	25.60	27.01	17.10	4.4	210.00	0.00	0.00	3.00	13.20	0.30	0.30	210.90
Exy 1	352.00	7.41	204.00	106.90	162.00	22.69	25.05	11.75	4.7	210.00	0.00	2.20	4.00	0.00	0.10	0.50	236.00
Exy 25	350.00	7.72	170.00	94.30	163.40	27.93	10.46	14.92	4.0	217.15	0.00	4.70	3.00	0.00	0.27	0.30	300.30
Exy 21	261.00	7.42	90.00	66.10	100.50	19.95	12.37	5.00	7.1	119.50	0.00	5.40	12.00	17.50	0.22	0.50	206.40
Exy 22	449.00	7.55	100.00	105.10	159.00	22.41	25.10	4.07	5.5	219.60	0.00	7.30	15.00	17.02	0.24	0.40	193.00
Exy 27	215.00	7.60	82.00	50.50	89.00	21.35	0.69	16.45	3.5	261.00	0.00	4.00	0.00	24.20	0.19	0.15	320.60
Exy 26	7.40	7.55	223.60	201.00	256.50	61.57	37.26	17.20	0.0	269.62	0.00	32.20	00.00	33.60	0.20	0.25	556.60
Exy 42	657.00	7.21	232.00	104.60	200.00	67.22	27.52	12.00	216.6	203.00	0.00	25.50	10.00	4.60	0.20	0.40	661.00
Exy 105	432.00					42.10	10.70	12.50	4.6	173.24	0.00	7.30	50.00	49.50	0.22	0.40	371.00
Exy 116	350.00	7.41	83.00	97.20	140.00	20.47	10.75	7.41	5.7	101.26	0.00	7.50	7.00	50.60	0.21	0.30	232.50
Exy 117	207.00	6.96	34.00	52.30	73.50	20.60	6.00	6.17	5.5	85.00	0.00	13.00	5.00	24.20	0.27	0.50	151.30
Exy 123	315.00	0.42	140.00	96.30	146.50	22.51	22.02	10.23	5.3	101.70	0.00	3.00	4.00	0.00	0.61	0.20	246.60
Exy 124	191.00	7.19	92.00	53.00	81.00	12.53	12.33	0.71	4.2	112.24	0.00	1.90	1.00	13.20	0.10	0.30	171.50
Exy 120	225.00	7.32	76.00	63.10	96.00	15.15	16.19	6.46	2.9	92.72	0.00	3.00	0.00	24.40	0.25	0.30	187.00
Exy 131	512.00	7.53	252.00	140.10	225.20	30.37	31.45	15.11	0.0	307.44	0.00	1.20	3.00	19.00	0.41	0.50	443.60
Exy 132	166.00	7.07	171.00	200.70	317.40	61.85	37.92	10.20	15.0	200.62	0.00	37.90	03.00	96.00	0.24	0.20	564.00
Exy 133-H	440.00	7.14	176.00	103.20	103.20	27.04	27.74	14.50	5.3	216.72	0.00	9.40	6.00	22.00	0.21	0.30	320.10
Exy 203	1370.00	6.91	656.00	250.50	393.00	77.07	40.61	63.10	16.2	403.12	0.00	21.70	0.00	17.60	0.50	0.00	1932.40
Exy 204	550.00	7.73	310.00	100.00	207.10	77.14	23.02	9.35	10.9	307.96	0.00	0.30	12.00	13.20	0.28	0.30	557.30
Exy 213	637.00	7.63	312.00	71.20	100.30	23.71	12.26	50.00	11.3	300.64	0.00	14.00	0.00	0.00	0.30	0.40	566.90
Exy 214	237.00	7.75	116.00	81.50	126.00	25.72	17.01	12.50	3.4	178.12	0.00	3.50	3.00	11.00	0.50	0.40	250.40
Exy 220	190.50	7.64	92.00	47.50	72.00	15.01	11.07	6.03	3.0	192.24	0.00	2.50	5.00	17.00	0.20	0.10	176.90
Exy 221	326.00	7.35	162.00	93.00	142.70	40.35	10.32	7.24	6.3	346.00	0.00	2.70	2.00	11.00	0.30	0.45	205.90
Exy 222	2430.00	6.41	250.00	091.60	1356.00	110.33	00.62	06.07	12.5	926.70	0.00	15.00	500.00	0.00	0.16	0.10	2049.30
Cholula	495.00	7.02	210.00	205.00	205.60	34.16	29.35	19.70	4.0	275.72	0.00	4.40	7.00	22.00	0.37	0.30	297.00
Comp. Cruz	590.00	6.72	300.00	239.00	3402.00	606.00	141.62	316.23	20.0	1107.76	0.00	100.40	1625.00	4.40	1.54	0.60	3331.00
Sla. Just.	901.00	7.57	301.00	192.50	293.40	60.23	29.30	36.31	10.5	375.76	0.00	61.00	20.00	41.00	0.16	0.30	670.90

TABLE VIII.2

ANALISIS QUIMICOS EN ALIQUOTANTES POR LITRO

No. Aprox.	eqn Ca	eqn Mg	eqn Na	eqn K	eqn HCO3	eqn CO3	eqn Cl	eqn SO4	eqn NO3	eqn F	eqn Fe
5.00	4.44	3.31	0.93	0.27	0.12	0.00	0.57	0.44	0.21	0.02	0.01
20.00	1.12	1.13	0.37	0.20	2.54	0.00	0.10	0.15	0.32	0.02	0.01
24.00	3.70	2.33	0.55	0.38	3.60	0.00	1.50	0.31	0.21	0.01	0.01
27.00	0.12	4.74	1.77	0.31	10.00	0.00	1.37	1.37	0.30	0.01	0.01
32.00	14.92	4.12	2.23	0.46	13.00	0.00	1.04	3.30	0.46	0.03	0.00
34.00	16.76	5.93	2.77	0.35	11.44	0.00	1.10	1.35	0.35	0.07	0.00
41.00	3.53	1.50	0.49	0.15	3.04	0.00	0.53	0.70	0.57	0.01	0.00
42.00	0.11	4.13	1.01	0.23	0.12	0.00	1.17	1.17	0.07	0.01	0.01
46.00	20.54	2.56	3.04	0.20	16.30	0.00	1.06	10.42	0.14	0.02	0.01
51.00	10.24	5.11	2.00	0.35	12.50	0.00	1.51	3.20	0.35	0.07	0.00
53.00	14.33	2.21	0.07	0.10	7.04	0.00	1.12	7.00	0.32	0.01	0.01
63.00	1.15	1.70	0.20	0.00	2.42	0.00	0.27	0.52	0.50	0.01	0.00
95.00	0.45	1.02	0.42	0.07	1.96	0.00	0.03	0.06	0.25	0.04	0.01
95.00	0.57	1.01	0.42	0.07	1.01	0.00	0.04	0.04	0.16	0.04	0.00
329.00	2.57	2.07	1.05	0.23	1.20	0.00	0.32	1.25	0.11	0.02	0.01
319.00	0.53	1.02	0.16	0.06	1.22	0.00	0.05	0.21	0.25	0.01	0.01
403.00	1.37	0.51	0.27	0.09	2.00	0.00	0.00	0.04	0.10	0.01	0.01
520.00	0.97	1.34	0.20	0.13	1.90	0.00	0.39	0.06	0.35	0.01	0.01
605.00	10.17	5.00	1.50	0.47	13.07	0.00	0.50	5.21	0.16	0.01	0.01
613.00	1.13	0.37	0.10	0.07	1.04	0.00	0.05	0.15	0.21	0.01	0.01
620.00	3.04	2.39	0.50	0.20	4.52	0.00	0.63	1.00	0.67	0.01	0.01
636.00	1.02	1.51	0.51	0.10	2.30	0.00	0.13	0.20	0.20	0.01	0.01
858.00	1.23	1.30	0.23	0.13	0.26	0.00	0.16	0.21	0.21	0.02	0.01
840.00	0.05	0.79	0.21	0.07	3.01	0.00	0.10	0.10	0.21	0.02	0.01
904.00	0.31	1.07	0.53	0.13	3.54	0.00	0.06	0.06	0.10	0.01	0.00
905.00	2.37	2.30	0.59	0.10	0.00	0.00	0.17	0.21	0.21	0.02	0.01
906.00	2.03	2.62	0.44	0.24	6.20	0.00	0.16	0.21	0.25	0.02	0.01
906.00	2.91	3.11	1.07	0.21	7.04	0.00	0.20	0.17	0.21	0.02	0.01
927.00	1.40	2.24	0.40	0.15	3.60	0.00	0.25	0.25	0.20	0.01	0.01
933.00	2.17	1.53	0.03	0.26	1.21	0.00	0.22	0.13	0.50	0.03	0.01
946.00	1.00	1.74	0.51	0.22	3.00	0.00	0.36	0.17	0.35	0.02	0.00
957.00	0.47	0.40	0.23	0.05	6.20	0.00	0.06	0.06	0.21	0.01	0.01
935.00	0.07	0.71	0.25	0.07	3.60	0.00	0.12	0.10	0.26	0.01	0.01
1024.00	1.70	1.11	0.40	0.20	3.04	0.00	0.09	0.10	0.21	0.02	0.00
1029.00	17.44	6.07	2.39	0.20	11.00	0.00	0.11	0.30	0.10	0.06	0.01
1030.00	0.24	3.65	1.12	0.26	6.32	0.00	1.05	3.23	0.20	0.01	0.00
1100.00	2.94	1.25	1.20	0.23	5.37	0.00	0.02	1.10	0.21	0.02	0.01
1115.00	2.00	1.93	1.20	0.33	5.76	0.00	0.15	0.21	0.14	0.02	0.02
1134.00	1.10	0.51	0.21	0.00	2.02	0.00	0.02	0.04	0.20	0.01	0.01
1130.00	1.10	1.72	0.21	0.14	2.90	0.00	0.12	0.04	0.23	0.03	0.01
1100.00	1.25	0.50	0.20	0.06	2.00	0.00	0.04	0.13	0.10	0.01	0.01
1100.00	1.25	0.50	0.20	0.00	7.04	0.00	0.04	0.13	0.10	0.01	0.01
1204.00	0.10	0.90	2.15	0.10	9.57	0.00	1.15	1.00	0.20	0.06	0.00
1210.00	1.77	1.32	0.40	0.20	3.50	0.00	0.02	0.00	0.32	0.02	0.01
1210.00	4.10	3.24	1.37	0.30	0.30	0.00	0.01	1.67	0.10	0.01	0.01
1219.00	7.07	5.22	0.93	0.31	13.76	0.00	0.52	2.29	0.21	0.01	0.00
1200.00	2.01	2.50	1.99	0.12	6.04	0.00	0.52	2.13	0.10	0.01	0.01

TABLE VIII.2

ANALISIS QUIMICOS EN ALICQUIMIENTOS POR LITRO

No. Aprob.	eqn Ca	eqn Mg	eqn Na	eqn K	eqn HCO3	eqn CO3	eqn Cl	eqn SO4	eqn NO3	eqn F	eqn Fe
5.00	4.44	3.21	0.93	0.27	0.12	0.00	0.57	0.16	0.21	0.02	0.01
20.00	1.12	1.12	0.37	0.20	2.54	0.00	0.10	0.15	0.32	0.02	0.01
24.00	3.70	2.23	0.55	0.20	3.60	0.00	1.50	0.21	0.21	0.01	0.01
27.00	0.12	4.78	1.77	0.34	10.00	0.00	1.37	3.13	0.39	0.01	0.01
32.00	14.92	4.12	2.23	0.46	12.00	0.00	1.04	9.30	0.16	0.05	0.00
34.00	14.76	5.95	2.33	0.35	11.44	0.00	1.46	0.75	0.35	0.07	0.00
41.00	3.53	1.50	0.49	0.15	3.94	0.00	0.53	0.30	0.57	0.01	0.00
43.00	0.11	4.12	3.01	0.23	0.12	0.00	1.47	1.17	0.07	0.01	0.01
46.00	20.54	5.56	3.01	0.30	16.26	0.00	1.06	10.42	0.14	0.02	0.01
51.00	19.24	5.11	2.60	0.35	12.34	0.00	1.51	3.20	0.35	0.07	0.00
53.00	10.23	2.21	0.97	0.19	7.04	0.00	1.13	7.00	0.32	0.01	0.01
62.00	1.15	1.70	0.30	0.00	2.42	0.00	0.27	0.52	0.50	0.01	0.00
65.00	0.49	1.02	0.42	0.07	1.90	0.00	0.03	0.06	0.25	0.04	0.01
65.00	0.57	1.01	0.42	0.07	1.04	0.00	0.06	0.04	0.14	0.04	0.00
329.00	2.52	2.07	1.65	0.23	4.20	0.00	0.32	0.25	0.14	0.02	0.01
349.00	0.53	1.02	0.16	0.06	1.32	0.00	0.45	0.21	0.25	0.01	0.01
482.00	1.37	0.51	0.27	0.09	2.00	0.00	0.00	0.04	0.10	0.01	0.01
524.00	0.97	1.34	0.20	0.13	1.50	0.00	0.10	0.00	0.35	0.01	0.01
605.00	10.17	5.00	1.50	0.47	13.02	0.00	0.59	5.21	0.16	0.01	0.01
643.00	1.13	0.37	0.16	0.07	1.04	0.00	0.45	0.15	0.21	0.01	0.01
670.00	3.06	2.39	0.53	0.20	4.52	0.00	0.63	1.00	0.07	0.01	0.01
670.00	1.02	1.51	0.31	0.10	2.36	0.00	0.13	0.30	0.20	0.01	0.01
650.00	1.23	1.39	0.33	0.13	6.20	0.00	0.10	0.21	0.21	0.02	0.01
680.00	0.05	0.79	0.31	0.07	3.04	0.00	0.10	0.10	0.21	0.02	0.01
904.00	0.91	1.07	0.52	0.13	3.54	0.00	0.06	0.06	0.10	0.01	0.00
905.00	2.37	2.39	0.50	0.19	0.00	0.00	0.17	0.31	0.21	0.02	0.01
904.00	2.03	2.62	0.44	0.34	6.20	0.00	0.16	0.21	0.25	0.02	0.01
906.00	2.91	3.11	1.07	0.21	7.04	0.00	0.20	0.17	0.21	0.02	0.01
927.00	1.40	2.24	0.60	0.15	3.60	0.00	0.25	0.25	0.30	0.01	0.01
933.00	2.17	1.53	0.83	0.26	4.24	0.00	0.22	0.13	0.50	0.03	0.01
946.00	1.00	1.74	1.51	0.22	3.00	0.00	0.36	0.17	0.35	0.02	0.00
957.00	0.47	0.49	0.23	0.05	6.70	0.00	0.00	0.06	0.21	0.01	0.01
955.00	0.03	0.71	0.25	0.07	3.60	0.00	0.13	0.10	0.20	0.01	0.01
1024.00	1.76	1.41	0.40	0.20	3.04	0.00	0.09	0.10	0.21	0.02	0.00
1029.00	17.44	4.07	2.29	0.20	14.00	0.00	0.11	5.30	0.10	0.06	0.01
1030.00	0.24	3.65	1.12	0.26	6.02	0.00	1.05	3.33	0.29	0.01	0.00
1100.00	2.94	1.35	1.20	0.23	5.32	0.00	0.62	1.10	0.21	0.02	0.01
1115.00	2.00	1.93	1.20	0.33	5.76	0.00	0.15	0.21	0.14	0.02	0.02
1134.00	1.40	0.51	0.21	0.00	2.02	0.00	0.03	0.04	0.20	0.01	0.01
1130.00	1.19	1.72	0.21	0.14	2.00	0.00	0.12	0.04	0.23	0.03	0.01
1100.00	1.25	0.50	0.20	0.00	2.00	0.00	0.04	0.13	0.10	0.01	0.01
1100.00	1.25	0.50	0.20	0.00	7.04	0.00	0.04	0.13	0.10	0.01	0.01
1204.00	0.40	0.00	2.15	0.19	9.52	0.00	1.15	1.00	0.20	0.06	0.00
1210.00	1.77	1.32	0.40	0.20	2.50	0.00	0.02	0.00	0.32	0.02	0.01
1240.00	4.10	2.24	1.37	0.30	6.20	0.00	0.01	1.67	0.10	0.01	0.01
1240.00	7.07	5.22	0.93	0.31	13.70	0.00	0.52	2.29	0.21	0.01	0.00
1200.00	3.69	2.50	1.00	0.42	6.04	0.00	0.52	3.13	0.10	0.01	0.01



TABLE VIII.2  
(CONTINUACION)

No. Aprox.	ANALISIS QUIMICOS EN MILEQUIVALENTES POR LITRO											
	eqn Ca	eqn Mg	eqn Na	eqn K	eqn HCO3	eqn CO3	eqn Cl	eqn SO4	eqn NO3	eqn F	eqn Fe	
1228.00	11.24	7.00	4.83	0.37	16.46	0.00	0.76	3.13	0.14	0.02	0.00	
1319.00	0.31	0.54	0.16	0.07	1.24	0.00	0.06	0.10	0.14	0.01	0.01	
1337.00	0.51	0.00	0.40	0.12	1.00	0.00	0.06	0.17	0.10	0.01	0.00	
1364.00	0.43	0.85	0.69	0.00	1.20	0.00	0.07	0.00	0.20	0.01	0.01	
1365.00	1.05	1.37	0.35	0.10	2.16	0.00	0.14	0.06	0.43	0.01	0.01	
1637.00	0.06	1.16	0.47	0.03	2.06	0.00	0.03	0.21	0.25	0.02	0.01	
1648.00	0.02	1.54	0.60	0.10	2.72	0.00	0.11	0.00	0.14	0.01	0.04	
1507.00	0.09	5.14	0.23	0.17	15.14	0.00	0.11	1.03	0.14	0.01	0.01	
1703.00	3.50	3.32	1.03	0.21	5.60	0.00	0.41	0.44	0.02	0.01	0.01	
1915.00	1.26	2.25	0.74	0.11	4.00	0.00	0.03	0.06	0.21	0.02	0.01	
Ey 1	1.13	2.15	0.51	0.12	4.00	0.00	0.06	0.00	0.14	0.01	0.01	
Ey 25	1.26	1.54	0.61	0.10	3.54	0.00	0.12	0.06	0.14	0.02	0.01	
Ey 31	1.00	1.03	0.26	0.10	1.06	0.00	0.15	0.25	0.20	0.01	0.01	
Ey 37	1.11	2.09	1770.00	0.11	3.60	0.00	0.21	0.21	0.20	0.01	0.01	
Ey 37	1.07	0.72	0.63	0.09	4.20	0.00	0.11	0.00	0.30	0.01	0.00	
Ey 36	3.08	3.11	0.76	0.22	4.42	0.00	0.31	1.67	0.04	0.01	0.01	
Ey 42	2.26	2.29	0.56	5.54	1.64	0.00	0.73	0.21	0.14	0.01	0.01	
Ey 105	2.10	1.57	0.55	0.12	2.04	0.00	0.21	1.04	0.00	0.01	0.01	
Ey 116	1.42	1.56	0.32	0.15	1.66	0.00	0.22	0.15	0.02	0.01	0.01	
Ey 117	1.03	0.57	0.27	0.14	1.00	0.00	0.37	0.10	0.30	0.01	0.01	
Ey 123	1.13	1.01	0.44	0.14	2.90	0.00	0.11	0.00	0.14	0.03	0.01	
Ey 124	0.63	1.03	0.30	0.11	1.04	0.00	0.05	0.02	0.21	0.03	0.01	
Ey 120	0.76	1.10	0.20	0.07	1.52	0.00	0.11	0.00	0.13	0.02	0.01	
Ey 131	1.53	2.62	0.64	0.23	5.04	0.00	0.05	0.06	0.32	0.02	0.01	
Ey 132	2.24	3.16	0.79	0.10	3.12	0.00	1.07	1.73	1.56	0.01	0.00	
Ey 123-A	1.39	2.31	0.80	0.14	3.52	0.00	0.27	0.00	0.35	0.02	0.01	
Ey 203	3.03	1.05	2.71	0.41	13.92	0.00	0.61	0.17	0.20	0.03	0.01	
Ey 204	3.06	1.92	0.42	0.20	6.36	0.03	2341.00	0.25	0.21	0.02	0.01	
Ey 213	1.16	1.02	2.56	0.29	6.24	0.00	0.42	0.17	0.16	0.02	0.01	
Ey 214	1.09	1.42	0.55	0.03	2.92	0.00	0.10	0.06	0.10	0.03	0.01	
Ey 220	0.55	0.92	0.76	0.10	1.04	0.00	0.07	0.10	0.20	0.01	0.01	
Ey 221	2.01	0.06	0.21	0.16	6.00	0.00	0.00	0.04	0.10	0.02	0.01	
Ey 222	20.52	6.72	2.07	0.32	15.16	0.00	0.42	10.42	0.14	0.01	0.00	
Chalula	1.71	2.45	0.86	0.12	4.52	0.00	0.12	0.15	0.35	0.02	0.01	
Comp. Cruz	34.20	11.00	13.75	1.02	10.16	0.00	5.28	33.05	0.07	0.00	0.01	
Sla. Just.	3.46	2.45	1.50	0.27	0.10	0.00	1.72	0.42	0.07	0.02	0.01	

## VIII.2 INTERPRETACION HIDROGEOQUIMICA

### SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

Las concentraciones de sólidos totales disueltos varían de 74.3 a 3331 ppm. En la configuración de Sólidos Totales Disueltos (ver Anexo Cartográfico) se observa que las concentraciones más bajas se presentan en las zonas cercanas al área de recarga, en las laderas de los volcanes La Malinche, Popocatepetl e Iztaccihuatl, y se van incrementando conforme nos acercamos a la parte central del Valle. Lo anterior indica que el agua inicia su recorrido en las laderas de los volcanes y fluye hacia el centro del Valle para continuar hacia el Sur. El agua que se localiza en el centro del Valle ha recorrido una distancia más larga, por lo que también ha disuelto un número mayor de sales.

El área de la Ciudad de Puebla es la que presenta las concentraciones más elevadas, el pozo del poblado de Concepción Cruz al Sureste de Puebla presentó el valor más alto de STD (3331 ppm).

Las concentraciones anómalas en esta área se deben principalmente a la presencia de aguas volcánicas y aguas viejas procedentes de zonas más profundas y en menor grado por aguas residuales (industriales y domésticas).

### SULFATO (SO4=)

Su presencia puede deberse al lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambiente marino, a la oxidación de sulfuros presentes en rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, a la disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, a la concentración en el suelo de agua de lluvia y a las actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas pueden aportar cantidades importantes (Custodio y Llamas 1976).

Este elemento también puede presentarse por la disolución de minerales sulfatados presentes en rocas sedimentarias. Las arcillas orgánicas pueden proporcionar grandes cantidades de sulfato mediante oxidación de la marcasita y la pirita (Pulido Carrillo 1978).

Las aguas subterráneas normalmente presentan concentraciones inferiores a 300 ppm (David Keith Todd 1976).

Las concentraciones en el área de estudio varían de 1 ppm a 500 ppm, aunque el pozo de Concepción la Cruz presenta 1625 ppm, valor que probablemente se debe a un error en el muestreo o en el análisis químico.

En el mapa donde se configuraron los isovalores de sulfatos se observa que las concentraciones bajas se presentan en las zonas cercanas a las áreas de recarga y se van incrementando hacia el centro del Valle.

En el área de la Ciudad de Puebla se presentan concentraciones anormales que sobrepasan a las 300 ppm, lo cual ocurre únicamente en esta zona y se debe a las razones antes citadas. Estas concentraciones pueden presentar cierta nocividad para las plantas, además, cuando las concentraciones son mayores de unos centenares de ppm, perjudican al hormigón y al cemento. Algunas industrias no aceptan usar aguas con más de 250 ppm de Sulfatos. Cuando contiene alrededor de 500 ppm de sulfatos el agua tiene un sabor picante, si contiene unas 1000 ppm puede ser catártica.

En general, las concentraciones de Sulfatos caen dentro de un rango que clasifica al agua como dulce, ya que no sobrepasan las 150 ppm.

#### BICARBONATO (CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup>)

Los iones bicarbonato y carbonato proceden de la disolución del CO<sub>2</sub> existente en la atmósfera o en el suelo, así como la disolución de los carbonatos, fundamentalmente calizas y dolomías, ayudada por el CO<sub>2</sub> y/o ácidos naturales (húmicos, oxidación de sulfuros, etc.) o por la hidrólisis de silicatos ayudada por CO<sub>2</sub> (Custodio y Llamas 1976).

La disociación de los iones bicarbonato en carbonato comienza a tener realmente efecto a partir de un valor de pH mayor a 8.3. En el área de estudio ningún pH medido en el campo o en el laboratorio alcanza estos valores, por lo que no tenemos cantidades importantes de ión carbonato y para fines prácticos se consideran como cero.

Las concentraciones de bicarbonatos en aguas naturales comunmente es menor a 500 ppm, aunque puede exceder las 1000 ppm en aguas con alto contenido de CO<sub>2</sub>. (David Keith Todd 1976).

En el mapa donde se configuran los isovalores de este ion podemos observar, como en los otros iones, que las concentraciones mas bajas se dan en el área de recarga y se van incrementando hacia el centro del Valle.

Nuevamente se tiene una concentración anormal en el área de la Ciudad de Puebla que sobrepasa las 500 ppm y al igual que con los otros iones se debe a las causas antes descritas.

## SODIO (Na<sup>+</sup>)

Este catión procede del ataque de feldespatos, feldespatoides y otros silicatos; lavado de sedimentos de origen marino y cambio de bases con arcillas del mismo origen; mezcla con agua de mar; localmente de la disolución de sal gema o sulfato sódico natural (Sales evaporíticas); raras veces de emanaciones y fenómenos relacionados con procesos magmáticos; concentración del agua de lluvia; contaminación urbana e industrial.

El sodio tiene una solubilidad muy elevada y es muy difícil de precipitar. es afectado fácilmente por el cambio de bases. Suele ir asociado al ion Cloro (Cl<sup>-</sup>) aunque no siempre sucede así.

Aparece en las aguas dulces con concentraciones entre 1 y 150 ppm, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta de varios miles de ppm.

En el mapa con las curvas de isovalores de Sodio podemos apreciar un comportamiento similar a los otros iones. Las menores concentraciones se presentan en la parte baja de las laderas de los colcanes Popocatepetl, Iztaccihuatl y la Malinche. En el centro del área tenemos concentraciones locales de 30 ppm por San Miguel Xoxtla y Nopalucan.

Todas las muestras se mantienen dentro del rango de aguas dulces (1 a 150 ppm), excepto el pozo de Concepción la Cruz, el cual, como se mencionó antes, puede deberse a un error en el muestreo o en el análisis químico.

Las aguas con concentraciones elevadas de Sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo; son especialmente nocivas si las concentraciones de Calcio y Magnesio son bajas. Aguas con contenidos elevados de CO<sub>3</sub>HN originan problemas de espumas en calderas.

## CALCIO (Ca<sup>++</sup>)

El catión Calcio procede de la disolución de calizas, dolomías, yeso y anhidrita; ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos, disolución de cemento calcáreo de muchas rocas, concentración del agua de lluvia. Es muy fácil de precipitar como CO<sub>3</sub>Ca. Su química va muy asociada a la de los iones CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>=</sup> en muchas aguas naturales pudiéndose precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH o la presión parcial de CO<sub>2</sub>. Puede ser afectado por cambio de bases o cambio iónico.

Las concentraciones en aguas dulces varían de 10 a 250 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a 600 ppm en aguas selenitosas (Custodio y Llamas, 1976).

Las concentraciones en el área de estudio varían de 6.81 ppm (pozo 1319 al Noroeste del área) hasta 410 ppm (pozo Exy 222) en la Ciudad de Puebla.

En general las concentraciones en toda el área de estudio no sobrepasan los 250 ppm, excepto en la Ciudad de Puebla donde las altas concentraciones se deben principalmente a las causas ya explicadas.

Cantidades de hasta 1000 ppm son inocuas para la salud del hombre (José Luis Pulido, 1978).

#### MAGNESIO (Mg<sup>++</sup>)

El Magnesio procede de la disolución de dolomías y calizas dolomíticas, del ataque de silicatos magnésicos y ferromagnesianos, localmente del lavado de rocas evaporíticas magnésicas, mezcla con agua de mar y contaminación industrial y minera.

Es más soluble que el ión Calcio y algo más difícil de precipitar.

Las concentraciones en aguas dulces generalmente son menores a 50 ppm, el agua marina contiene más de 1000 ppm y las salmueras pueden contener hasta 57000 ppm (David Keith Todd, 1976).

En el área de estudio, el Magnesio procede principalmente de algunos minerales de las andesitas y basaltos como biotita, olivino y otros minerales ferromagnesianos.

Las zonas con concentraciones bajas se presentan cerca de las áreas de recarga, en la porción central. Las concentraciones no sobrepasan las 50 ppm en toda el área excepto en la Ciudad de Puebla, donde tenemos valores de hasta 84 ppm, esto sin considerar el pozo de Concepción la Cruz que al igual que en los otros iones nos da valores muy altos (141.62 ppm).

#### CLORURO (Cl<sup>-</sup>)

El cloruro proviene de terrenos de origen marino; las aguas congénitas y fósiles pueden aportar cantidades importantes; agua de lluvia y su concentración en el terreno, mezcla con aguas marinas en regiones costeras; aporte de rocas, aunque en general el aporte es pequeño por ser un elemento escaso en la corteza terrestre. muy localmente tiene interés el aporte de ión cloruro por rocas evaporíticas y por el ataque de ciertos minerales asociados a rocas ígneas y metamórficas (Sodalita, apatita, etc.); más raramente puede proceder de emanaciones volcánicas; los vertidos urbanos e industriales pueden aportar cantidades importantes.

Es el anión más importante del agua de mar, pero puede ser el menos importante de los fundamentales en aguas continentales.

Es muy estable en disolución y difícilmente precipitable. No se oxida ni reduce en aguas naturales. En general va asociado al ión Sodio.

Sus concentraciones en aguas dulces (en regiones húmedas) varían de 10 a 30 ppm.

Las concentraciones en el área de estudio son menores a las 50 ppm y los cloruros provienen de algunos constituyentes de las rocas ígneas, del agua de lluvia y contaminación en el terreno y tal vez de un horizonte evaporítico (poco probable).

En el área de la Ciudad de Puebla, las concentraciones sobrepasan los 50 ppm y los iones provienen posiblemente de agua congénitas y/o fósiles.

#### CONDUCTIVIDAD

La conductividad eléctrica es la capacidad del agua para conducir electricidad; se mide como la conductividad que existe entre dos electrodos paralelos de 1 centímetro cuadrado de superficie cada uno y separados 1 centímetro. Situados en el seno del agua a medir de forma que el medio se pueda considerar infinito. Las unidades de la conductividad son 1 microsiemens/centímetro (Ms/cm) o micromhos/cm (Mmhos/cm).

La conductividad crece con la temperatura y es preciso tomar una temperatura de referencia, que suele ser de 18 grados Centígrados o 25 grados Centígrados. Crece 2%/grado Centígrado al aumentar la temperatura. También crece con el contenido en iones disueltos, de tal manera que se puede establecer las siguientes relaciones:

$$C(\text{Ms/cm}) = 1.40 R_s (\text{ppm}) \text{ a } 18 \text{ grados Centígrados}$$

$$C(\text{Ms/cm}) = 1.35 S_d (\text{ppm}) \text{ a } 18 \text{ grados Centígrados}$$

$$C(\text{Ms/cm}) = (85 \text{ a } 90) M(\text{meq/l}) \text{ a } 18 \text{ grados Centígrados}$$

Siendo más precisa la última relación.

donde:

$R_s$  = Residuo Seco a 110 grado Centígrados

$S_d$  = Sólidos Totales Disueltos

$M$  = Contenido total en aniones o cationes (se toma la semisuma)

La Conductividad varía entre 100 y 2000 (Ms/cm) a 18 grados centígrados para aguas dulces.

En el área de estudio la conductividad se va incrementando hacia el centro del valle. Las conductividades más altas se presentan en la Ciudad de Puebla. pero solo tres pozos tienen conductividades mayores a 2,000 (pozos 51, 1029 y EXY 222).

#### DIAGRAMAS TRIANGULARES PALMER-PIPER

Este tipo de diagramas consta de dos triángulos combinados con un rombo. En ambos triángulos se representan cationes y aniones porcentuales. En la superficie rómbica queda representado el conjunto de todos los iones.

La ventaja que presenta este tipo de diagrama es que se pueden representar muchos análisis sin originar confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas.

En estos diagramas no se tiene una representación de las concentraciones absolutas dado que se utilizan valores reducidos a porcentaje.

En los diagramas triangulares de la figura VIII.1 se encuentran representadas 77 muestras dentro de la zona sombreada, donde puede observarse que las concentraciones de bicarbonatos se encuentran presentes en porcentajes que varían desde 60 % a 98 % aproximadamente (aniones, triángulo derecho) por lo que en general se les puede considerar como Bicarbonatadas. Al observar los porcentajes de los cationes, vemos que estos tienden a concentrarse hacia los vértices Cálculo y Magnésico, hacia el Calcio varía de 30 a 75 % y al Magnesio varía de 15 % a 60 %, clasificando finalmente a las muestras de agua como Bicarbonatadas Cálculo-Magnésicas, lo cual puede verse mas claramente al observar la región sombreada en el rombo central superior.

#### DIAGRAMA DE STIFF (MODIFICADO)

Se disponen de cuatro rectas paralelas igualmente espaciadas, cortadas centralmente por una recta vertical; a la izquierda se disponen los cationes y en la derecha los aniones.

Sobre cada recta se toma un segmento proporcional al porcentaje de miliequivalentes por litro, obteniéndose por unión de todos los segmentos un polígono. Los cationes y aniones se disponen en el orden en que aparecen en las Figuras VIII.2 a VIII.5 donde se han representado las muestras de agua.

Se puede observar en estos diagramas que en general no hay mucha variación en cuanto a la composición y que el agua se puede considerar de buena calidad en casi todo el Valle.

## pH

El pH es el cologaritmo de la concentración de hidrogeniones del agua. Valores superiores a 7 ponen de manifiesto la alcalinidad y más bajos la acides.

La variación normal del pH en aguas subterráneas es de 6 a 8. En el área de estudio los valores del pH varían de 6.39 (Pozo 1945) a 8, solo 5 pozos sobrepasan el pH de 8: 483, 1024, 1322, 1364 y EXY 123, con valores de 8.14, 8.12, 8.15, 8.31 y 8.42 respectivamente.

Debido a que casi todas las muestras estan por debajo del pH de 8.3 la presencia de CO<sub>3</sub> se puede considerar practicamente cero (ver Bicarbonatos).

## DUREZA TOTAL

La dureza mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustaciones.

Se acostumbra, generalmente, considerar la dureza del agua como la suma de los iones de Calcio y Magnesio, la cual se expresa como:

$$D = rMg^{++} + rCa^{++} \quad \text{donde } r = \text{meq/l}$$

También suele expresarse con las mismas unidades que la alcalinidad, en general ppm de CO<sub>3</sub> o grados Franceses.

En general las muestras tomadas en el área de estudio no sobrepasan las 900 ppm, los valores son muy variables y van desde 20.2 ppm en el pozo EXY 222. El pozo de Concepción la Cruz tiene valores anormales de 2290, posiblemente se deba a un error en el análisis o en el muestreo.

## VIII.3 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA

Todo estudio de recursos hidráulicos debe tratar las características del agua con vistas a su utilización, es así como aparece el concepto de calidad.

La calidad del agua queda definida por su composición y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de su utilización, clasificando así, de acuerdo con límites establecidos su destino para bebida, uso agrícola, industrial, etc. (Custodio y Llamas, 1976).

El fin del estudio es considerar el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Puebla por lo cual nos ocuparemos principalmente de la calidad del agua potable.



De acuerdo con las concentraciones permitidas por la Organización Mundial de la Salud (ver Tabla VIII.3) el agua del área cumple con la concentración máxima permitida de Sólidos Totales Disueltos, excepto en el área de la Ciudad de Puebla donde las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos sobrepasan las 1500 ppm (Pozos 32, 1029, 605, 34, Exy 222, 21, 51 y Concepción la Cruz).

Con relación al ion Calcio, el agua no sobrepasa el límite máximo permitido en toda el área, excepto en la Ciudad de Puebla, donde los mismos pozos sobrepasan las 2000 ppm de Calcio, lo mismo ocurre para los Sulfatos.

El ion Magnesio no sobrepasa los límites máximos (excepto el pozo Concepción Cruz).

De lo anterior se deduce que el agua es de buena calidad excepto en el área de la Ciudad de Puebla.

A continuación evaluaremos la calidad del agua para uso potable con las normas establecidas por la SSA en el año de 1953 que se presentan en la tabla VIII.4

Como se puede observar en los mapas donde se configuraron los isovalores de iones y Sólidos Totales Disueltos (Ver Anexo Cartográfico), el agua de toda el área cumple con las normas de calidad excepto en la zona de la Ciudad de Puebla donde las concentraciones de todos los iones se elevan en gran medida, rebasando los límites máximos permitidos.

Para Usos Agrícola se utilizó la Clasificación SAR (Sodium Adsorption Radium), la cual se basa en la concentración total de sales solubles expresada mediante la Conductividad Eléctrica en micromhos por centímetro a 25 grados Centígrados y en la concentración relativa del Sodio con respecto al Calcio y Magnesio.

El índice SAR se representa por la expresión:

$$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{rCa + rMg}{2}}} \quad ; \quad r = meq/l$$

Para que este índice sea representativo, no deben producirse precipitaciones de las sales cálcicas o magnésicas como consecuencia de la evapotranspiración. A las aguas de un SAR constante se les atribuye un mayor peligro de alcalinización del suelo cuanto mayor es la concentración total (Custodio 1986).

TABLA VIII.3

O.M.S.

SUSTANCIA	CONCENTRACION MAXIMA ACEPTABLE	CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA
STD	500	1500
Color (ppm de la escala de Platino Cobalto)	5	50
Turbidez en 5102	5	25
Gusto	No detectable	-
Olor	No detectable	-
Fe	0.3	1
Mn	0.1	0.5
Cu	1	1.5
Zn	5	15
Ca	75	200
Mg	50	150
SO <sub>4</sub>	200	400
CL	200	600
pH	7.85	6.5-9.2
Sulfato Magnesico Sodico	500	1000
Sustancias Fenolicas (Como feno)	0.001	0.002
Contaminantes Organicos (Carbono Extractado con Cloroformo)	0.2	0.5
Tensoactivos (Detergentes) ABS (Alkilbenul-Sulfonato)	0.5	1

Valores en ppm si no se indica lo contrario

TABLA VIII.4

NORMAS DE CALIDAD DE AGUA POTABLE

CARACTERISTICAS FISICAS	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	OBSERVACIONES
Turbiedad	10 (Escala a Silice)	
Color	20 (Escala Platino-Cobalto)	De no cumplirse con los resultados anteriores se admitiran aquellos que sean tolerables para los usuarios.
Sabor	Insipida	
Olor	Inodora	

CARACTERISTICAS QUIMICAS	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE EN ppm EXCEPTO *
Nitrogeno Amonical (N)	0.5
Nitrogeno Proteico (N)	0.1
Nitrogeno de Nitratos (N)	5.0
Potencial de Hidrogeno (pH)	8.0
Oxigeno Consumido (O)	3.0
Solidos Totales Disueltos (STD)	1000
Alcalinidad total (CaCO3)	400
Dureza Total (CaCO3)	300
Cloruro (CL)	250
Sulfatos (SO4)	250
Magnesio (Mg)	125
Zinc (Zn)	15.0
Cobre (Cu)	3.0
Fluoruros	1.5
Hierro (Fe) y Magnesio (Mg)	0.3
Arsenico (As)	0.05
Selenio (Se)	0.05
Cromo (Cr)	0.05
Compuestos Fenolicos (Fenol)	0.001

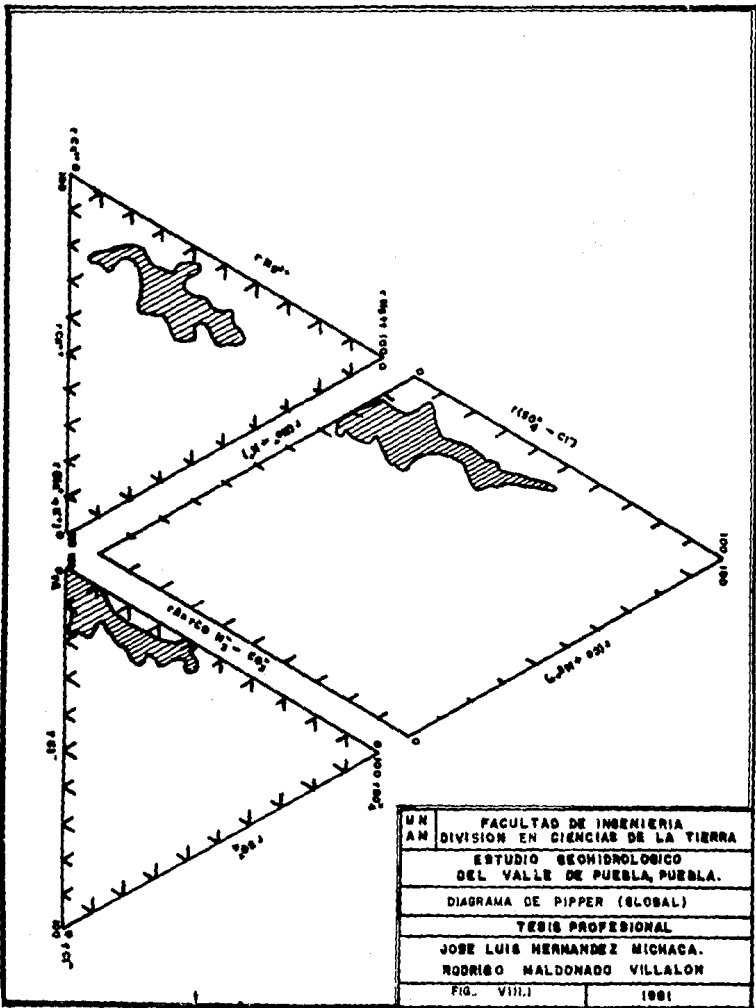
CARACTERISTICAS BIOLÓGICAS	NUMERO MAXIMO PERMISIBLE
Organismos de los grupos coli y Coliformes	20
Colonias Bacterianas por centimetro cubico de Muestra	200

En las figuras VIII.6 a VIII.10 se observa que los análisis obtenidos por este método se encuentran distribuidos en tres regiones principalmente, la primera corresponde al agua de baja salinidad. Conductividad entre 100 y 250 micromhos/cm a 25 grados Centígrados que corresponde aproximadamente a 64-164 mg/l de sólidos disueltos, puede usarse para la mayor parte de los cultivos en casi todos los suelos, con muy poco peligro de que desarrolle salinidad. Es preciso algún lavado que se logra normalmente con el riego, excepto en suelos con muy baja permeabilidad.

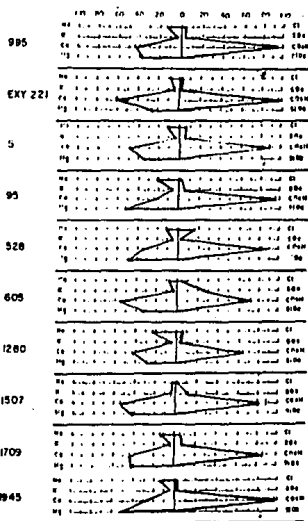
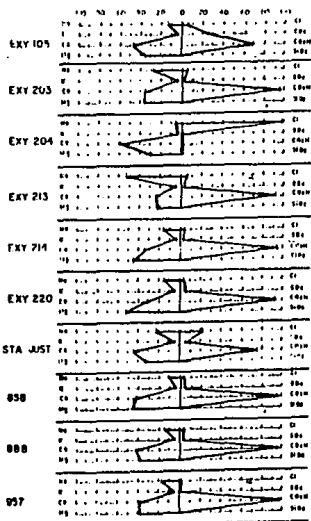
La segunda región corresponde a aquella agua que presenta salinidad media. Conductividad entre 250 y 750 micromhos/cm a 25 grados Centígrados, correspondiendo aproximadamente a 160-480 mg/l de Sólidos Disueltos, puede usarse con un grado moderado de lavado. Sin excesivo control de la salinidad se pueden cultivar, en la mayoría de los casos, las plantas moderadamente tolerables a las sales.

La tercera región corresponde a agua altamente salina. Conductividad entre 750 y 2250 micromhos/cm a 25 grados Centígrados, corresponde aproximadamente a 480-1440 mg/l de Sólidos Disueltos, es agua con concentraciones medias en Sodio. No puede usarse en suelos de drenaje deficiente, se deben seleccionar las plantas muy tolerantes a las sales y posibilidad de control de la salinidad del suelo, aun con drenaje adecuado.

Las tres regiones descritas anteriormente presentan agua baja en sodio, pueden usarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de Sodio intercambiable. Los cultivos sensibles pueden acumular cantidades perjudiciales de Sodio.

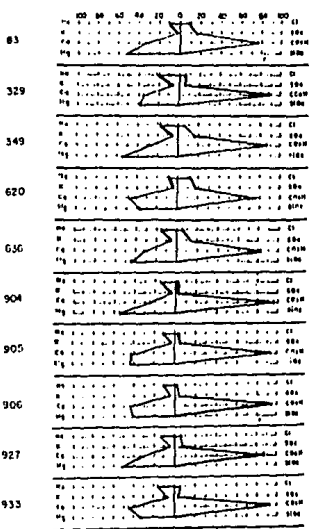
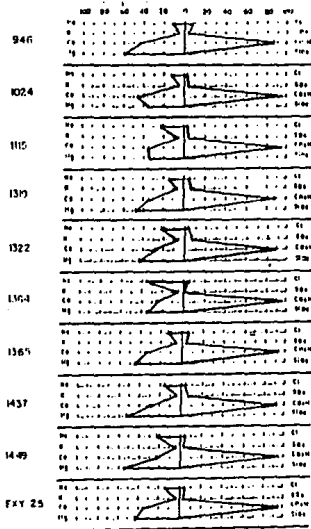


UN	FACULTAD DE INGENIERIA
AN	DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
	ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.
	DIAGRAMA DE PIPPER (GLOBAL)
	TESIS PROFESIONAL
	JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA. RODRIGO MALDONADO VILLALON
	FIG. VIII.)
	1981



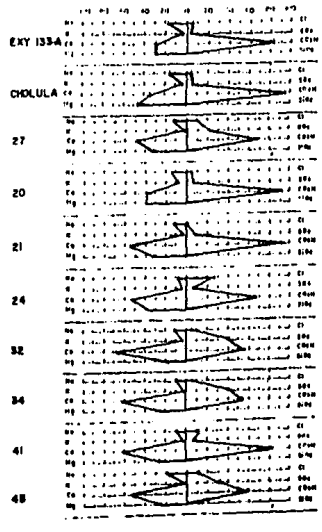
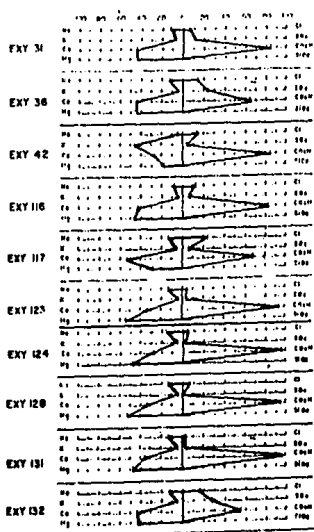
Los datos se representan en miliequivalentes por litro (porcentaje)

UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
	ESTUDIO GEONIDROLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.
	DIAGRAMAS DE STIFF (MODIFICADO)
	TESIS PROFESIONAL
	JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA. RODRIGO MALDONADO VILLALON.
FIG. VIII.2	1981



Los datos se representan en miliequivalentes por litro (porcentaje)

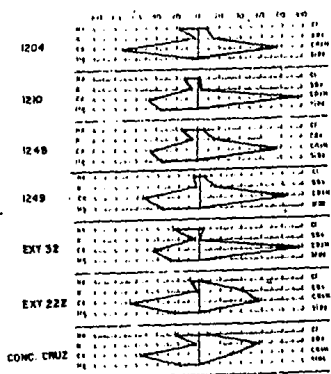
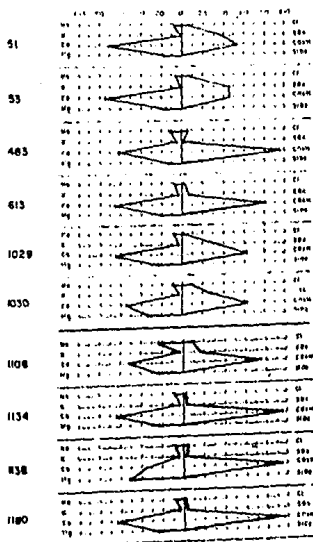
UN	FACULTAD DE INGENIERIA
AM	DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.	
DIAGRAMAS DE STIFF (MODIFICADO)	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA.	
RODRIGO MALDONADO VILLALON.	
FIG. VIII.5	1991



Los datos se representan en miliequivalentes por litro (porcentaje)

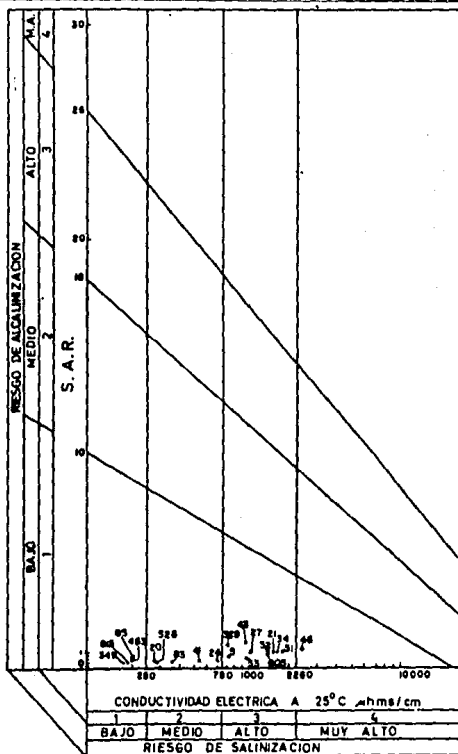
UN	FACULTAD DE INGENIERIA
AM	DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.	
DIAGRAMAS DE STIFF (MODIFICADO)	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA.	
RODRIGO MALDONADO VILLALON.	
FIG. VIII.6	1991



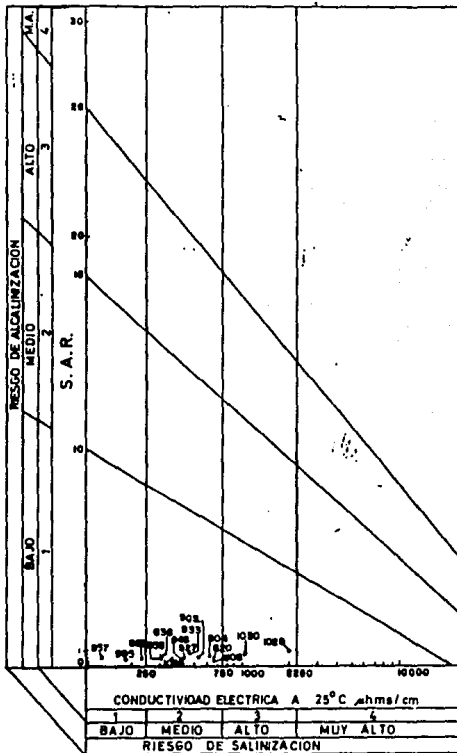


Los datos se representan en miliquilómetros por litro (porcentaje)

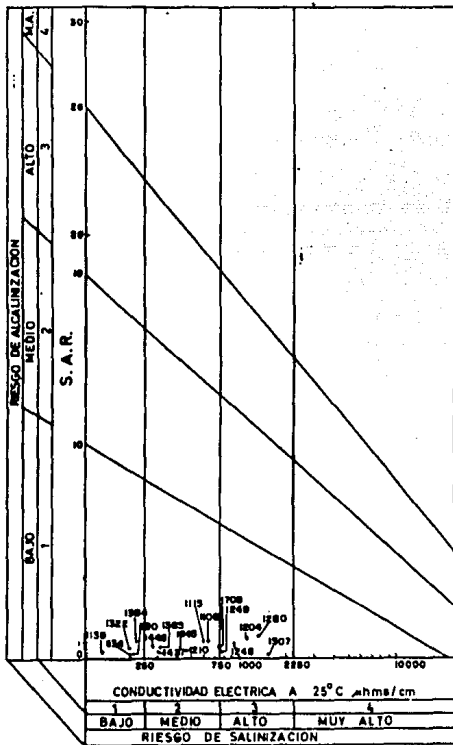
UN	FACULTAD DE INGENIERIA
A.M.	DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.	
DIAGRAMAS DE STIFF (MODIFICADO)	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA. RODRIGO MALDONADO VILLALON.	
FIG. VIII.3	1991



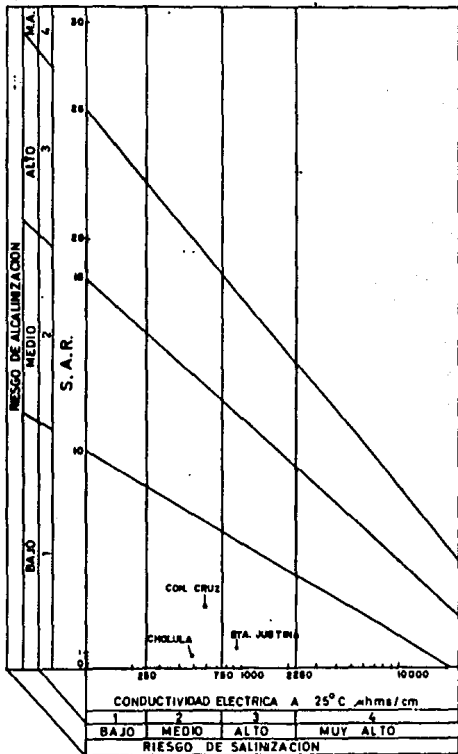
UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESTUDIO GEONIDROLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.	
DIAGRAMA BAR	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA. RODRIGO MALDONADO VELLALON.	
FIG. VIII.6	1991



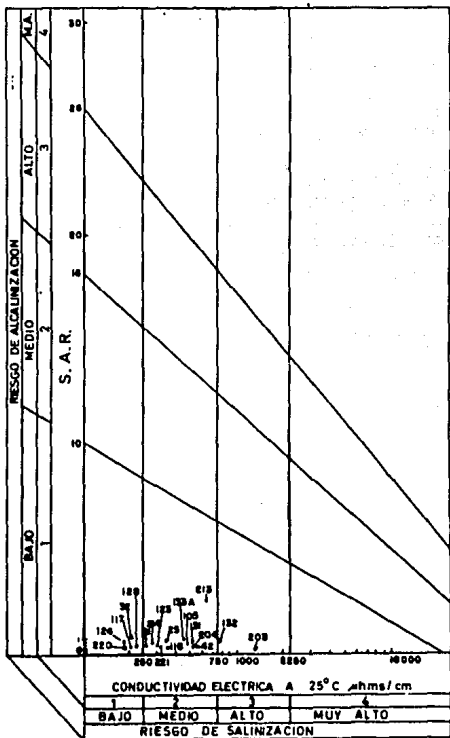
UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.	
DIAGRAMA SAR	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA. RODRIGO MALDONADO VILLALON.	
FIG. VIII.7	1991



UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
	ESTUDIO GEOHIDROLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.
	DIAGRAMA SAR
	TESIS PROFESIONAL
	JOSE LUIS HERNANDEZ MICHAGA. RODRIGO MALDONADO VILLALON.
	FIG. VIII. B
	1991



UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.	
DIAGRAMA SAR	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERNANDEZ MICHACA. RODRIGO MALDONADO VILLALON.	
FIG. VII.9	1991



NOTA: Los analisis aqui representados corresponden a pozos con clave EXY.

UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA
	ESTUDIO GEODROLOGICO DEL VALLE DE PUEBLA, PUEBLA.
DIAGRAMA SAR	
TESIS PROFESIONAL	
JOSE LUIS HERRANDEZ NICHACA. RODRIGO MALDONADO VILLALON.	
FIG. VIII.10	
1991	

## CAPITULO IX

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### IX.1 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en los diferentes análisis e interpretaciones realizados en la zona, se llegó a las siguientes conclusiones:

1.- La zona de estudio está constituida por diez unidades litoestratigráficas, las cuales se enlistan a continuación de la más antigua a la más reciente:

- Kmt- Rocas sedimentarias calcareas, calcáreo-arcillosas y lutitas cretácicas de la Formación Maltrata
- Tman- Derrames andesíticos del Terciario Medio
- Tmsm- Rocas andesíticas de edad Terciario Medio-Superior del volcán la Malinche.
- Tslac- Sedimentos lacustres del Terciario Superior.
- Tsqab- Derrames andesítico-basálticos de edad Terciario Superior-Cuaternario.
- Qvab- Derrames andesítico-basálticos del Cuaternario.
- Qpc- Materiales piroclásticos continentales cuaternarios (la mayor parte de ellos han sido redepositados).
- Qt- Travertino de Edad Cuaternaria.
- Qvs- Rocas volcanosedimentarias (gravas, arenas etc.).
- Qal- Aluvial Cuaternario.

NOTA: Ver distribución de estas unidades en el mapa geológico que se anexa.

2.- En el área de estudio se distinguen principalmente dos acuíferos. El primero de ellos se encuentra en las unidades Qpc, Qal, Qvs y Tslac, en las tres primeras se comporta como un acuífero libre, mientras que en la última se comporta como acuífero libre y semiconfinado. El segundo es un acuífero de tipo confinado que se encuentra infrayaciendo al anterior y está contenido en las rocas sedimentarias marinas de la Formación Maltrata, los cuales en la parte superior presentan intercalaciones de calizas arcillosas y lutitas que le dan ese carácter de confinamiento.

3.- El agua de recarga del acuífero somero proviene principalmente de la infiltración del agua de deshielos y pluvial en las laderas de los volcanes Malinche e Iztaccíhuatl. Al volumen de agua anterior se debe agregar aquel que se infiltra a través de los sedimentos aluviales cuaternarios y piroclásticos continentales Qpc.

La zona de recarga del acuífero confinado se localiza en la Sierra de Amozoc, donde afloran las rocas sedimentarias marinas de la Formación Maltrata.

De acuerdo con las direcciones de flujo, la zona de descarga se localiza al Sur de la Ciudad de Puebla.

4.- En la zona del agua de mala calidad en la Ciudad de Puebla estan presentes las siguientes unidades: Kmt, Qvs, Qpc, Qt y Qal. De estas unidades, la única que tiene una relación directa con el origen del agua de mala calidad es la primera de ellas, la cual contiene agua con un alto contenido de Sólidos Totales Disueltos, que asciende a través de las fracturas y fallas presentes en la zona, entre las cuales se encuentra la Falla Profunda Malinche y la Fractura Valsequillo, para después entrar en contacto con las otras unidades.

5.- Las muestras de agua subterránea a las cuales se les realizó el análisis químico fueron clasificadas como bicarbonatadas.

Los resultados de estos análisis indican que en general el agua de la zona de estudio es de buena calidad, excepto en el área de la Ciudad de Puebla donde se puede considerar como tolerable, con excepción del pozo localizado en Concepción la Cruz que presentó un contenido en Sólidos Totales Disueltos muy elevado.

Es notorio el incremento gradual en el contenido de iones en el agua durante su trayecto de las zonas de recarga al centro del valle y después a la zona de descarga al Sur de la Ciudad de Puebla, lo cual se debe a que el agua en su paso a través de las formaciones rocosas va disolviendo los minerales que las constituyen para presentar las mayores concentraciones conforme se aproxima a la zona de descarga.

6.- Para determinar el posible origen del agua de mala calidad se desarrollaron las siguientes teorías:

a) El agua de mala calidad proviene del acuífero confinado y asciende al acuífero somero a través de fallas y fracturas presentes en la zona.

b) Agua de origen volcánico asciende a través de las estructuras geológicas produciendo la zona con agua de mala calidad.

c) Una combinación de las dos teorías anteriores.

7.- Las estructuras geológicas como fallas y fracturas constituyen el único conducto a través del cual se comunican el acuífero somero y el profundo.



## IX.2 RECOMENDACIONES

1.- La concentración de los aprovechamientos en el área de la Ciudad de Puebla reduce la carga hidráulica de la zona, provocando que el ascenso del agua de mala calidad se incremente, por lo cual es recomendable reubicar esos aprovechamientos en otros lugares.

2.- Se recomienda realizar los estudios pertinentes para determinar con certeza el origen del agua de mala calidad.

3.- De acuerdo con las características hidráulicas se recomiendan como posibles áreas favorables para la explotación las zonas al Poniente de Huejotzingo y al Oriente de San Luis Teolochocho en las laderas de la Sierra nevada y la Malinche respectivamente, así como en la zona de descarga al Sur de la Ciudad de Puebla al Oeste de San Francisco Totimehuacán.

## B I B L I O G R A F I A

- American Geological Institute, 1976. Dictionary of Geological Terms. Anchor Press. U.S.A.
- Belousow, V., 1979. Geología Estructural. Editorial MIR, U.R.S.S.
- Best, M.G., 1982. Igneous and Metamorphic Petrology. W.N. Freeman and Company. New York, U.S.A.
- Blásquez, L., 1959. Hidrogeología de las regiones desérticas de México. Anales del Instituto de Geología U.N.A.M.. México.
- Calderón García, A. 1956. Estratigrafía del Mesozoico y Tectónica del sur del Estado de Puebla; Presa de Valsequillo, Sifón de Hexotitlanapa y problemas hidrológicos de Puebla. Congreso Geológico Internacional, Instituto de Geología U.N.A.M.
- Castany, G., 1975. Prospección y Explotación de las aguas subterráneas. Ed. Omega, Barcelona, España.
- Cepeda Davila L., 1985. Apuntes de Petrología Ignea. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.. México.
- CONACYT, 1982. El Redescubrimiento de la Tierra. CONACYT, México.
- Corrales, Zarauza, Inmaculada, 1977. Estratigrafía. Editorial Rueda, Madrid, España.
- Custodio E. y Llamas, M.R., 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, España.
- Davis, S.N. and De Wiest, R., 1966. Hidrogeology. John Wiley and Sons, New York U.S.A.
- Demant, Alain, 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Rev., vol. No. 2, Instituto de Geología U.N.A.M., México.
- Demant, Alain, 1982. Interpretación Geodinámica del Volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano, Rev. Vol 5 No. 2. Instituto de Geología U.N.A.M.. México.
- De Morsily, Ghislain, 1986. Quantitative Hidrogeology. Academy Press, Inc. London, England.
- Derruau M., 1978. Geomorfología. Editorial Ariel, Barcelona, España.
- De Cserna Z., De la Fuente-Duch M., 1988. Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México. Instituto de Geofísica,

U.N.A.M.. México.

- Erben H.K. 1956. Estratigrafía y Paleontología del Jurásico Inferior y Medio Marino de la Región Central de la Sierra Madre Oriental. Congreso Geológico Internacional, Instituto de Geología, U.N.A.M.. México.
- Font-Altaba M. y San Miguel A., 1978. Atlas de Geología. Ediciones Jover, Barcelona, España.
- Freez, R. Allany Cherry, John A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.
- García Calderón, J. 1976. Investigación Hidrogeológica de la Región "El Cardito", Zacatecas. Instituto de Geología, U.N.A.M.. México.
- García Enriqueta, 1986. Apuntes de Climatología. México.
- García Enriqueta, 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. México.
- Gutiérrez Arroyo, J.J. y González F., M.R., 1984. Estudio Hidrogeológico Preliminar Delta del Río Balsas, Mich.. Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.. México.
- Hanus V. and Vanek J., 1979. Subduction of the Cocos Plate and Deep Active Fracture Zones of Mexico. Geofísica Internacional, Vol. 18 No.3. Instituto de Geofísica, U.N.A.M..
- INEGI, 1985. Síntesis Geográfica y Anexo Cartográfico del Estado de Puebla.
- INEGI, 1985. Síntesis Geográfica y Anexo Cartográfico del Estado de Tlaxcala.
- Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S.A., 1985. Estudio Geohidrológico Complementario en el Valle de Puebla y Cuenca de Oriental en el Estado de Puebla. SARH, México.
- I.T.S., S.A., 1984. Ampliación al estudio geofísico en el Valle de Puebla, para proporcionar agua en bloque a la Ciudad de Puebla, Pue.. S.A.R.H., Dirección General de Captaciones y Conducciones de Agua, Subdirección de Estudios Planes y Programas.
- Kruseman, G.P. and De Ridder N.A., 1970. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Holanda.
- Lesser I.J.M., 1978. Apuntes de Hidrogeoquímica. Inedito. Centro de Educación Continua, U.N.A.M. México.
- Lesser I.J.M., Sánchez D., F. y González P.D., 1985.

- Hidrogeoquímica del acuífero de la Ciudad de México. México.
- Lira, Jorge, 1987. La Percepción Remota. S.E.P., Fondo de Cultura Económica. CONACYT, México.
- Lohman, S.W., 1977. Hidrología Subterránea. Editorial Ariel. Barcelona, España.
- López R., E., 1979. Geología de México, Tomo III. Edición Escolar S.E.P.. México.
- Lugo Hubb, José, 1988. La Superficie de la Tierra, un vistazo a un mundo cambiante. S.E.P., F.C.E., CONACYT, México.
- Martínez J. A., 1981. Mapas Geológicos, Explicación e interpretación. Paraninfo, S.A.. Madrid, España.
- Moya, J.C. y Zamorano, J.J.. Geomorfología del volcán la Malinche y sus alrededores. Tesis profesional, Colegio de Geografía, U.N.A.M.. México.
- O.N.U.O.M.M., 1977. Estudios Hidrológicos, Manual de Instrucciones. Organización Meteorológica Mundial, Publicación No. 140, Managua, Nicaragua.
- Pettijohn, F.J., 1975. Sedimentary Rocks. Harper and Row, New York.
- Pulido, José Luis, 1978. Hidrogeología Práctica. U.R.M.O., S.A. de Ediciones, Bilbao, España.
- Reyes Cortés, M., 1979. Geología de la Cuenca de Oriental, Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México.
- S.A.R.H., 1978-1984. Archivo Técnico de la Subdirección de Estudios, Planes y programas de la S.A.R.H. (Inédito).
- S.A.R.H., 1971. Región Hidrológica No. 18, Cuenca de los ríos Atoyac y Mixteco. Boletín Hidrológico Num. 48. Subsecretaría de Planeación, Dirección General de estudios, Dirección de Hidrología.
- S.A.R.H., 1980. Especificaciones para la toma de muestras de agua. Laboratorio Central del Agua, Subdirección de Operación, Informe inédito de la S.A.R.H.. México.
- S.P.P., 1990. XII Censo General de Población. INEGI. México.
- S.P.P.. 1990. Cartografía Básica de INEGI. Mapas, Planos y Fotografías Aéreas, Imagen de Satélite. INEGI. México.
- Tinajero González, Jaime A., 1985. Apuntes de Aspectos Fundamentales en el Estudio del Agua Subterránea (Geohidrología). Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.. México.

Todd, David K., 1980. Groundwater Hydrology. John Wiley and Sons, New York, U.S.A.

Tucker, M.E., 1981. Sedimentary Petrology an Introduction. Blackwell Scientific Publications, Boston Massachusetts, U.S.A..

Weyl, R. 1974. Determinación y clasificación de las rocas volcánicas en la región Puebla-Tlaxcala. Proy. Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica. México.