



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA



HIDROGEOGRAFIA AMBIENTAL EN LA SUBCUENCA DE ZUMPANGO, ESTADOS DE MEXICO E HIDALGO
DETERMINACION DE LA CALIDAD QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA Y SU EFECTO EN LA SALUD.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

LICENCIADO EN GEOGRAFIA

P R E S E N T A :

RAUL FLORES VENEGAS



MEXICO, D. F.



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento a:

Dios, Margarita, José Luis, Eduardo, Alejandro, Lorena, Ana, Miguel, Aida y José.

Al Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el proyecto de investigación del que se derivó el presente estudio.

Al Dr. Rafael Huizar Alvarez por el tiempo dedicado y acertada asesoría.

Al M.C. Teodoro Méndez García por su valioso apoyo en el trabajo de laboratorio.

A la Doctora Laura Helena Maderey Rascón, Maestro Víctor Manuel Martínez Luna, Maestro Cuahutémoc Torres Ruata y al Ingeniero Newton Hugo Quiroz Ramírez quienes a la par de sus valiosas sugerencias, que en tantas formas mejoraron el manuscrito, formaron parte también del comité dictaminador.

*"Toda nuestra ciencia
comparada con la realidad
es primitiva e infantil.....
Y sin embargo es lo más
preciado que tenemos."*
Albert Einstein
(1879-1955)

RESUMEN

La Subcuenca de Zumpango es una zona semiárida, donde escasea el recurso agua, se localiza en los estados de México e Hidalgo, esto ha originado la necesidad de usar agua residual en actividad agrícola, sobretodo si es un recurso de disponibilidad inmediata, y es generado en volúmenes importantes por el drenaje de la Ciudad de México.

El riego con agua residual es un factor de contaminación del suelo, por las sustancias químicas que contiene, pueden salinizarlo y también puede alterar la calidad química y bacteriológica del agua subterránea, al infiltrarse hasta el nivel freático.

Es de todos conocido que las actividades agrícolas, industriales y urbanas originan problemas ambientales como la contaminación del aire, suelo y agua. Para tratar de evaluarlos, se ha identificado el origen y comportamiento de las sustancias químicas combinadas con el agua a fin de obtener indicios, que indiquen, si una sustancia química está afectando a la salud de la población, por el consumo de agua con una cierta calidad química.

La base de ésta investigación, se sirve del complejo ambiental: aire-suelo-rocas-agua-contaminantes-hombre, teniendo como escenario al ciclo hidrológico, para ilustrar como actúa el agua cuando pasa de la atmósfera al suelo y rocas, luego al agua subterránea y finalmente al hombre que la ingiere. Por esta razón, el presente estudio de hidrogeografía ambiental, consiste, en analizar y comprender, en forma sistemática, algunos de los principios metodológicos de la Geografía, en relación a la hidrogeoquímica de una zona. Con esto se tiene que:

1.-El principio geográfico de *localización*: ha sido necesario para ubicar geográficamente área de estudio y a partir de ahí, describir y tratar de entender el origen del medio físico de la misma.

2.-*Causalidad*: para explicar el posible origen y concentración de sustancias iónicas en el agua subterránea y si esto afecta o no a la salud de la población y

3.-*Relación*: establecer la relación entre fenómenos humanos como el uso de agua residual en actividad agrícola con fenómenos físico-geográficos, de los que resaltan la mineralización del agua subterránea y la distribución de la lluvia. Asimismo, de su relación con hechos físicos como la litología y edafología para así ver causas-efectos como el origen y composición química del agua subterránea con la superficial y posibles efectos en la salud de la población por el consumo de la primera.

Lo anterior no significa que los procesos hidrogeoquímicos puedan ser descritos únicamente a partir de los principios geográficos, pues ha sido necesario utilizar conocimientos básicos de otras disciplinas como química, física, biología y geología. Por esta razón, el presente estudio intenta dar un enfoque sintético del medio geográfico o ambiente.

El registro de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos en el agua subterránea de 31 pozos distribuidos en el área de estudio muestran que el flujo subterráneo principal es de noreste-oeste.

La composición química del agua subterránea indica que existen sustancias químicas externas al medio geológico, entre ellas boro, cloruros y nitratos, manifestando que el agua residual usada en el riego ya alcanzó la zona saturada.

El contenido de boro varía de un sitio a otro, pero en términos generales está por encima del límite permisible. En los aprovechamientos de la región oeste, los cloruros también rebasan la norma. Aún cuando los nitratos se mantienen dentro de la norma mexicana, es de resaltar su presencia en todos los pozos monitoreados, lo que define su migración desde superficie.

De las propiedades físico-químicas del suelo y del conocimiento litológico se ha interpretado que el agua subterránea está obteniendo su composición química de las rocas del subsuelo, misma que se altera bajo áreas de riego con agua residual.

La calidad química del agua subterránea en términos generales es apta para consumo humano. Sin embargo, se están presentando enfermedades, aunque no se puede dar un resultado concluyente, seguramente son atribuidas a las sustancias químicas mencionadas arriba y a bacterias que se infiltran hacia la zona saturada.

CONTENIDO

Lista de figuras y tablas

	página
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2	
MEDIO FÍSICO	
2.1.- Localización	6
2.2.-Relieve	7
2.3.-Clima	8
2.4.- Geología	11
CAPÍTULO 3	
EL RECURSO SUELO	
3.1.-Composición mineralógica	21
3.2.-Tipos de suelo	22
3.3.-Capacidad de intercambio catiónico	24
3.4.-Ciclo de salinización del suelo agrícola	30
3.5.-Uso actual	35
CAPÍTULO 4	
EL RECURSO AGUA	
4.1.- agua superficial	39
4.2.- agua subterránea	42
CAPITULO 5	
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE HIDROGEOQUÍMICA	
5.1.-Origen del contenido iónico en el agua subterránea	46
5.2.-Composición química del agua subterránea en el área de estudio	49
5.3.-Flujo principal del agua subterránea	58
CAPÍTULO 6	
CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA	
6.1.-Calidad química del agua superficial	62
6.2.-Calidad fisico-química del agua subterránea	67
6.2.1.-Facies hidrogeoquímicas	67
6.2.2.-Normativa de calidad química del agua subterránea	75
6.2.3.-Detergentes y pesticidas en agua subterránea	79
6.2.4.-Micoorganismos en agua subterránea	80
6.2.5.-Efectos en la salud por aniones, cationes y metales pesados encontrados en agua subterránea	82
6.3.-Enfermedades reportadas en el periodo 1996-2003 para el área de estudio	87
CAPÍTULO 7	
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	
7.1.-Discusión de resultados	93
7.2.-Conclusiones	95
7.3.-Sugerencias	96
BIBLIOGRAFÍA	98
GLOSARIO	102
ANEXOS	104

LISTA DE FIGURAS

	Página
2.1 Localización de la Subcuenca de Zumpango dentro de la Cuenca de México	6
2.2 Mapa de distribución de lluvia y temperatura media anual con gráficas comparativas de precipitación media anual y evapotranspiración real	10
2.3 Geodinámica regional y su relación con la Cordillera Volcánica Transmexicana	11
2.4 Localización de pozos profundos cuya información litológica ha sido usada para elaborar la estratigrafía generalizada de la Cuenca de México.	12
2.5 Mapa geológico que muestra la distribución de la lluvia y localización de los pozos de monitoreo	15
2.6 Sección geológica A-B.	16
2.7 Sección geológica C-D-E	17
2.8 Correlación estratigráfica F-G-H	18
2.9 Modelo tectónico-estructural de la Cuenca de México	19
3.1 Mapa edafológico	23
3.2 Estructura de una montmorillonita	25
3.3 Representación esquemática del complejo arcillo-húmico del suelo	26
3.4 Ciclo de salinización del suelo	31
4.1 Desarrollo histórico del riego	40
4.2 Volúmenes de agua residual aplicados por temporada de riego	42
4.3 Gráfica de principales usos y porcentajes de agua potable en la Subcuenca de Zumpango	45
5.1 Gráfica de C.E. y STD en agua subterránea para el año de 1997	50
5.2 Localización de pozos y canales de monitoreo	51
5.3 Líneas de igual concentración de STD y sodio en agua subterránea	52
5.4 Líneas de igual concentración de cloruro y sulfato en agua subterránea	53
5.5 Líneas de igual concentración de boro y de igual índice cloruro/sodio en agua subterránea	54
5.6 Gráfica de concentración de aniones en el agua subterránea para el año de 1997	55
5.7 Gráfica de cloruro y sodio en el agua subterránea para el año de 1997	57
5.8 Mineralización del agua subterránea y flujo subterráneo	60
5.9 Distribución de la conductividad eléctrica en zonas cercanas a la Subcuenca de Zumpango	61
6.1 Gráfica de concentración de STD y Conductividad eléctrica en agua residual para el año de 1997	63
6.2 Diagrama del Departamento de Agricultura de Estados Unidos para clasificación de agua de riego	65
6.3 Gráfica de concentración de boro en agua residual para el año de 1997	64
6.4 Gráfica de Fe, Zc y Mn en agua residual para el año de 1997	66
6.5 Principales mezclas de agua subterránea y su evolución temporal en 1997 mediante el diagrama de Piper	68
6.6 Principales mezclas de agua subterránea y su evolución temporal en 1997 mediante el diagrama de Durov.	69
6.7 Principales mezclas de agua subterránea en diagramas de Piper y Durov	70
6.8 Modelo conceptual de evolución hidroquímica	73
6.9 Composición química del agua subterránea a partir del diagrama de Stiff	74
6.10 Gráfica de concentración de boro en agua subterránea para el año de 1997	78
6.11 Estructura química de un tensoactivo de uso común (alquil-aril)	79
6.12 Correlación espacial entre la distribución de la lluvia, litología, flujo subterráneo, mineralización en los pozos de monitoreo, concentración de nitratos y cloruros en el agua subterránea y poblaciones con pozos en las que se reporta el mayor número de enfermedades dentro de la Subcuenca de Zumpango	90
6.13 Correlación espacial entre la distribución de la lluvia, tipos de suelo, áreas de riego, flujo subterráneo, mineralización en los pozos de monitoreo y poblaciones con pozos en las que se reporta el mayor número de enfermedades dentro de la Subcuenca de Zumpango	91

LISTA DE TABLAS

	Página
1.1 Parámetros, métodos y límites de detección empleados en los análisis químicos de agua subterránea y superficial	4
2.1 Clasificación de climas en la Subcuenca de Zumpango	8
2.2 Estaciones meteorológicas en la Subcuenca de Zumpango con datos de temperatura, precipitación mensual y evapotranspiración real anual (periodo 1975-1990)	9
2.3 Correlación estratigráfica generalizada para la Cuenca de México	13
3.1 Minerales pirogenéticos e hidratogenéticos derivados de una masa fundida de rocas	21
3.2 Valores de capacidad de intercambio catiónico y aniónico en suelos de la Subcuenca de Zumpango	28
3.3 Principales localidades urbanas y rurales en los municipios de la Subcuenca de Zumpango	36
4.1 Valores de conductividad hidráulica en acuíferos y acuitardos de la Subcuenca de Zumpango	43
4.2 Extracción de agua subterránea en la Subcuenca de Zumpango.	44
5.1 Composición química de la corteza terrestre	46
5.2 Concentraciones promedio en ppm, de iones mayores, menores, elementos traza y gases frecuentes en muestras de agua superficial y subterránea	48
6.1 Normativa mexicana referente a sustancias químicas en agua residual para uso agrícola	62
6.2 Facies hidrogeoquímicas de agua subterránea en la Subcuenca de Zumpango	72
6.3 Normativa mexicana e internacional para potabilidad del agua	75
6.4 Concentración promedio de bacterias frecuentes en agua subterránea	81
6.5 Producción de los principales metales de interés toxicológico en México	84
6.6 Enfermedades gastrointestinales registradas en las principales poblaciones de la Subcuenca de Zumpango	88
A-1 Datos físico-químicos del primer muestreo (enero 1997)	105
A-2 Datos físico-químicos del segundo muestreo (febrero 1997)	106
A-3 Datos físico-químicos del tercer muestreo (marzo 1997)	107
A-4 Datos físico-químicos del cuarto muestreo (abril 1997)	108
A-5 Datos físico-químicos del quinto muestreo (mayo 1997)	109
A-6 Datos físico-químicos del sexto muestreo (julio 1997)	110
A-7 Datos físico-químicos del séptimo muestreo (octubre 1997)	111
A-8 Resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002) -	112
A-9 Tipos de clima obtenidos del sistema modificado de García (1981) y fórmula empírica de Turc (1954) para calcular evapotranspiración real anual	113

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En general, las investigaciones efectuadas hasta el momento en la Subcuenca de Zumpango son principalmente trabajos de naturaleza puntual, enfocados a temas como: Geología, Economía y Geotécnica, que se refieren solamente a la rehabilitación de la laguna epicontinental de Zumpango, como reguladora de las avenidas del Río Cuautitlán y como almacenadora de agua residual y pluvial para riego. Algunos de ellos como Pacheco Cortés (1960) y Sánchez Jiménez (1960), mencionan, que el agua subterránea puede contaminarse por infiltraciones de desechos líquidos y lixiviación de sólidos domésticos que representan un riesgo para la salud de la población. Sin embargo, esas afirmaciones no se analizan, ni se evalúan. El agua residual tiene concentraciones considerables de compuestos contaminantes, que introducidas mediante el riego, pueden afectar la potabilidad del agua de los pozos, aspecto aún no abordado en los estudios hasta ahora realizados. Existen también estudios: económico y geográficos para la población de Zumpango de Ocampo de ellos se pueden mencionar los de Cordero Castañeda (1986) y Salcedo Loredo (1991) respectivamente, que sólo mencionan las fuentes del agua y el uso que se le da, sin abordar a fondo el aspecto de potabilidad del agua. Respecto al suelo, existen descripciones de las propiedades físicas como pH, conductividad eléctrica y porosidad, químicas como la capacidad de intercambio catiónico e hidrológicas de las que resalta la permeabilidad en algunos lugares del centro, SW y NE de ésta subcuenca.

Por otra parte, existe indisponibilidad de las autoridades encargadas del recurso agua en la Subcuenca de Zumpango, pues no permiten tomar muestras de los pozos de bombeo y esto origina que en la misma exista un reducido número de publicaciones sobre ésta línea de investigación.

Por lo anterior, hacen falta estudios que aborden la degradación del recurso agua subterránea en relación al riego con agua residual, actividad que se practica desde hace más de cuatro décadas y cuya degradación, puede estar ocasionando algunas enfermedades entre la población. Asimismo, es necesario evaluar la conveniencia de usar el agua subterránea para riego, pues en algunos sitios se aprecian problemas de salinidad en suelos agrícolas.

HIPÓTESIS

La degradación del recurso agua en la Subcuenca de Zumpango está ocasionando efectos negativos en su aprovechamiento agrícola y doméstico, de los que respectivamente se pueden mencionar a la salinidad del suelo y enfermedades gastrointestinales relacionadas directamente con el consumo de agua subterránea, estas últimas causadas por bacterias y sustancias contaminantes en estado iónico como nitratos y cloruros que se filtran con el agua residual usada en la agricultura hasta la zona saturada.

OBJETIVOS

Con el fin de contribuir al conocimiento de la problemática expuesta, se plantean los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

*Determinar la calidad química del agua subterránea en la Subcuenca de Zumpango, y conocer mediante un estudio integral del medio geográfico de la misma, el posible origen de las enfermedades que afectan a la salud de la población.

OBJETIVOS PARTICULARES

*Conocer y evaluar las características fisico-químicas del agua superficial, sus aptitudes para la irrigación, y los posibles efectos en el agua subterránea de esta práctica agrícola en la Subcuenca de Zumpango.

*Conocer y evaluar las características fisico-químicas del suelo agrícola, su relación con las del agua superficial de la Subcuenca de Zumpango, y como afectan ambas a la calidad química del agua subterránea.

*Obtener información documentada referente a efectos en la salud humana por sustancias iónicas contaminantes en el agua, así como interpretar datos de enfermedades reportadas por instituciones del sector salud localizadas dentro del área de estudio para conocer la distribución espacial y el número de enfermedades causadas por consumo de agua subterránea.

A fin de lograrlos, la presente investigación, está estructurada de la siguiente manera:

El capítulo uno, presenta el planteamiento del problema, hipótesis, objetivos, antecedentes, así como la metodología que se siguió en la misma.

En el capítulo dos, se establece la localización geográfica de la Subcuenca de Zumpango y se dan a conocer las características del medio físico como el relieve, clima y geología, de ésta última se destaca la estratigrafía, tratando de explicar las causas que les dieron origen y resaltando su relación con la hidrología.

El capítulo tres trata del recurso suelo. Se da a conocer su origen, las características físicas de los tipos de suelo existentes, así como sus características físico-químicas, resaltando de ellas, su composición química a partir de las rocas predominantes en la zona y la capacidad de retención de iones. A partir de las anteriores características se establece un ciclo de salinización del suelo agrícola, se da a conocer su uso principal, y se enfatiza su relación con la apertura de zonas de riego con agua residual y subterránea. Finalmente se da una pequeña discusión, tomando en cuenta todo lo expuesto en éste capítulo.

El capítulo cuatro aborda los aspectos más relevantes del recurso agua para ésta subcuenca. Al principio se hace referencia al agua superficial y su uso en el riego agrícola, posteriormente se indican los aspectos principales del agua subterránea, se mencionan las características de las capas de roca que actúan como acuíferos, sus propiedades hidrologías como la conductividad hidráulica y los volúmenes de extracción y usos principales, esto con el fin de tener una idea de la cantidad de agua existente en la Subcuenca de Zumpango.

En el capítulo cinco, se interpretan los resultados de análisis físico-químico del agua superficial y subterránea. A la par, se intenta dar una explicación del origen iónico del agua subterránea y con ello se da a conocer la composición química de la misma. Finalmente se establece su relación con el flujo principal de agua subterránea.

El capítulo seis hace referencia a la calidad química del agua superficial y subterránea. En ambos casos se analiza su aptitud para riego agrícola, para la segunda también se establecen las facies hidrogeoquímicas principales a partir de su composición química y con ellos se da a conocer la potabilidad del agua subterránea en base a la normativa mexicana e internacional. Por último se establece el origen de las enfermedades gastrointestinales causadas por consumo de agua reportadas en ésta subcuenca.

En el capítulo siete se establece una discusión de los resultados obtenidos en los capítulos cinco y seis, asimismo se mencionan las conclusiones generales de esta investigación y se indican algunas sugerencias que pudieran minimizar la contaminación del agua subterránea.

ANTECEDENTES

De los estudios previos en ésta subcuenca, se pueden mencionar los siguientes:

*Pacheco Cortés (1960). describe las características físico-químicas del recurso agua potable en la población de Zumpango de Ocampo. Se analizan las obras de ingeniería necesarias para establecer una red de alcantarillado y de agua potable. Menciona las posibilidades de contaminación del agua subterránea por lixiviados de desechos líquidos y sólidos.

*Sánchez Jiménez (1960). Establece las condiciones que requiere el establecimiento de lagunas de oxidación y sus ventajas en el tratamiento de aguas negras para la población de Zumpango.

*Rangel (1966) y Figueroa (1968). Abordan los estudios previos del proyecto de los bordos en la laguna de Zumpango hasta su culminación

*De la Torre (1980). Realiza un estudio geológico de las cuencas de Tula y Zumpango, para determinar características físicas como granulometría, dureza, solubilidad, permeabilidad, y en base a esto, plantea las condiciones para que los vasos de captación funcionen como almacenadores de aguas negras y pluviales.

*Cortés Delgado (1982) efectuó un estudio económico de la población de Zumpango, hace un análisis económico y social fundamentado en indicadores de la población como natalidad y mortalidad y describe las actividades económicas predominantes.

*Favela (1986) Elabora un estudio edafológico, en donde hace perfiles en lugares del centro, SW y NE de esta subcuenca. En ellos determina algunas características físico-químicas de los suelos como son: permeabilidad, capacidad de campo, color, pH, conductividad eléctrica, entre otras.

*Cordero Castañeda (1986) analiza las características físicas de la ciudad de Zumpango. Además menciona los recursos naturales con que cuenta esta misma ciudad, se refiere sobre todo a agua y suelo y en base a ello habla de como aprovecharlos para instalar un complejo agroindustrial.

* Salcedo Loredó (1991) recapitula la historia del desarrollo de la laguna de Zumpango para su funcionamiento artificial, y de los beneficios y perjuicios para la población del mismo nombre. Finalmente, habla de los trabajos que se han hecho en los últimos años para incrementar la capacidad de dicha laguna.

METODOLOGÍA

El presente estudio formó parte de un proyecto de investigación realizado por el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, denominado " Estructura geológica y flujo de agua subterránea en las subcuencas Zumpango-Pachuca", fue coordinado por el Dr. Rafael Huizar Alvarez en el año de 1997, uno de sus objetivos fue conocer la evolución de la calidad del agua y su efecto en la salud.

En ese mismo año, las características químicas del agua subterránea y residual se determinaron por medio de un programa regular de muestreo, que fue mensual en la temporada seca (enero a mayo) y cada dos meses durante la temporada de lluvias (junio a octubre). En él se consideró lo siguiente:

1. El monitoreo del 10% del total de los pozos localizados en la subcuenca (31 de 331). Desde luego, se pretendió monitorear un porcentaje mayor del total de pozos, pero no se logró el acuerdo ante la Gerencia de Aguas del Valle de México de la Comisión Nacional del Agua y gobiernos municipales. Por ésta razón, no se monitoreó a la mayoría de los pertenecientes a los ramales Tizayuca-Zumpango, Tizayuca-Pachuca, los Reyes-Ferrocarril, Castera y Ecatepec. Se debe considerar además, que otros pozos estaban fuera de servicio o en reparación.
2. Debido a lo anterior, se optó por una selección de pozos en puntos representativos de ésta subcuenca, intentando que la distribución geográfica incluyera diversas regiones -centro, oeste, norte, sur y noreste- para que los resultados fuesen representativos, aunque de forma generalizada. El criterio así elegido, incluyó pozos de abastecimiento a zonas urbanas de numerosa población como las de Zumpango y Tizayuca, pues son ellos, los consumidores del agua y son ellos también, los posibles afectados de presentarse contaminación.
3. La selección de canales en puntos representativos de uso intensivo de agua residual en la actividad agrícola de la zona. Esto es importante, si se considera al agua residual como un factor que pudiera alterar la calidad química del agua subterránea.
4. Finalmente, el aspecto referido a las características hidrogeoquímicas del agua subterránea en relación a su dinámica, pues los pozos monitoreados y las muestras que se tomaron corresponden tanto a tomas superficiales como subterráneas. Por esto, las profundidades de muestreo varían de 1 m a 12 m en los canales y de 60 m a 200 m en los pozos, pero predomina la extracción de agua subterránea a los 60m, pues a ésta cota se ubican columnas de succión, pero en realidad capturan también agua que desciende de la superficie. Esto implica que podría existir infiltración de sustancias iónicas contaminantes hacia el agua subterránea y causar enfermedades gastrointestinales.

Las muestras de agua, tanto superficial como subterránea, fueron colectadas directamente en recipientes de plástico, los cuales inmediatamente debieron ser conservadas a bajas temperaturas durante su transporte, con la finalidad de que los iones contenidos en el agua, se mantuvieran en condiciones de mínima variabilidad y

alteración hasta su análisis en laboratorio, en donde una vez más, se debían mantener a bajas temperaturas. Antes de iniciar las determinaciones químicas, las muestras se filtraron en papel filtro de celulosa, sin ceniza, (Wathman de número 44) para eliminar sustancias suspendidas que pudieran hacer interferencia al realizar los análisis químicos.

Las muestras destinadas para determinación de metales pesados, debieron ser acidificadas inmediatamente con ácido nítrico concentrado (NH_3) hasta alcanzar un valor de 2 en la escala pH, para evitar su precipitación durante el transporte y estancia en el laboratorio. Asimismo, las muestras destinadas para determinación de amonio debieron ser acidificadas inmediatamente con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), mantenidas a baja temperatura y su análisis debió realizarse antes de 24 horas, pues su concentración puede variar en poco tiempo y perderse este ion en forma de gas.

Algunas determinaciones que son inestables, fueron realizadas directamente en campo y se corroboraron en laboratorio. Estas son: temperatura del agua, pH y conductividad eléctrica, para ello se utilizaron medidores digitales estándar como: termómetro de mercurio, potenciómetro y conductímetro de electrodo estándar respectivamente.

Los análisis físico-químicos de agua subterránea y superficial, fueron realizados en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, de acuerdo a los métodos de la USA-EPA (1974) y los métodos estandarizados de APHA-AWWA-WPCF (1992) (tabla 1.1)

Tabla 1.1 Parámetros, métodos, equipo y límites de detección empleados en los análisis químicos de agua subterránea y superficial

Parámetro	Método	Equipo	Límite inferior en mg/l
Ca^{2+} y Mg^{2+}	Versenato (EDTA)	Bureta de 100 ml, matraces Erlenmeyer de 25 y 50 ml marca pyrex	0.09
Na^+ y K^+	Fotometría de llama	Fotómetro de llama	0.04
CO_3^{2-} y HCO_3^-	Titulación con H_2SO_4 0.002 N	Bureta de 100 ml, matraces Erlenmeyer de 25 y 50 ml marca pyrex	0.12
Cl ⁻	Titulación con Ag NO_3 0.005 N	Bureta de 100 ml, matraces Erlenmeyer de 25 y 50 ml marca pyrex	1.0
SO_4^{2-}	Turbidimétrico y gravimétrico	Centrífuga y camisas para centrífuga marca pyrex, balanza analítica	0.2
P ⁻	Método de azul de molibdeno de Bray	Colorímetro y tubos de ensayo para colorímetro marca pyrex	0.2
B ⁻	Fotolorimetría método de la curcumina	Colorímetro, cápsulas de porcelana y tubos de ensayo para colorímetro marca pyrex	0.5
Elementos Traza	Absorción atómica	Espectrofotómetro de absorción atómica modelo Perkin-Elmer y lámparas de emisión espectroscópica de elementos traza	0.2
NO_3^-	Fotolorimetría, empleando Brucina	Colorímetro y tubos de ensayo para colorímetro marca pyrex	1.0
NH_4^+	Fotolorimetría empleando $\text{HgI}_2 \cdot 2\text{KCl}$.	Colorímetro y tubos de ensayo para colorímetro marca pyrex	0.2
NO_2^-	Fotolorimetría, empleando 1-Naphtyl-ethyleadinamina	Colorímetro y tubos de ensayo para colorímetro marca pyrex	0.5

Para interpretar la información de laboratorio, con los resultados de los análisis físico-químico, se elaboraron:

1.- Mapas con líneas de igual concentración de iones, para obtener un panorama general de la dirección principal del agua subterránea.

2.- Diagramas de Piper (1944), Durov (1948) y Stiff (1951), a fin de visualizar en una forma más objetiva la composición química del agua. Para ello se utilizó el software para PC denominado AQUACHEM Versión 3.7 (1997) de Waterloo Hydrogeologic, Inc. El riesgo de salinidad y sodicidad del agua residual destinada a riego, fue obtenido de acuerdo al diagrama desarrollado por el USSSL Staff (1973), del Departamento de Agricultura de Estados Unidos.

3.-Gráficas de regresión lineal en Conductividad Eléctrica y Sólidos Totales Disueltos y correlación lineal en: NO_3^- , Cl^- , B^- y P^- , para observar su variación temporal, pues estas últimas son sustancias químicas contaminantes. Dichas gráficas muestran las concentraciones límite establecidas por la Secretaría de Salud de México (1999), la USA-EPA (2000) y la OMS (1998), cuya finalidad es determinar el nivel en que dichas sustancias pueden ser peligrosas en el agua y con ello dar a conocer la calidad físico-química de la misma.

En relación al efecto del agua en la salud, se obtuvieron datos de enfermedades gastrointestinales en la Unidad de Medicina Familiar del Instituto Mexicano del Seguro Social de Zumpango en el periodo 1996-2000, y en el trabajo de Olaíz et al, (2003) para las poblaciones de Coacalco, Ecatepec y Tizayuca en el periodo 2000-2003. La interpretación de estos datos sirvió para tratar de evidenciar algunas relaciones de causa-efecto, siendo la principal el consumo de agua-enfermedad y con ello obtener resultados.

Para elaborar la cartografía en ésta investigación, se tomó la base topográfica elaborada por INEGI (1996), de las hojas Zumpango de Ocampo (E14 A19), Tizayuca (E14 B11), Cuautitlán (E14 A29) y Texcoco (E14 B21) a escala 1:50 000, y así delimitar físicamente a la zona de estudio e identificar y describir las formas de relieve.

A la base topográfica obtenida, se integró información geológica basada en los criterios de Huizar et al, (2003) con la que se obtuvieron características hidrogeológicas, tales como las propiedades de los acuíferos presentes en esta subcuenca a partir de su estratigrafía.

La carta edafológica se obtuvo de CETENAL (1982) misma que se comparó con información de Girón (2002) y a su vez con la información topográfica y geológica para conocer las propiedades físico-químicas del suelo.

La cartografía elaborada, también requirió de la observación directa en campo, así como de entrevistas con los habitantes de esta subcuenca, los cuales proporcionaron información de las características del medio físico y social.

Para obtener la superficie total de ésta subcuenca, la superficie urbano-industrial y agrícola, así como el área montañosa, de planicie y la de cada unidad de suelo, se utilizó un planímetro.

En cuanto a las características meteorológicas de esta zona, los datos de temperatura y precipitación registrados en las estaciones: Tizayuca, Km 27 Gran Canal y Km 47 Gran Canal, para el periodo 1975-1990, proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, tuvieron tres finalidades:

1.-Cálculo de la evapotranspiración real media anual por medio del método empírico de Turc (1954). La forma de utilizarlo se ve en la tabla anexa de tipos de clima obtenidos del sistema modificado de García (1981) y fórmula empírica de Turc (1954) para calcular evapotranspiración real anual.

2.-Elaborar la clasificación de climas, a partir del método propuesto por García (1981) (tabla anexa de tipos de clima obtenidos del sistema modificado de García (1981) y fórmula empírica de Turc (1954) para calcular evapotranspiración real anual). y

3.-Elaborar un mapa con isolinias de temperatura y distribución de lluvia.

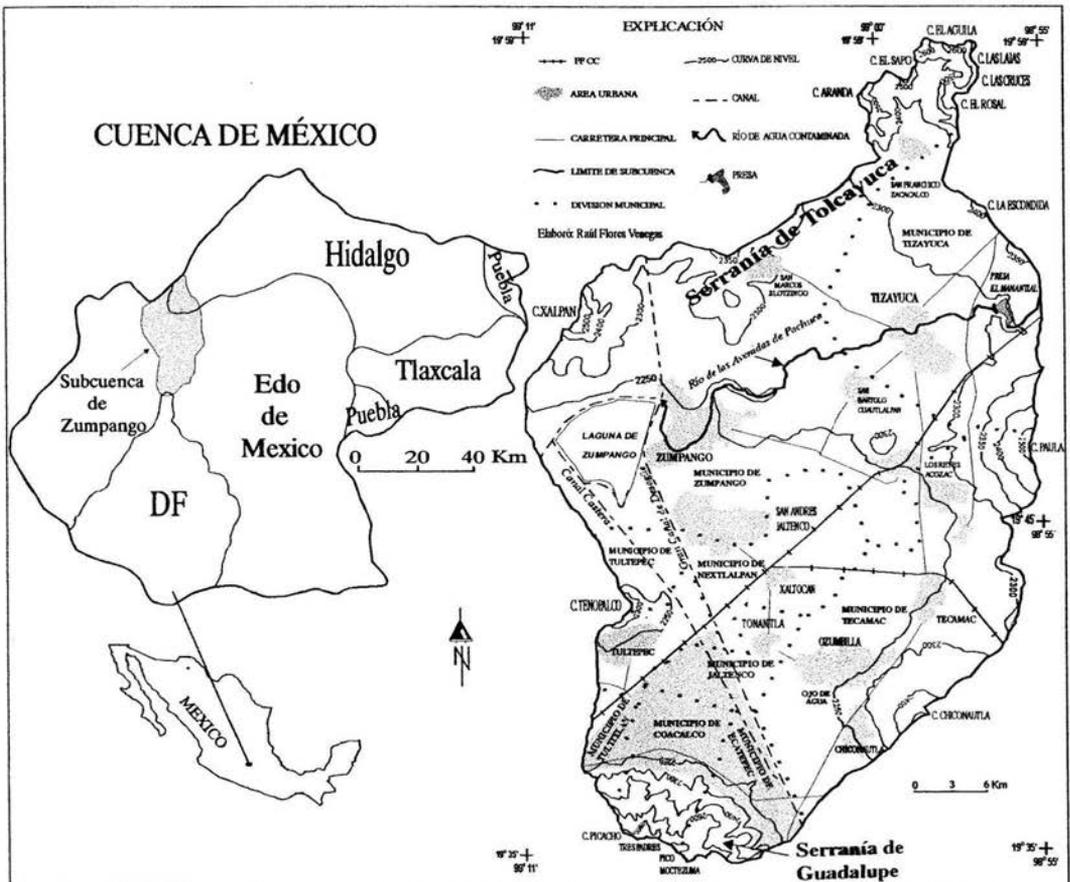
CAPÍTULO 2 *MEDIO FÍSICO*

2.1-LOCALIZACIÓN

La Subcuenca de Zumpango ocupa una porción de la parte noroeste de la Cuenca de México, que a su vez, está en la provincia fisiográfica de la Cordillera Volcánica Transmexicana, provincia constituida de planicies escalonadas y sierras volcánicas circundantes (Lugo, 1990; Lugo y Córdova, 1991).

Políticamente, la superficie de ésta subcuenca, incluye partes de nueve municipios, ocho de ellos, corresponden al Estado de México: Zumpango, Nextlalpan, Jaltenco, Tecamac, Tultepec, Tultitlán, Coacalco y Ecatepec y uno al Estado de Hidalgo: Tizayuca (figura 2.1). La superficie total, cubre 763.9 Km², que representan el 7.9% del total de la Cuenca de México. De acuerdo con INEGI (2000), la población en ésta subcuenca era de aproximadamente 2 036 600 habitantes y se estima que superará los 2 500 000 en el año 2005.

Figura 2.1 Localización de la Subcuenca de Zumpango dentro de la Cuenca de México



2.2-RELIEVE

La Subcuenca de Zumpango presenta un contorno irregular, su parte más larga tiene un eje mayor que mide 73 Km de largo cuya orientación es de SW a NE, es decir, desde el pico Moctezuma hasta el cerro las Lajas.

Su mayor anchura mide 44.5 Km y se extiende desde la ladera SW del cerro Xalpan hasta la ladera NE del cerro Chiconautla.

La parte más angosta con 3.9 Km se localiza en las laderas sur de los cerros Aranda y el Rosal, pertenecientes a la serranía de Tolcayuca. (figura 2.1).

El límite físico de ésta subcuenca, está representado por el parteaguas de la serranía de Guadalupe, localizada al SW, donde están las mayores elevaciones del área, por ejemplo, el pico Moctezuma con 2950 msnm, pico Tres Padres con 3000 y Picacho con 2900 msnm. Al SE, el cerro Chiconautla, con 2500 msnm. Al este, los cerros: Paula y la Escondida, con 2650 y 2450 msnm respectivamente. Al NE, los cerros: el Rosal, la Cruces, las Lajas, el Águila y el Sapo, con altitudes promedio de 2700 msnm, éstas últimas, pertenecientes a la serranía de Tolcayuca. Por último, al NW el cerro Xalpan y al NE el cerro Aranda, con elevaciones promedio de 2700 msnm (figura 2.1).

El área más baja corresponde a una depresión relativa que contiene un cuerpo de agua. De acuerdo con Martínez Luna (1999), se trata de una laguna epicontinental y es nombrada por los habitantes de área de estudio como laguna de Zumpango, tiene una altitud de 2240 msnm. La diferencia de altitud entre esta laguna y la cumbre más alta con 3000m, correspondiente al pico Tres Padres, es de 790 m. Entre ellos también se da una pendiente de 3.5 %.

Las pendientes más fuertes, están en la Serranía de Guadalupe, promediando 85%. Las planicies presentan pendientes promedio de 4%.

Por lo antes expuesto, ésta subcuenca puede dividirse en cuatro unidades geomorfológicas contrastantes:

1.-*Elevaciones y laderas de la serranía de Tolcayuca.* Se trata de una cordillera montañosa volcánica del Terciario y Cuaternario, formada por emanaciones de lava surgidas a través de fracturas y fallas que afectaron esta región (Vásquez y Jaimes, 1990). El área de esta serranía es de 79.3 Km², y presenta una longitud de 44 Km con orientación de SW a NE. La diferencia de altitud entre la cumbre más alta de esta serranía que corresponde al cerro las Lajas con 2700m y la planicie aluvial localizada a 2300m, que se presenta en su base, es de 400m.

2.- *Elevaciones y laderas de la serranía de Guadalupe y elevaciones aisladas.* Al igual que la serranía de Tolcayuca, la serranía de Guadalupe es una cordillera volcánica del Terciario (Vásquez y Jaimes, 1990). Tiene un área dentro de la Subcuenca de Zumpango de 62.6 Km², su longitud es de 18 Km y sus elevaciones principales se han mencionado arriba. La diferencia de altitud entre la cumbre más alta que es el pico Tres Padres con 3000m y la planicie aluvial ubicada a 2300m, es de 700m.

Hacia la región centro oriental, se observan elevaciones aisladas del Pleistoceno, ellos son los cerros: Paula, Olmos, la Escondida y Chiconautla. En conjunto tienen un área de 87.2 Km² cuyas altitudes se han mencionado anteriormente. Son volcanes cineríticos monogenéticos, formados principalmente por escoria de caída y brecha volcánica. (Vásquez y Jaimes, 1990).

3.-*Planicie aluvial central*. Posee una altitud promedio de 2260m, se ha originado a partir de los depósitos de arena grava arcilla y limo entre otros materiales procedentes del río de las Avenidas de Pachuca y también de los ríos intermitentes que bajan de las serranías de Guadalupe y Tolcayuca, así como de las elevaciones aisladas que ya se han mencionado. Tiene un área de 324.6 Km²

4.-*Planicie lacustre de Zumpango*. Esta rodeada por la planicie aluvial central, su altitud promedia los 2250m y un área de 210.2 Km². Ésta planicie, se originó principalmente, como resultado de los procesos exógenos de intemperismo y erosión hídrica sobre los materiales volcánicos que constituyen las serranías y elevaciones aisladas. Por ésta razón se dio una sedimentación en la depresión tectónica que contiene a la laguna de Zumpango, la cual redujo su volumen y dejó expuestos a la intemperie a dichos sedimentos convirtiéndose en una planicie lacustre (Aguayo et al, 1990).

La mayor antigüedad en cuanto a relieve, corresponde a las vertientes y divisorias de las serranías volcánicas, como se menciona se les atribuye una edad Terciaria, del Oligoceno, como lo es la serranía de Tolcayuca y del Mioceno y Plioceno la serranía de Guadalupe; mientras que las formas del relieve más joven, del Holoceno, están constituidas por las planicies aluvial y lacustre.

2.3-CLIMA

Las características climáticas de ésta región, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1981), están representadas por los siguientes tipos de climas: dos subhúmedos y uno semiárido (tabla 2.1).

Tabla 2.1 Clasificación de climas en la Subcuenca de Zumpango

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	TIPO DE CLIMA	NOTACIÓN	VARIANTE CLIMATICA
Km 27 Gran Canal	BS ₁ w(w) k'(i') g'	Seco semiárido, régimen de lluvias de verano, verano fresco largo, con poca oscilación térmica	El menos seco de los BS
Tizayuca	C (Wo) b (e) g	Templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano, verano fresco y largo oscilación extremosa, marcha de la temperatura tipo Ganges.	El más seco de los subhúmedos
Km 47 Gran Canal	C (W ₁) (w) c (i') g'	Templado subhúmedo con lluvias de verano, con verano fresco y largo, con poca oscilación térmica	Intermedio entre el más seco y el más húmedo de los subhúmedos

Los anteriores tipos de climas se establecen a partir de las características meteorológicas presentes en ésta zona, de las que resalta la precipitación pluvial, pues aporta mayor cantidad de agua hacia el poniente, cerca de la laguna de Zumpango (figura 2.2). Una probable explicación, es a causa de la combustión de partículas arrojadas a la atmósfera, como los aerosoles industriales, por ejemplo el hollín, compuesto de sulfatos, que procede quizá, de las zonas industriales de Zumpango y Tizayuca. Ésto origina que al concentrarse dichas partículas, logren actuar como núcleos de condensación con

gran afinidad al agua, formando gotas y creando lluvia (Erickson, 1991). Es posible que esto pueda presentarse en cualquier zona que tenga una fuente de núcleos de condensación, pero en la Subcuenca de Zumpango la precipitación es relevante, sobre las áreas circundantes de ambas poblaciones.

Si además se considera que las elevaciones que limitan a la misma no poseen gran altitud, se puede sugerir que el viento cálido de la planicie puede fluir y condensarse sobre el área de Zumpango y Tizayuca, originando principalmente precipitación de tipo convectivo, que es el tipo de precipitación más frecuente en áreas planas donde existen ciudades (Erickson, 1991). (figura 2.2).

Aún considerando la característica antes mencionada, el área de estudio se caracteriza por presentar periodos secos de larga duración, pues el 95% de la precipitación media anual ocurre entre los meses de junio a octubre (cuadro 2.2), es decir, siete meses secos contra cinco lluviosos. Esto es evidente al comparar los promedios de precipitación total anual de 617 mm/año con la evapotranspiración real anual de 523.1 mm/año, este último, como puede verse es un valor muy alto para una zona de baja precipitación anual, sobretodo en la parte sur, pues la precipitación sólo alcanza 560 mm/año (figura 2.2). Lo anterior indica, que esta subcuenca tiene déficit de humedad durante el año, por lo que es una de las razones más importantes de uso de agua residual y mezcla de agua residual con subterránea para riego.

Tabla 2.2 Estaciones meteorológicas en la Subcuenca de Zumpango con datos de temperatura, precipitación mensual y Evapotranspiración real anual (periodo 1975-1990)

MES	Km 27 Gran Canal			Km 47 Gran Canal			Tizayuca		
	T (°C)	P (mm)	EvR (mm)	T (°C)	P (mm)	EvR (mm)	T (°C)	P (mm)	EvR (mm)
ENERO	11.9	10.0	506.2	11.0	8.2	548.7	10.3	7.7	514.4
FEBRERO	13.2	1.9		13.0	16.0		12.1	16.3	
MARZO	15.1	7.0		14.8	25.2		15.3	21.3	
ABRIL	16.6	23.1		16.8	42.1		17.0	21.0	
MAYO	17.2	66.3		17.3	68.3		18.0	50.6	
JUNIO	17.6	82.6		17.5	90.7		17.9	113.8	
JULIO	16.6	112.8		17.0	107.5		17.0	100.6	
AGOSTO	16.5	104.8		17.4	136.8		16.5	86.9	
SEPTIEMBRE	16.1	91.5		16.6	108.1		16.2	104.4	
OCTUBRE	15.7	42.4		15.4	58.6		14.6	43.1	
NOVIEMBRE	13.7	17.4		13.8	17.3		12.8	22.8	
DICIEMBRE	12.0	3.8		11.7	9.6		11.5	11.0	
TOTAL	15.1	563.6		15.2	688.4		14.9	599.5	

T(°C)=temperatura media mensual en grados centígrados

P (mm)=precipitación mensual en milímetros

EvR (mm)= Evapotranspiración real anual en milímetros

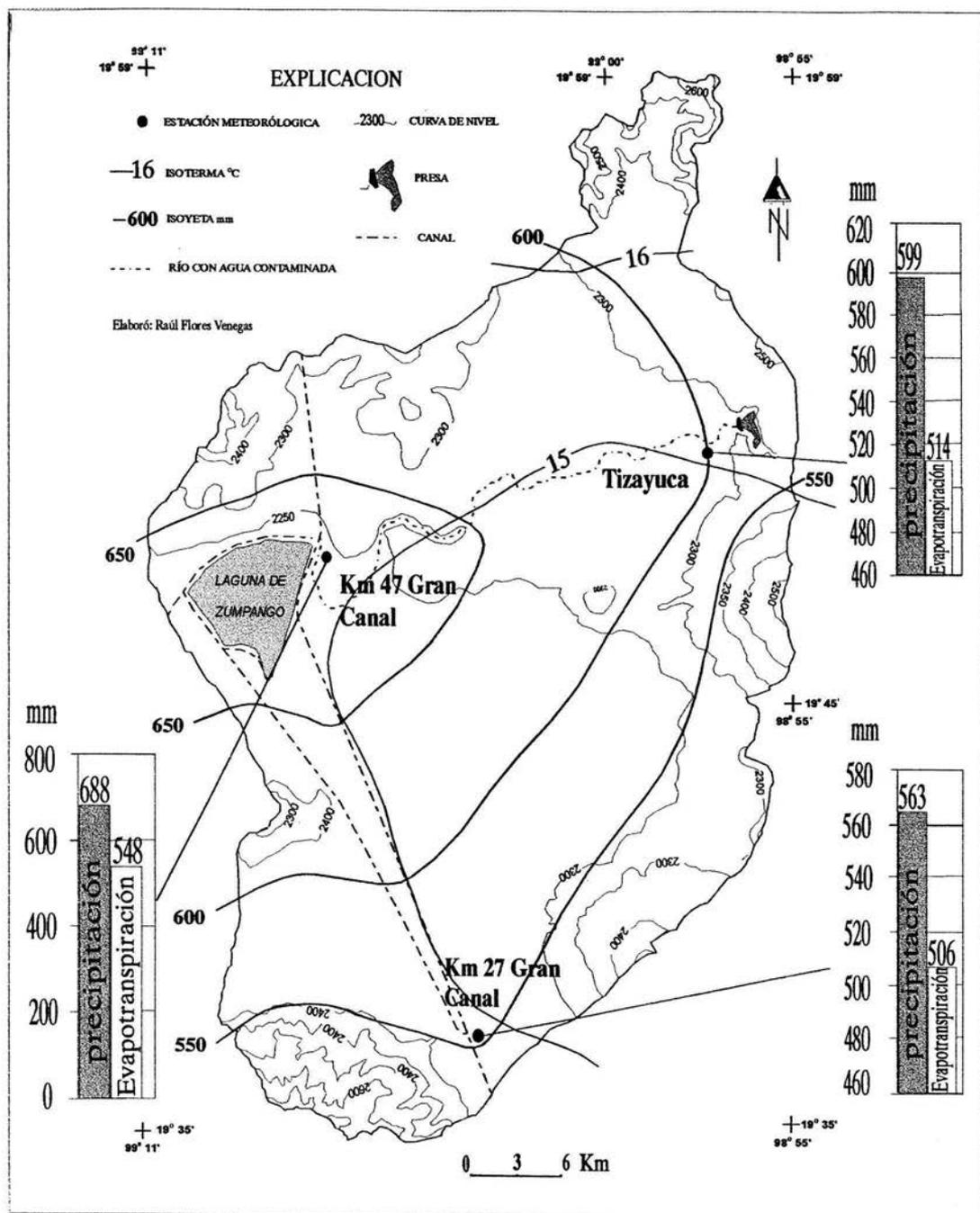


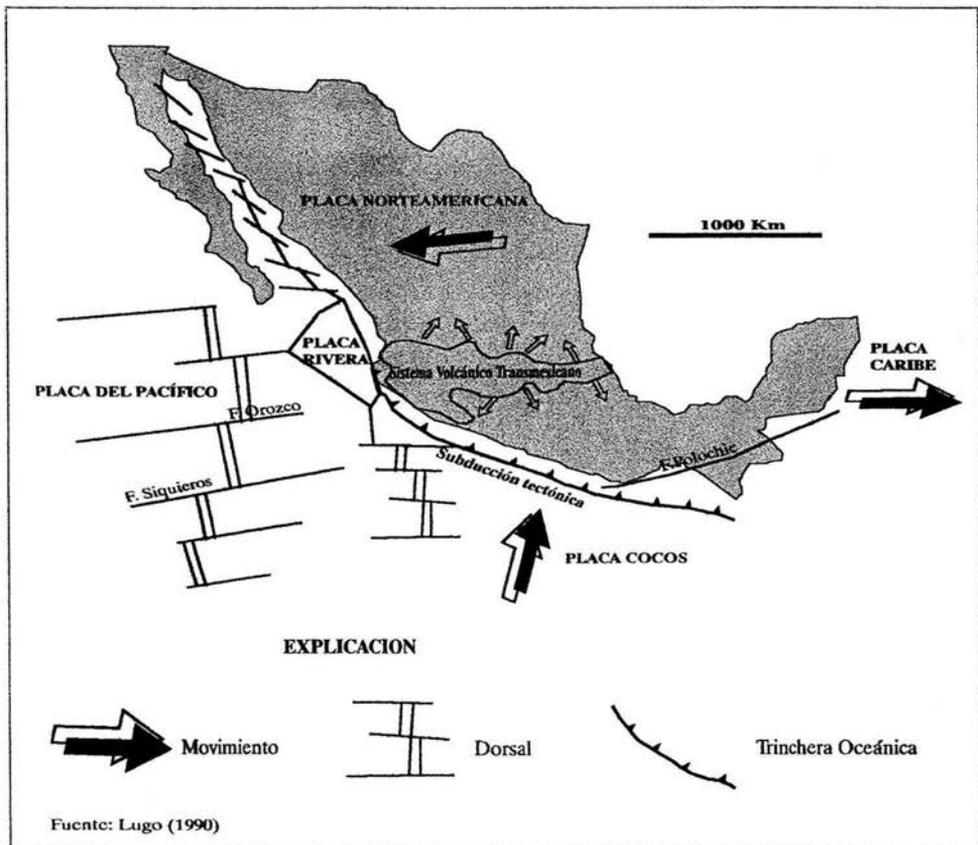
Figura 2.2 Mapa de distribución de lluvia y temperatura anual con gráficas comparativas de precipitación media anual y evapotranspiración real

2.4-GEOLOGÍA

Para entender el origen de la Subcuenca de Zumpango, es importante conocer como se originó la Cordillera Volcánica Transmexicana y la Cuenca de México, de los cuales forma parte.

La teoría más común sobre el origen de la Cordillera Volcánica transmexicana, la relaciona con el modelo de Arco Volcánico Intracontinental, debido principalmente a la subducción de la Placa de Cocos asimilada por la Placa continental (Mooser, 1972; Aguayo et al, 1990). Lugo (1990), indica con más detalle que esto es consecuencia del desplazamiento sucesivo de tres placas tectónicas: Cocos, Norteamericana y Rivera (figura 2.3).

Figura 2.3 Geodinámica regional y su relación con el Sistema Neovolcánico Transmexicano



La formación paulatina de la Cordillera Volcánica Transmexicana, se dio principalmente en el Terciario, siendo el Mioceno y Plioceno los periodos en que la actividad tectónica y volcánica predominó sobre los procesos exógenos niveladores sobre grandes superficies del actual continente Americano (Lugo, 1990; Vásquez y Jaimes, 1990, Aguayo et al, 1990).

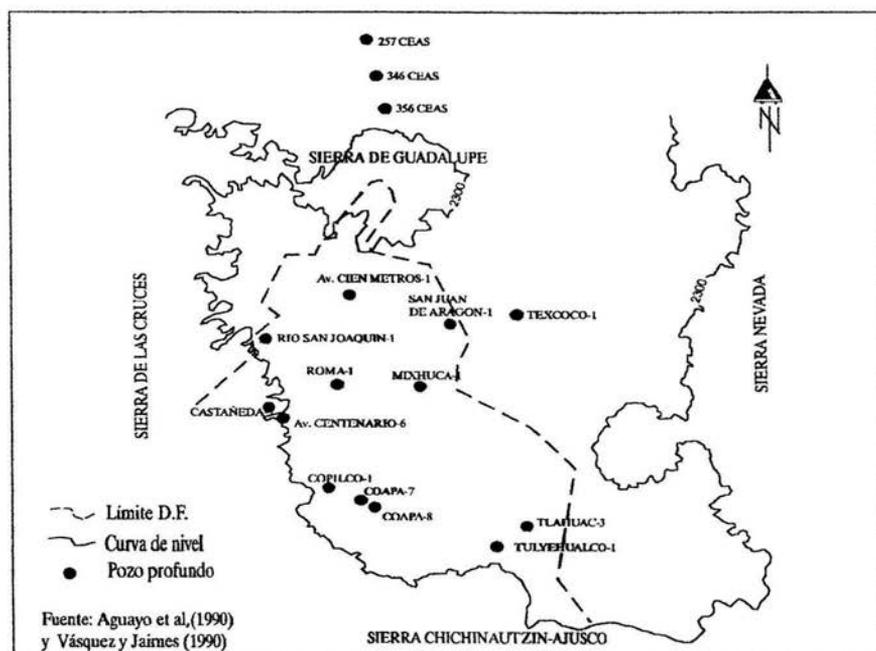
La Cuenca de México tiene una superficie de unos 9600 Km², presenta un contorno irregular, de forma alargada cuyo eje mayor está orientado de NE a SW, con una extensión de 148 Km (figura 2.1) Está limitada al norte, por las Sierras de Tezontlalpan y de Pachuca, al sur por la Sierra Chichinautzin-Ajusco, al este por las Sierras: Nevada, Río Frio y Calpulalpan y al oeste por de las sierras de las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo y Tepetzotlán.

Para comprender como es la estratigrafía de la Cuenca de México y de la Subcuenca de Zumpango, que es parte integral de la primera, Aguayo et al, (1990), han presentado información generada de la perforación de pozos profundos, pero es insuficiente, esto se debe a que la distribución de las unidades volcánicas y sedimentos es errática, tanto vertical como horizontalmente, por lo que la definición cronoestratigráfica de la columna geológica no es sencilla, además de que no existen parámetros paleontológicos en abundancia y distribución que ayuden a establecerla.

A partir de las investigaciones realizadas desde los años sesenta, se tiene lo siguiente: Fries (1960) elaboró la estratigrafía generalizada para la Cuenca de México desde el Paleoceno (tabla 2.3).

Posteriormente, Schaepler (1968), reporta que las rocas marinas del Cretácico forman el basamento de la secuencia volcánica y sedimentaria continental del Terciario y Cuaternario, que había propuesto Fries (1960). Mooser (1975), apoyado en datos estratigráficos de trece pozos profundos, distribuidos en la Cuenca de México, cinco de PEMEX: Texcoco 1 a 2065 m de profundidad, Copilco 1 a 2258 m, Tulyehualco 1 a 3000 m, Mixhuca a 2452 m, Roma 1 a 3200 m. y ocho del Departamento del Distrito Federal: Av. Cien metros 1 a 2233 m, San Juan de Aragón 2 a 2232 m, Tlahuac 3 a 2241 m, Río San Joaquín 4 a 2267 m, La Castañeda 5 a 2317 m, Av. Centenario 6 a 2350 m, Coapa 7 a 2230 m y Coapa 8 a 2234 m de profundidad respectivamente, confirman la secuencia de Fries (1960) y de Schlaepfer (1968) (tabla 2.3 y figura 2.4).

Figura 2.4 Localización de pozos profundos cuya información litológica ha sido usada para elaborar la estratigrafía generalizada de la Cuenca de México



ERA	PERIODO	SUBPERIODO	MILLONES DE AÑOS	CUENCA DE MEXICO Y AREAS ADYACENTES FRIES 1960	CUENCA DE MEXICO SCHLAEPFER 1968	CUENCA DE MEXICO MOOSER 1975		
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	0.01	Lacustres Chichinautzin <i>Popecatpet</i>	Chichinautzin	Serie fluvial aluvial		
		PLEISTOCENO		Formación iztacchuatl	Riodacita popo		Serie Chichinautzin	
				Formación tlaloc	Aluvi6n			
				Formaci6n el pino	Lacustres			
	TERCIARIO	PLIOCENO	1.6	Formaci6n Llano grande	Formaci6n Tarango	Formaci6n tarango		
				Rocas volc6nicas m6ficas	Riolita las cruces		Formaci6n Zempola	Andesitas
				Formaci6n Otom6	Dep6sitos volc6nicos		Las cruces	
		MIOCENO	5.3	Formaci6n Tepoztl6n	Rocas volc6nicas	Tepoztl6n	Xochitepec	
				Riolita Tilizapota	Grupo Fachuca			
				Grupo Balsas				
	PALEOCENO	57.6	Granito Colotepec			Granito Colotepec ?		
MESOZOICO	CRETACICO	MAASTRICHIANO	74.5			Formaci6n Mexcala		
		CAMPANIANO	84.0					
		SANTONIANO	87.5					
		CONACIANO	88.0					
		TURONIANO	91.0					
		CENOMANIANO					Formaci6n Cuautla	

nota: el rayado vertical indica falta de dep6sito o erosi6n

Fuente: Fries (1960), Schlaepfer (1968) y Mooser (1975)

Tabla 2.3 Correlaci6n estratigr6fica generalizada para la cuenca de M6xico

De acuerdo con Mooser (1975), la secuencia estratigráfica generalizada de la Cuenca de México, consiste principalmente de rocas volcánicas, depósitos aluviales, fluviales y lacustres del Terciario y Cuaternario, que subyacen discordantemente a rocas calcáreas y calcáreo-arcillosas del Cretácico (tabla 2.3).

A raíz del sismo de 1985 en la Ciudad de México, Pérez Cruz (1988), llevó a cabo un estudio sismológico de reflexión con apoyo de los pozos: Copilco 1, Tulyehualco 1, Mixhuca y Roma 1. En éste trabajo se levantaron 26 líneas con longitudes variables entre 2 y 28 Km, definiéndose 4 reflectores cuya profundidad, varía de acuerdo con el lugar en el interior de la zona urbana. Del más profundo al más somero se registró lo siguiente: 1) unidad de rocas calcáreas basamentales, 2) unidad volcánica inferior, constituida por basalto, andesitas, brechas y tobas, 3) unidad volcánica superior constituida por basalto, aglomerado, tobas y brechas y 4) unidad de depósitos aluvio-lacustres. Los resultados confirmaron una vez más, la secuencia propuesta por Fries (1960), Schlaepfer (1968) y Mooser (1975).

Finalmente, respecto a la edad de la Cuenca de México, Demant y Robin (1975), indican que la Cordillera Volcánica Transmexicana es de edad Terciaria, del Mioceno, mientras que la Cuenca de México es de Pleistoceno-Holoceno.

Lo antes expuesto, muestra que el vulcanismo que origino a la Cordillera Volcánica Transmexicana y a la Cuenca de México es el mismo de la Subcuenca de Zumpango (figura 2.5)

De acuerdo a Huizar et al, (2003), de la formación litológica más antigua a la mas reciente, la estratigrafía generalizada de la Subcuenca de Zumpango, es la siguiente:

La Formación el Doctor (Kid), del Cretácico, es un estrato de aproximadamente 400m de una caliza de plataforma (figura 2.6), que expuesto a movimientos tectónicos adquirió una estructura de anticlinales y sinclinales altamente fracturados.

Sobre la Formación el Doctor, también del Cretácico, se encuentra una capa de unos 200m, se trata de una secuencia de lutita calcárea, arenisca y limonita que integran la Formación Mexcala-Méndez (Ksm).

La unidad (Tmrd), del Mioceno temprano, se compone de flujos volcánicos de riolita y dacita, ésta aflora en la sierra de Guadalupe. Hacia la parte sureste de esta subcuenca. Se le ha estimado un espesor de 500m.

Del Mioceno temprano al Plioceno tardío, la unidad (Tmra) se originó por flujos de lava de composición riolítica y andesítica, en algunas áreas formo domos que se localizan en las sierras de Guadalupe, cerro Xalpan y al norte de Tizayuca. Se le ha estimado un espesor de 500m.

La unidad (Tpp) del Plioceno, se compone de una secuencia de aglomerado, brecha volcánica, toba pumicitica, grava y arenisca, conjuntamente con un espesor de 400m. Esta unidad aflora en la sierra de Tolcayuca, al norte de Zumpango de Ocampo.

Integrada por grava y lahares, la Formación Tarango (Tpt), se originó en el Plio-Pleistoceno. En realidad también presenta depósitos epiclásticos formados principalmente por caliza lacustre, y diatomeas que se ubican en áreas de piedemonte. Su espesor es de unos 200m en el área de Zumpango de Ocampo.

La unidad (Qb) del Cuaternario, se compone de flujos basálticos y andesíticos intercalados entre sí, con material piroclástico como brecha volcánica, toba y escoria de caída. Esta formación presenta fracturas, vesículas y cavernas, además existen integraciones de lapilli y ceniza indicando vulcanismo explosivo. Tiene espesores variables que exceden los 500m, como en el área de Tizayuca donde alcanza 800m.

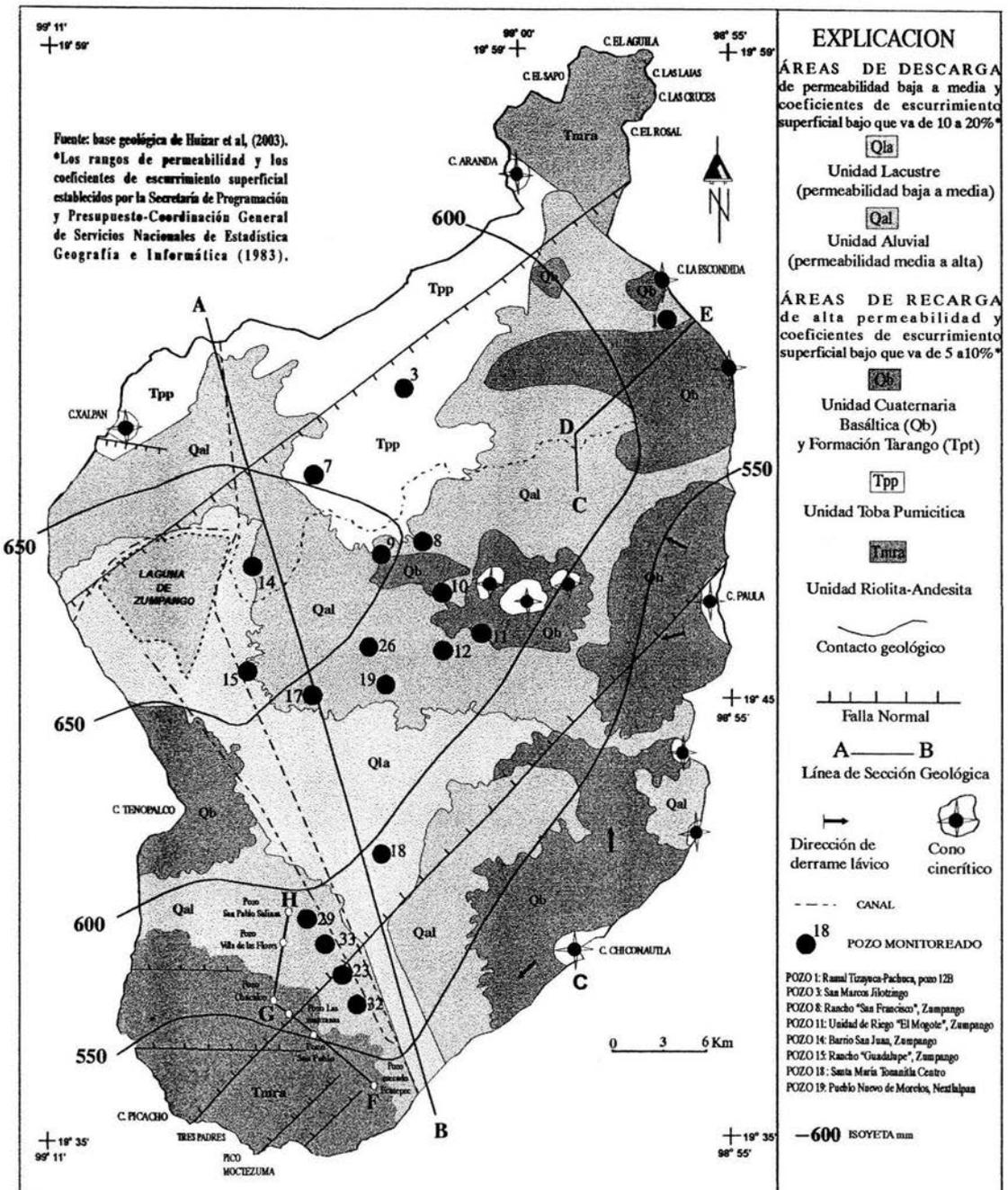


Figura 2.5 Mapa Geológico que muestra la distribución de la lluvia y la localización de pozos de monitoreo.

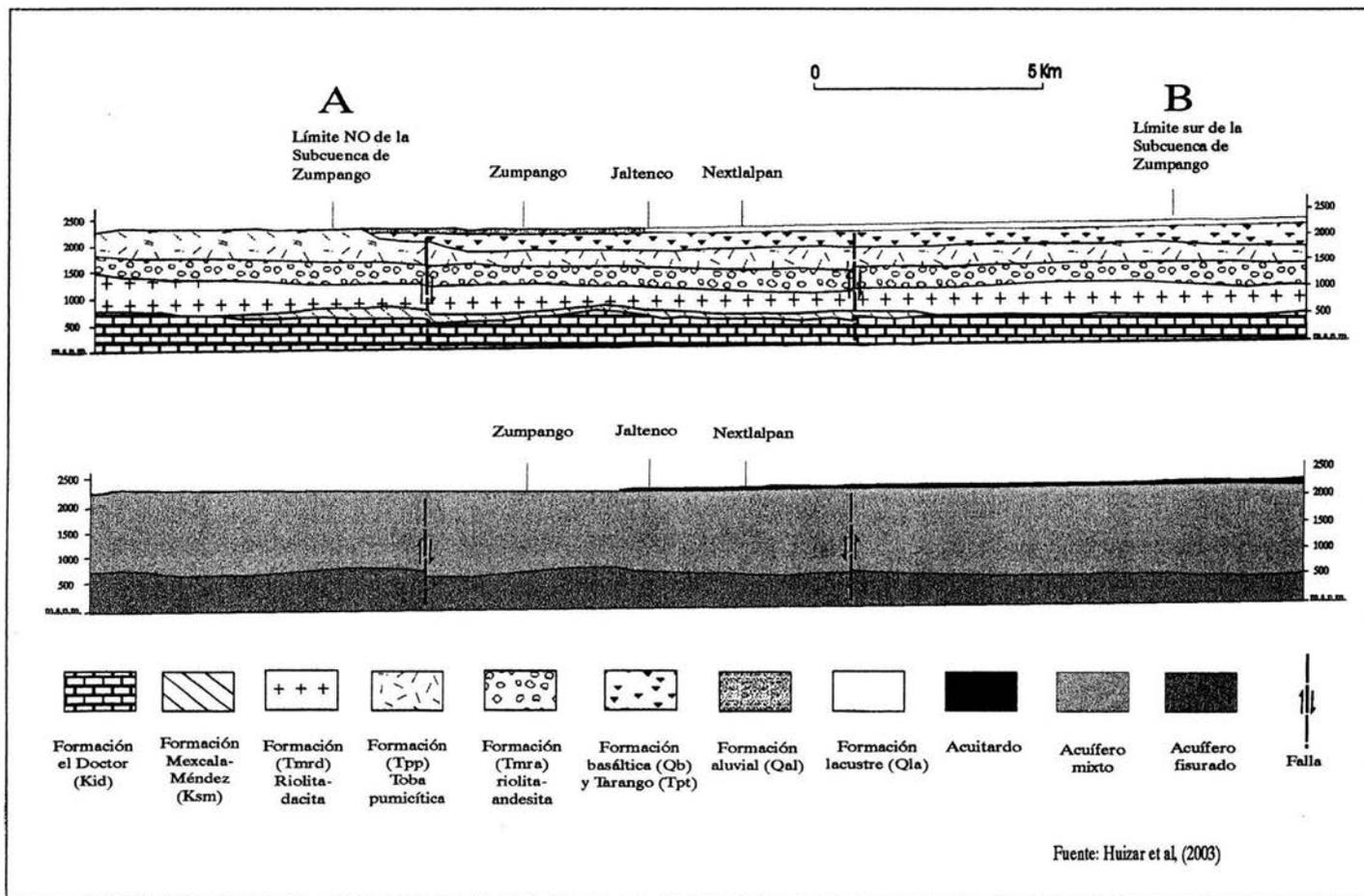


Figura 2.6 Sección geológica A-B (ver figura 2.5 para su localización)

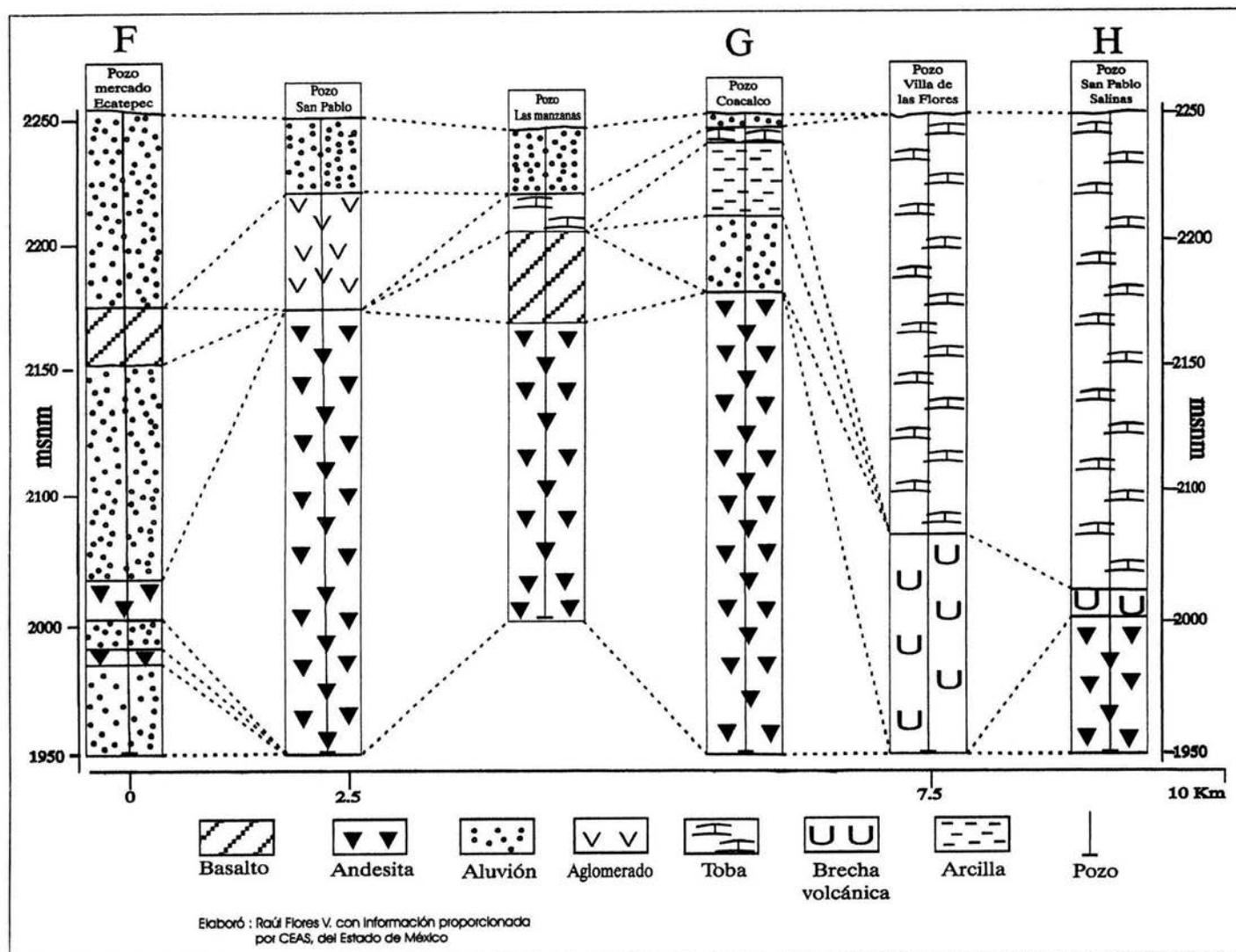


Figura 2.8 Correlaci3n estratigr3fica F-G-H (ver figura 2.5 para su localizaci3n)

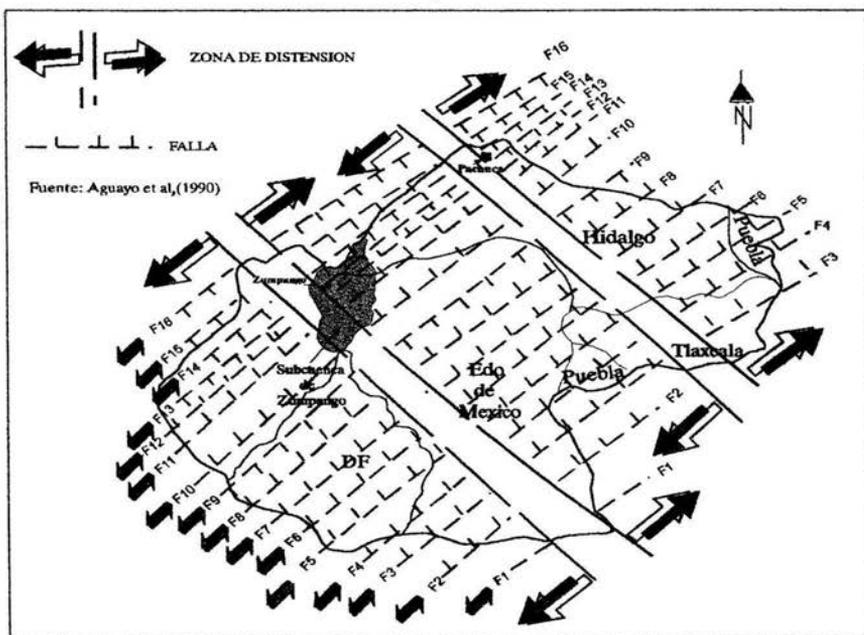
Los depósitos aluviales (Qal), están interestratificados y básicamente se componen de conglomerado, grava, arena, limo, arcilla y toba. Hacia el centro de la planicie están interdigitados con flujos de lava y capas de arena fina, arcilla y brecha volcánica. En áreas de piedemonte, donde termina la planicie, los flujos de lava se interdigitan con aluvión (figura 2.7). Su espesor es diverso alcanzando hasta 400m. También pueden interestratificarse como lo muestra la columna estratigráfica del pozo mercado Ecatepec (figura 2.8).

Por último, la unidad lacustre (Qla) cubre una gran área al sur de Zumpango (figura 2.5 y 2.6) y se interdigita con los depósitos aluviales. Éstas condiciones, se presentan, con mucha semejanza, en figura 2.7, pues en la parte más superficial de ella, se observa, por ejemplo, un depósito de arcilla, probablemente de origen fluvial, en contacto con arenas y con aluvión. Principalmente se compone de una secuencia de minerales cristalinos y amorfos, así como material arcilloso (cuarzo, vidrio y tobas) y arena. Además se presenta también materia orgánica, caparazones de ostrácodos, diatomeas y pequeñas cantidades de arcilla principalmente montmorillonita e illita. Su espesor varía entre 2 y 200m. Ocasionalmente se presentan flujos de lava y arena fluvial en contacto con esta formación.

De acuerdo con Aguayo et al, (1990), existen tres sectores en la Cuenca de México que afectan estructuralmente a la Subcuenca de Zumpango, pues existen sistemas de fallas que delimitan a bloques distensivos, creando grabens. Uno de éstos sectores, corresponde a la zona comprendida entre las fallas distensivas número 12 y 13 (figura 2.9), las cuales quedan enmarcadas en ésta subcuenca (figura 2.5 y 2.6). Dichas fallas, inciden en la Sierra de las Cruces, hacia el SW y continúan hacia el NE por las poblaciones de Tizayuca y Pachuquilla, Hidalgo. Por ésta razón, la zona distensiva orientada de NW a SE forma el lago de Zumpango.

Los sistemas de fallas: F-1 a F-16 (figura 2.9), delimitan a quince bloques distensivos escalonados, con dos depresiones mayores -grabens- paralelas entre sí. Una de éstas depresiones corresponde a los límites de las fallas 8 y 9; la otra depresión corresponde al Valle de Tizayuca-Pachuca y está limitado por las fallas 12 y 13 de la misma figura. La separación promedio entre fallas es de unos 6 Km y se manifiestan afectando a los sistemas norte-sur y este-oeste, así como a las estructuras NO-SE del Mioceno y a los estratos del Pliocuaternario (figura 2.9).

Figura 2.9 Modelo tectónico-estructural de la Cuenca de México.



Con lo antes expuesto, se puede opinar que la importancia de considerar las unidades litoestratigráficas y a la tectónica, es desde el punto de vista de las estructuras que se ha originado a partir de ellas y de cómo esas estructuras puede originar actividades económicas a partir del uso de recursos como el agua y el suelo. Esto es importante desde el punto de vista de aprovechamiento del agua, pues en base a características físicas como porosidad y permeabilidad, las rocas pueden actuar como acuíferos, almacenando agua. Por ejemplo, en ésta subcuenca, se puede indicar que a partir de la dinámica en los sistemas de fallas distensivas 12 y 13 se formó un graben, éste originó una depresión y en ella se formó la laguna de Zumpango, donde se acumularon sedimentos. Posteriormente, con la desecación paulatina de la misma, se abrieron áreas agrícolas, generándose actividades económicas como la agricultura de riego y la ganadería, principalmente en lugares cercanos como Zumpango y Jaltenco. Con ésto se puede establecer una relación estrecha entre hombre y medio natural, en donde el hombre es el principal utilitario. Por último, la tectónica es también importante, por que influye en las características físicas del agua subterránea, por ejemplo en su temperatura; como se detallará en el capítulo cinco.

CAPÍTULO 3 EL RECURSO SUELO

3.1-COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

las características litológicas de esta subcuenca son importantes en la formación del suelo, como se ve en la figura 2.5, los derrames de lava y piroclastos originaron formaciones litológicas muy extendidas en toda ésta subcuenca, por lo que el origen de los minerales, en las rocas volcánicas principales: basálto, andesita, riolita y toba pumicítica, ha dado origen a la composición mineral de los suelos cuyo proceso de formación se da principalmente a partir de la cristalización del magma, que depende de la concentración de gases en relación a la temperatura de la misma. Si se verifica una rápida desgasificación dentro de la cristalización de la masa fundida, a causa de la elevada temperatura a la que fluyen los derrames lávicos, se forma un grupo de minerales denominados pirogenéticos. Si por el contrario, la masa fundida se desgasifica lentamente, se crean minerales portadores de oxhidrúlicos, denominados minerales hidratogenéticos (Huang, 1981). Los minerales principales de cada grupo se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Minerales pirogenéticos e hidratogenéticos derivados de una masa fundida de rocas

PIROGENETICOS	HIDRATOGENETICOS
Toda la plagioclasa rica en calcio	Cuarzo
Olivino	Ortoclasa
Piroxeno	Toda la plagioclasa rica en sodio
Pirita	Todos los anfíboles
	Todas las micas

Fuente: Huang (1981)

Lo anterior es importante en relación a la formación de suelos, por que los minerales que cristalizan primero en el magma reaccionarán más rápidamente con el agua en la meteorización y erosión. En otras palabras, los minerales que se forman primero, se intemperizan y erosionan primero, formando suelos más rápido (Huang, 1981). Por esta razón, Bloom (1974), indica que la plagioclasa cálcica cristaliza y meteoriza más fácilmente que la sódica y esta más rápido que el feldespato potásico (ortoclasa) y finalmente el cuarzo, pues es el más resistente. Con ésta información, se puede opinar que a medida que se enfría el magma, la relación entre temperatura de formación y facilidad de meteorización se mantiene.

La similitud mineralógica entre suelos y rocas de esta subcuenca se da al actuar los procesos de intemperismo: fragmentación, transporte y acumulación sobre ellas, pues ceden sus minerales a los suelos formados y en formación, por ejemplo Bloom (1974), indica que el ácido carbónico de la lluvia ataca a los silicatos, particularmente a los feldespatos, dando tres productos finales: 1.- un material arcilloso, 2.- sílice precipitado, básicamente en estado coloidal y 3.-un carbonato o bicarbonato principalmente de K, Na ó Ca en solución. Estos productos son fundamentales en la composición mineralógica de un suelo. Por esta razón, los suelos de la Subcuenca de Zumpango son suelos transportados, es decir, los materiales aluviales tienen un origen en el intemperismo y erosión de los materiales volcánicos y han dado origen principalmente a la formación de suelos de tipo Feozem y Planosol. Los lacustres, han dado origen a suelos como el Solonchak, Vertisol y Cambisol localizados hacia el centro de ésta subcuenca. Por último, los suelos residuales son; Litosol y Regosol, básicamente en las áreas montañosas, donde el material *in situ* a dado origen a éstos suelos con escaso desarrollo.

Si los elementos más comunes de la corteza terrestre son: O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K y Mg, es decir, ocho elementos químicos, entonces se podría esperar encontrar un máximo de ocho minerales en las rocas volcánicas de esta subcuenca, sin embargo, el número real de minerales es menor -tres en promedio- debido a que algunos se reemplazan entre sí, ion por ion, por ejemplo el K^+ por el Na^+ en los feldespatos alcalinos, el Ca^{2+} y el Na^+ en la plagioclasa y el Mg^{2+} y Fe^{3+} en los silicatos ferromagnesianos. Por esta razón los materiales aluviales y lacustres, extendidos ampliamente en áreas de planicie y piedemonte (figura 2.5), que se han derivado del basalto, andesita, riolita y toba, contendrán O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K y Mg. Esto en parte se confirma en la tabla anexa de resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002), ahí se ve que en algunos suelos del municipio de Nextlalpan -(Solonchak, Cambisol, Vertisol y Solonetz- predominan: minerales de SiO_2 , Ca, Mg, Na, y K .

Huang (1981), indica que el SO_4^{2-} y Cl^- son escasos en las rocas volcánicas de la corteza terrestre, esto implica que los suelos que se formen de ellas contendrán bajas cantidades, sin embargo, Girón (2002) reporta concentración alta de sulfato y cloruro en el suelo Solonchak de la región central de esta subcuenca, tanto en temporada de lluvias como en seca, sugiriendo que su fuente es el agua residual. Quizá, la unidad lacustre que se muestran en figura 2.5, integrada por sedimentos formados en ambiente húmedo, con precipitación química de sales y con la desecación paulatina de la laguna de Zumpango, dieron origen a carbonatos como $CaCO_3$, dando así un aporte significativo de bicarbonatos (HCO_3^-) y calcio a los suelos, principalmente al Solonchak, Cambisol y Vertisol, de la región central (figura 2.5), pues en ellos se reportan altas concentraciones (tabla anexa de resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002).

3.2-TIPOS DE SUELO

La importancia de considerar las características físicas y químicas de las unidades de suelo en la Subcuenca de Zumpango, recae principalmente en la capacidad que tienen para retener sustancias en estado iónico, que están disueltas en agua y que son consideradas como contaminantes que en ellos se vierten. Es por esto, que el riego con agua residual y sus posibles efectos, están principalmente relacionados con el hombre y sus actividades económicas.

En ésta subcuenca, de acuerdo con la clasificación FAO-UNESCO, se presentan siete tipos de suelo (figura 3.1). Algunas de sus características físicas y químicas, son reportadas por CETENAL (1982), Téllez (1985) y Favela (1986) de las que se puede resaltar lo siguiente:

1.-El suelo Feozem (H), incluye la mayor superficie en ésta subcuenca, pues tiene 480.6 Km^2 que representan el 62.9 % del total. Se presenta, principalmente en las zonas norte, noreste y sureste. En términos generales, el material del que procede es aluvión. Éste suelo tiene profundidades de 100 cm o más, en las áreas de planicie y un promedio de 30 cm en las áreas de montaña. Presenta además, buen drenaje interno y tiene texturas principalmente arenosas y arcillosas, permeabilidades moderadas a altas en arena y bajas en arcilla. Con frecuencia se encuentra tepetate (suelo endurecido y fracturado de color pardo) a 40 cm de profundidad.

2.-El Cambisol (B), abarca una extensión de 46.6 Km^2 o bien el 6.1 % del total y está distribuido en algunas zonas de piedemonte de las elevaciones que circundan a la planicie. Presenta profundidades mayores a 100 cm, tiene textura arenosa y franco-arenosa, con permeabilidad moderada a alta y con drenaje interno muy franco.

3 y 4.-El Litosol (Y) y Planosol (W), de las partes más altas de las elevaciones de ésta subcuenca, como el Cerro Xalpan, Sierra de Guadalupe y Chiconautla entre otras, suman una extensión de 32.2 Km^2 que representan el 4.2% del área total. Presentan profundidades promedio de 30 cm, de textura

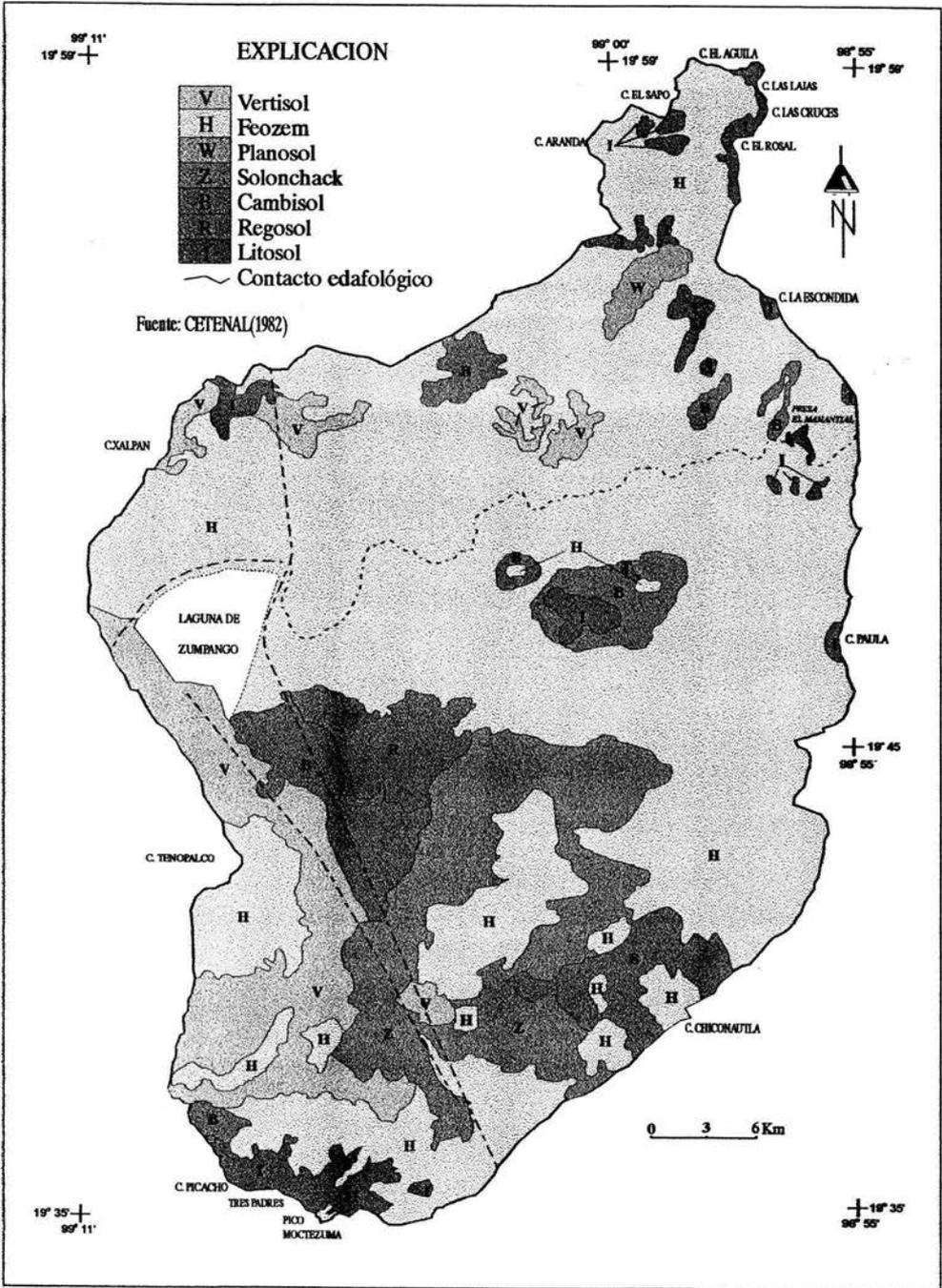


Figura 3.1 Mapa edafológico

franco-arcillo-arenosa, con permeabilidad moderada a alta y con buen drenaje interno del perfil.

5.-El Regosol (R), se extiende hacia la región oeste, cerca de la laguna de Zumpango, incluye una superficie de 27.6 Km² y constituye el 3.6 % del total. Este suelo, tiene profundidades mayores a 100 cm, predominan las texturas arenosas, con permeabilidad moderada y con drenaje interno del perfil de buen drenaje

Aunque no se determinó capacidad de intercambio catiónico para los suelos antes descritos, la información analizada indica, que podrían tener bajo poder de retención de iones disueltos, pues los suelos donde predomina la arena, son frecuentemente muy permeables como lo menciona Cepéda (1991). En consecuencia deberán retener pocas sustancias en estado iónico que eventualmente podrían llegar a la zona saturada. Esto es importante, puesto que dichos suelos se localizan en zona de planicie donde se riega con agua residual del Gran Canal de Desagüe y del Río de las Avenidas de Pachuca. Por lo anterior, cabe la posibilidad de infiltración de agua con sustancias contaminantes que pudieran alterar la calidad química del agua freática. Por supuesto, se debe exceptuar al Litosol que está en zona de montaña.

6.-Otro tipo de suelo que incluye un área importante en la Subcuenca de Zumpango, es el Solonchak (Z), que se extiende en las regiones centrales y del sur, ocupa una superficie de 93.5 Km² y constituye el 12.2 % del área total. Este suelo tiene origen lacustre. Presenta profundidades mayores a 100 cm y textura principalmente franca y franco-arcillosa, con permeabilidad moderada a lenta y con drenaje interno que va de moderadamente drenado a deficiente.

7.-Finalmente, el suelo Vertisol (V), abarca un área de 69.9 Km² equivalentes al 9.2 % de toda el área, ocupa la mayor parte del límite suroeste del área de estudio. Aunque se encuentra distribuido en áreas pequeñas de la misma, presenta profundidades mayores a 100 cm, de textura franca y arcillosa con permeabilidad moderada a baja y con drenaje interno deficiente

En contraste con los primeros cinco tipos de suelo, es probable que el Solonchak y el Vertisol, tengan una importante capacidad de retención de cationes, debido a que tienen horizontes arcillosos. Según Cepéda (1991), ésta propiedad en los suelos, es un factor fundamental en la retención de sustancias iónicas, que limita en gran medida, la migración de sustancias hacia la zona saturada. Cabe mencionar que el Vertisol y el Solonchak son los suelos que se riegan más intensamente con agua residual. Por ésta razón, es importante considerar su superficie dentro del total de la Subcuenca de Zumpango.

3.3-CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Se origina principalmente por una asociación arcillo-húmica del suelo, con frecuencia ambos componentes poseen un diametro promedio de 0.002 mm Gracia Fernández y García del Caz (1982), Rodríguez Suppo (1982) y León (1984). Posiblemente, dicha asociación está presente en los suelos: Vertisol, Solonchak, Solonetz, Cambisol y Feozem de ésta subcuenca, pues en ellos, Girón (2002), CETENAL (1982), Téllez (1985) y Favela (1986) reportan horizontes arcillosos. Como se estableció antes, las arcillas se originan principalmente por intemperismo y erosión de minerales silicatados en formaciones volcánicas.

En los suelos de ésta subcuenca, posiblemente predominan mezclas arcillosas de tipo illita-vermiculita y montmorillonita, que predominan en zonas de climas húmedos a secos, quizá la montmorillonita sea la más numerosa, pues de acuerdo con Rodríguez Suppo (1982), Velde (1995) y Raiswell et al, (1983), es la más común en suelos donde no existe lavado excesivo por lluvia, como el Feozem presente en la Subcuenca de Zumpango. Ambas arcillas se derivan de reacciones químicas frecuentes en la meteorización de las rocas, por ejemplo, los posibles minerales silicatados en ésta subcuenca

como la plagioclasa cálcica y sódica, ortoclasa y silicatos ferromagnesianos al ser atacados por el agua de lluvia que contiene ácidos: carbónico, nítrico y sulfúrico, entre otros, ceden iones H^+ , así el proceso de meteorización se acelera, pues cuanto mayor es la concentración de H^+ , más rápido es el ataque a los silicatos y más abundante es el material disuelto en solución acuosa Raiswell et al, (1983). Un ejemplo de dicha meteorización se muestra en la siguiente reacción, en la que Bloom (1974) establece que la plagioclasa sódica forma montmorillonita:

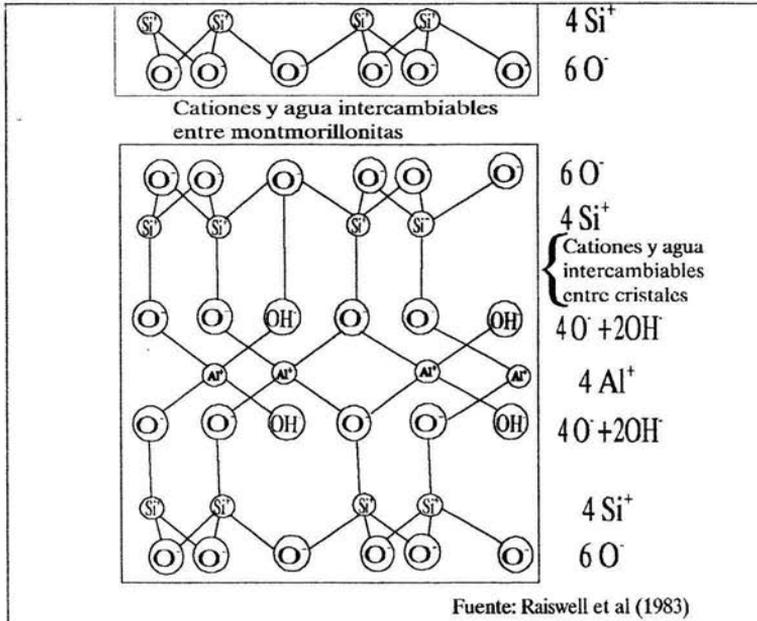
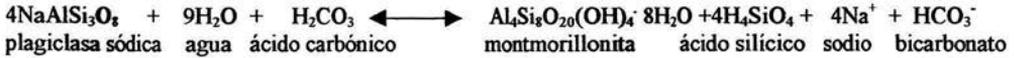


Figura 3.2 Estructura de una montmorillonita. Las montmorillonitas no presentan puentes de hidrógeno, por que los oxígenos en la base de su cristal de silicio, está revestida de otra capa de oxígenos, en vez de hidróxilos. Esto origina que el átomo de hidrógeno del ion hidróxilo no forme dicho puente, favoreciendo a que las montmorillonitas no se mantengan estrechamente unidas, permitiendo que la solución del suelo pueda penetrar entre dos de ellas dando como resultado que el espacio entre ambas, se dilate y se contraiga al secarse.

La montmorillonita presenta una estructura basada en un cristal de alúmina, revestido en ambos lados por una capa de cuatro oxígenos y dos OH^- posicionados entre dos cristales de silice, cada uno en su lado externo con seis oxígenos. Por esta razón, la montmorillonita posee un enlace iónico que permite el ingreso de agua e iones en solución como P^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y K^+ entre otros, que incrementan el intercambio iónico (figura 3.2)

La información anterior es importante, por que, si es la montmorillonita quien predomina en el complejo arcillo-húmico, en éste último las áreas expansibles de la arcilla son ocupadas por el humus, que se encuentra adherido directamente al plano cristalino electropositivo de la alúmina y al de silice, frecuentemente por medio de un puente de calcio (figura 3.3).

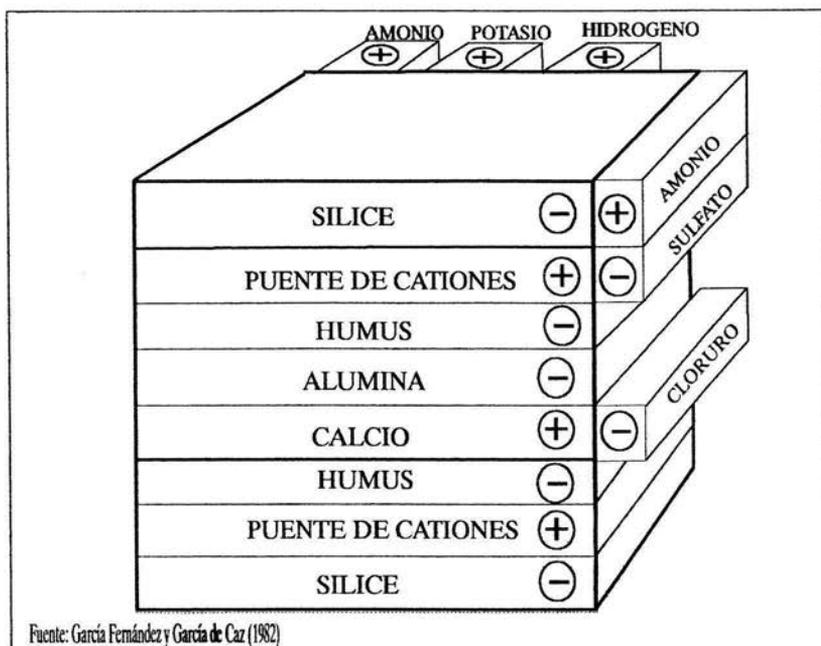


Figura 3.3 Representación esquemática del complejo arcillo-húmico del suelo. La forma de caja rectangular es sólo para ejemplificar, pues tiene forma irregular. Los cristales de silicio y aluminio son en realidad electropositivos, pero a causa de las capas de oxígeno e hidróxilos en su superficie, adquieren un carácter electronegativo -por eso se han representado así en el esquema- logrando atraer cationes de la solución del suelo como calcio y potasio, los cuales se acomodan en capas. La posterior expansión de las montmorillonitas causada por el ingreso de agua, permite que las partículas de humus ingresen y se asocien a las láminas de silicio y aluminio. Esta asociación es causada por las capas de cationes (puente catiónico) formando así el complejo absorbente. La electronegatividad del humus le da una alta capacidad para retener e intercambiar cationes con la solución del suelo y con las raíces de las plantas. Se han ejemplificado iones retenidos al exterior del complejo, como sulfato, amonio, y cloruro entre otros que son frecuentes en el agua residual usada en el riego.

Sin embargo, la asociación arcillo-húmica no siempre existe, pues de acuerdo con León (1984) y Velasco (1983), donde existen horizontes arcillosos -de cualquier tipo de arcilla- sin contacto con humus, se puede presentar el proceso llamado fijación, es decir, que los cationes intercambiables pasan a cationes fijos, ya que ingresan al interior de las zonas expansibles de las arcillas, quedando entre sus planos cristalinos. Esto ocurre principalmente con el K^+ y NH_4^+ y en menor con el Mg^{2+} y Na^+ . Sin embargo, tal fijación no es permanente, pues puede presentarse el intercambio entre arcilla y solución del suelo, pero sucede a largo plazo, dependiendo del grado de lixiviación de la zona. León (1984), señala un promedio de cuatro años para liberar un cation K^+ luego de su fijación en zonas de clima seco y de dos a tres en un clima húmedo. Con éstos tiempos, se puede opinar, que la solución del suelo difícilmente los intercambiará, también difícil para las raíces de las plantas utilizarlos. Quizá ésta sea una de las razones que explican las escasas concentraciones de K^+ en suelos de ésta subcuenca (tabla anexa de resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002)), lo que en parte indicaría el poder de retención del suelo, pues tal concentración es también escasa en los datos de agua subterránea; como se detallará más adelante.

Con la información antes descrita, se puede deducir, que las arcillas existentes en la Subcuenca de Zumpango, son en gran medida las que controlan el ingreso de sustancias químicas en estado iónico que pudieran alterar la calidad química del agua subterránea.

Ya visto el papel de las arcillas en el intercambio iónico del suelo, cabe analizar ahora, el origen del humus a partir de la materia orgánica y sus características físico-químicas principales, sobretodo cuando existe la posibilidad de que realmente se presente en el complejo arcillo-húmico en los suelos de ésta subcuenca.

En los estudios de suelos: CETENAL (1982), Tellez (1985) y Favela (1986) no se determino materia orgánica, sin embargo se puede tener una idea de cuanta existe a partir del estudio de Girón (2002), que reporta menos de 5% en los suelos: Solonchak, Cambisol, Vertisol y Solonetz (tabla anexa de resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002)) del municipio de Nextlalpan, correspondiente a la región central de esta subcuenca. El Vertisol es quien la contiene en mayor porcentaje: 4.7%, pues es el suelo agrícola más explotado, en él, muchas raíces, tallos y plantas de los cultivos quedan sepultados con el arado, además, los vertidos de agua residual le incorporan un porcentaje adicional. Como es de esperarse, los mayores porcentajes de materia orgánica en los suelos de ésta subcuenca, se presentan a menos de 30 cm de profundidad, es decir, en el horizonte más superficial de cada uno de ellos, lo cual frecuentemente está relacionado con horizontes arcillosos (tabla anexa de resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002)).

El porcentaje de materia orgánica, en los suelos: Vertisol, Cambisol, Solonchak y Solonetz, disminuye con la sequía y aumenta con las lluvias, (tabla anexa de resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002)). Una posible explicación, es, que aún cuando se riega con agua residual y ésta contiene materia orgánica en descomposición, parece ser, que en sequía es degradada por los microorganismos que son más activos con la temperatura alta, generando una mineralización y luego una humificación relativamente rápida. León (1984), dice que del total de las aportaciones orgánicas a un suelo, en climas húmedos y subhúmedos, un 70 % se mineraliza rápidamente, en 1 o 2 años, pues pese a que existe riego, los microorganismos pueden consumirla rápidamente. El 30% restante, se transforma en humus, incorporandose al complejo arcillo-húmico. Para la humificación, se requiere de un coeficiente en la relación carbono-nitrógeno (C/N) de ± 10 , es decir, que por cada gramo de nitrógeno, existan 10 de carbono (Rodríguez Suppo, 1982). Ésta característica, posiblemente se presenta en los suelos: Vertisol, Cambisol, Solonchak y Solonetz del centro de esta subcuenca, pues según Girón (2002), tal relación es en promedio 11.3.

Gracia Fernandez y García de Caz (1982), mencionan que una vez humificada la materia orgánica, frecuentemente tiene una capacidad de intercambio catiónico elevado, promediando 350 meq/100g de suelo, esto es, 4 veces más que la montmorillonita que tiene 100 meq/100g de suelo y 10 veces más que la caolinita que presenta 40 meq /100g de suelo. Esto se debe, a que el humus se compone principalmente de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. Estos elementos son anfóteros, es decir, que un mismo elemento presenta carga positiva y negativa, frecuentemente con alta capacidad electronegativa, adquiriendo así, un comportamiento ácido-base (ver glosario) en medio acuoso, como lo es la solución del suelo; así, que esto les da mucha facilidad de atraer cationes como: K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} entre otros. En relación a esto, los datos de intercambio catiónico para los suelos de ésta subcuenca, muestran que el Vertisol tiene una capacidad de intercambiar 227 miliequivalentes de cationes/ 100 g de suelo en temporada de lluvias y 230 en seca, seguido por Cambisol con 129.3 en lluvias y 134.2 en seca, el Solonchak con 117.7 en lluvias y 121.7 en seca y finalmente el Solonetz 103.8 en lluvias y 134.2 en seca (tabla 3.2).

Es importante resaltar que en éstos cuatro suelos, los valores de intercambio catiónico aumentan a medida que se presentan horizontes arcillosos, donde alcanzan su valor máximo, localizado a 46 cm de profundidad promedio. Asimismo, éstos valores, al avanzar en temporada seca, muestran un aumento en la capacidad de intercambio catiónico originado por la aplicación de agua residual. Por ésta causa, Girón (2002), explica que los cationes se concentran en el complejo arcillo-húmico.

No obstante, la gran capacidad de intercambio catiónico del humus, es la arcilla, quien retiene más cationes, pues, primeramente, son más numerosas en el complejo arcillo-húmico, y también por que, como se ha establecido, las arcillas pueden atraer con más fuerza y por más tiempo a los cationes, originando que los retenidos por el humus, sean cedidos más fácilmente a las raíces de las plantas y de esta forma queden disponibles para intercambiarse con la solución del suelo. Debido a esto pueden ser llevados a mayor profundidad (Velde, 1995, Rodríguez Suppo, 1982, Raiswell et al, 1983).

La tabla 3.2, muestra el total de cationes intercambiables, total de cationes solubles y total de aniones solubles en temporada de lluvias y seca, los valores están expresados en meq/100g de suelo, en mg/100g de suelo y g/l, para apreciar con más detalle las concentraciones de cationes y aniones en suelo y agua.

Tabla 3.2 Valores de capacidad de intercambio catiónico y aniónico en suelos de la Subcuenca de Zumpango

Suelo	Cationes intercambiables (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ y K ⁺)				Cationes en la solución del suelo (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ y K ⁺)				Aniones en la solución del suelo (SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ y CO ₃ ²⁻)			
	meq/100g de suelo		mg/100g de suelo		meq/l		g/l		meq/l		g/l	
	Temp lluvias	Temp seca	Temp lluvias	Temp seca	Temp lluvias	Temp seca	Temp lluvias	Temp seca	Temp lluvias	Temp seca	Temp lluvias	Temp seca
<i>Vertisol</i>	227	230.1	454	460.2	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
<i>Cambisol</i>	129.3	134.2	323	335.5	196	255.5	1.1	1.4	54.4	67	0.4	0.5
<i>Solonchak</i>	117.7	121.7	207	230	953.5	1014.5	0.8	1.2	945	1060.1	1.0	1.4
<i>Solonetz</i>	103.9	105.8	227	243	150.6	219	4.7	5.0	160.6	227.7	5.1	5.7

Fuente: Girón (2002)

Las cantidades en la columna de cationes solubles indican, que del total que ingresan en la solución del suelo, una proporción es intercambiada con el complejo arcillo-húmico y el resto seguramente estará disponible para ser utilizada por las raíces de las plantas y posiblemente para una infiltración más profunda.

Ahora bien, la relación complejo arcillo-húmico e intercambio catiónico, en éstos cuatro tipos de suelos, presenta lo siguiente: En temporada .seca, un incremento en los valores de cationes intercambiables, cationes solubles y aniones solubles y en consecuencia una capacidad de intercambio catiónico total más alta. En orden: el Ca²⁺ es el catión de intercambio predominante, seguido por Mg²⁺, Na⁺ y K⁺. El Na⁺ lo es en los cationes solubles, seguido por Mg²⁺, Ca²⁺ y K⁺ y en los aniones solubles el SO₄²⁻, seguido por Cl⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻ y NO₃⁻. Al parecer, la causa principal de que se incrementen los valores de capacidad de intercambio catiónico en temporada seca, es la gran cantidad de cationes dentro del agua residual, pues los contiene en gran número, siendo principalmente los iones Na⁺, Mg²⁺, K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻ y CO₃²⁻ y algunos metales pesados como Fe²⁺, Cu²⁺ y Pb³⁺

entre otros más (USSSL Staff, 1973, Custodio y Llamas, 1983, León, 1984, Departamento de Agricultura de USA, 1972).

En temporada de lluvias, como es de esperarse, se presenta un decremento en los valores de capacidad de intercambio catiónico. Una posible explicación, es, que el agua de lluvia disuelve e infiltra los iones concentrados en el complejo arcillo-húmico durante la temporada seca.

La tabla 3.2 muestra también que la diferencia de valores entre ambas temporadas no es muy amplia, seguramente por que la temporada de lluvias es con frecuencia corta y los volúmenes de agua de riego se mantienen constantes todo el año.

Por su parte, la capacidad de intercambio aniónico, es con frecuencia muy pequeña si se compara con el catiónico. Fourhier (1975) indica que son tres las causas principales de esto:

- 1) El menor número de cargas positivas dentro del complejo arcillo-húmico, siendo 6 negativas (4 humus y 2 sílice) por 5 positivas (4 calcio y 1 alúmina).
- 2) Como se estableció, las partículas de calcio y alúmina se unen respectivamente con las de sílice y humus, a través de puentes de hidrógeno, dentro del complejo arcillo-húmico. Aunque éste enlace es débil, posee la notable propiedad, de no permitir la entrada de aniones de la solución del suelo al interior del complejo, quedando, de ésta forma, aniones de intercambio, únicamente en los bordes de ambas partículas y
- 3) El intercambio aniónico se origina principalmente a partir de los grupos hidróxilo, expuestos en los bordes de las arcillas. Esto significa, que aniones como: NO_3^- , PO_4^- , SO_4^{2-} , BO^- y Cl^- son nutrientes para las plantas, por ésta razón, el humus y la arcilla, apenas los retienen, pues su carga es débil, sufriendo un intercambio constante con la solución del suelo y las raíces; a diferencia de los cationes, cuya carga les permite fijarse más fuertemente, con intercambio escaso. De esto se deduce, que los aniones monovalentes o con una sola carga eléctrica, son absorbidos más fácilmente que los bivalentes. Por ejemplo, una planta que está en un medio con sales de cloruro de calcio (Cl_2Ca), absorbe mayor cantidad de cloruros (Cl^-) que de calcio (Ca^{2+}) (Velasco, 1983).

Por otro lado, aún cuando no existen datos de capacidad de intercambio catiónico para el resto de los suelos de ésta subcuenca, es posible que se presenten condiciones semejantes a los señalados. Por ejemplo, en la figura 3.1 los suelos Cambisol, Feozem y Regosol están en contacto con Solonchak y Vertisol, como es área de formación lacustre y aluvial con riego de agua residual, podrían presentar texturas con horizontes de arcilla. Esto haría suponer, que presentan una asociación arcillo-húmica y posiblemente son suelos salinos, luego que son regados con agua residual. Por éstas razones, quizá tengan una capacidad de intercambio catiónico importante, dada por su alta conductividad eléctrica reportada. Cuando esto se presenta, frecuentemente manifiesta que existe gran número de sustancias iónicas disueltas en solución acuosa (Canovas, 1990).

Si el riego con agua residual es continuo en los suelos que se han ejemplificado, es posible que la conductividad eléctrica se haya incrementado desde aquellos años, originando salinización y/o sodificación.

Ya vista la capacidad de retención iónica de los suelos de ésta subcuenca, cabe resaltar ahora, la relación complejo arcillo-húmico con la porosidad en los mismos, pues en la Subcuenca de Zumpango, el porcentaje de ésta aumenta en los horizontes arenosos de los suelos reportados en la tabla anexa de resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002). La causa probable es que los suelos arenosos tienen porosidad total baja, sin embargo, es frecuente que los poros sean grandes y aseguran buen drenaje y aereación. En contraste los suelos arcillosos tienen gran cantidad

de poros, pero son muy pequeños -capilares- con deficiencia en el dren León (1984). Por ésta razón, en la tabla anexa de resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002), se observan valores promedio de 50% de porosidad total a más de 90 cm de profundidad en los horizontes arenosos y su disminución es notable en los horizontes arcillosos con 39% a menos de 90 cm. La arena superficial cuando predomina -hasta 40 cm de profundidad- permite el paso de la solución del suelo con bajos valores de intercambio catiónico, pero a profundidades que van desde 40 a 100 cm, el valor de éste último aumenta con el predominio de arcilla, para disminuir nuevamente a profundidades de 150 cm, donde predomina la arena.

Por lo antes expuesto, en los suelos: Vertisol, Solonchak, Solonetz y Cambisol, la porosidad aumenta hasta en un 3% en promedio durante la temporada de lluvias. Esto se debe probablemente a que en dicha temporada, el agua disuelve sales superficiales acumuladas por el riego en temporada seca, que luego se incorporan a la solución del suelo, pudiendo migrar hacia más profundidad. Esto permite que los espacios porosos permanezcan libres de partículas contrariamente a lo que sucede en temporada seca, que es cuando se riega más intensamente con agua residual y las sales que se puedan formar y demás partículas suspendidas pueden obstruir los espacios porosos. Velasco (1983), menciona que con temperaturas altas, las partículas del suelo se consolidan por pérdida de agua. Ese proceso posiblemente sea favorecido por la evapotranspiración, que es intensa en ésta subcuenca, siendo entonces la eluviación e iluviación los procesos que posiblemente influyen en los cambios de porcentaje de porosidad total del suelo.

Finalmente, con la información antes analizada se puede opinar que la capacidad de intercambio catiónico del suelo es un concepto que aún requiere investigación, pues aunque se le fijan límites, como en éste caso lo han establecido García Fernández y García de Caz (1982), más que una norma, se podría sugerir que es un rango de valores que puede variar de una zona a otra, a causa de propiedades físicas como la textura y porosidad del suelo en relación a características hidrológicas y climáticas como la dinámica hídrica, el tipo de clima y la vegetación de una zona.

3.4-CICLO DE SALINIZACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA

Un suelo salino es aquel que tiene porcentaje de sodio intercambiable menor a 15, pH menor a 8.5 y conductividad eléctrica del extracto de saturación mayor a 4 mS/cm a 25°C (USSSL Staff, 1973). Esta conductividad eléctrica da evidencia de que existe una cantidad importante de iones que pueden quedar disponibles en el suelo, para asociarse en reacciones iónicas y formar sales que posteriormente pudieran hidrolizarse y disociarse nuevamente en iones y ser transportados por el agua meteórica, pudiendo ingresar al agua subterránea afectando así su calidad química. Por ésta razón, se analiza ahora el ciclo de salinización del suelo agrícola, que es un aspecto importante en relación a los intereses de ésta investigación

En esta subcuenca, la salinización del suelo agrícola es causada principalmente por el riego con agua residual, pues, como se ha establecido, es una zona donde los periodos secos son largos, con escasa humedad. Esto se puede tomar como el inicio del ciclo de salinización del suelo agrícola. La figura 3.4 muestra con flechas, las rutas principales de dicho ciclo y los números en ella corresponden a los de la siguiente explicación:

Al tener contacto con el suelo, el agua de riego toma dos rutas principales:

- 1) Se evapora. El efecto de la evaporación sobre los suelos en el vertido de aguas que contienen: detergentes, pesticidas, materia orgánica suspendida y metales pesados entre otros, hace que se evapore el agua, pero no las sustancias disueltas, ni suspendidas. Por ésta razón, el agua usada para riego sufre una concentración de esas sustancias que ya contenía y el suelo las retiene desde el momento en que son vertidas sobre él. Esto puede dar inicio a una salinización paulatina del mismo, con la posibilidad de alterar la calidad química del agua subterránea (Peris Mora, 1992).

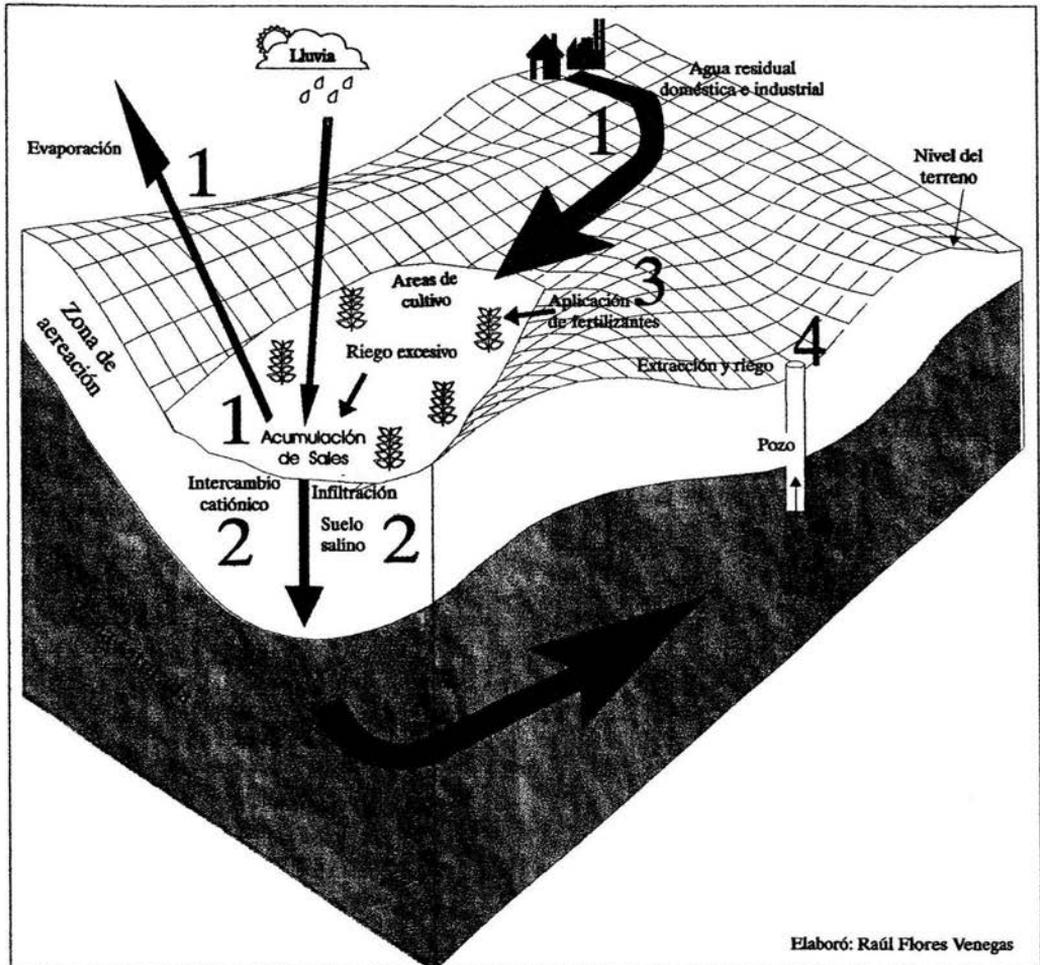


Figura 3.4 Ciclo de salinización del suelo. Se muestran las principales rutas de aporte e ingreso de sales al suelo y su posible infiltración hacia el agua subterránea.

Asimismo, al tener contacto el agua de riego con el suelo, se pueden presentar procesos fisico-químicos, como el ya analizado intercambio catiónico, pero también otros como solubilidad, quelación, reacciones ácido/base, reacciones de oxidación/reducción, hidrólisis, disolución/precipitación, especiación, y degradación termal, entre otras más -ver glosario-. Según Testa (1994), Griffin (1988) y Moore y Ramamoorthy (1984), estos procesos pueden afectar el

transporte y destino de las sustancias dentro de la solución del suelo, una vez que se introducen en él y aún durante su migración hacia la zona saturada. Sin restar importancia a los demás procesos se puede opinar, que posiblemente es la capacidad de intercambio catiónico con el complejo arcillo-húmico del suelo el proceso de mayor relevancia, pues como ya se expuso, con él se da un aumento en los valores de iones hidrosolubles que con la evaporación como factor principal se podrían convertir en sales.

2) Se infiltra y es aprovechada por las plantas o se infiltra por los poros y grietas a mayor profundidad, adquiriendo rapidez al fluir por las arenas o lentitud al fluir por suelos con predominio de arcillas en función de los rangos de permeabilidad reportados por CETENAL (1982) y Favela (1986). Si el riego es frecuente, el agua en los niveles permeables del suelo verá aumentada su concentración en sales por las dos siguientes vías: 1.- Concentración del contenido salino inicial y 2.- Disolución de las sustancias solubles en el suelo (Peris Mora, 1992).

De ésta forma, el agua al ser una sustancia disolvente actúa sobre las sales formadas en superficie, por ejemplo, si la sal es NaCl, de acuerdo con Compton (1986), sucederá lo siguiente: cada ion de sodio que tiene carga positiva queda rodeado por los extremos negativos de las moléculas del agua, y cada ion de cloro que tiene carga negativa queda rodeado por los extremos positivos de las moléculas de agua. La atracción de los iones por las moléculas facilita que el compuesto salino de cloruro de sodio se disocie, y de lugar a que los iones de sodio y cloro queden libres para moverse en la solución acuosa; de éste modo, muchas sales producen una alta concentración iónica en solución acuosa. García Fernández y García del Caz (1982), explican que los aniones como el nitrato, el cloruro y el sulfato no se intercambian fácilmente con el complejo arcillo-húmico, a causa de que tienen potencia eléctrica débil y al no retenerse con firmeza pueden penetrar a profundidad con la lluvia o el riego y alcanzar la zona saturada.

3) Hasta aquí se ha expuesto como se da la acumulación de sales en áreas de riego con agua residual, pero en la región central de ésta subcuenca donde se practica riego con agua subterránea y con agua mezclada, se presenta lo siguiente:

Si la zona de riego utiliza agua potable de origen subterráneo, se tiene el siguiente ciclo: extracción-irrigación- evaporación- formación de sales- infiltración- extracción (Fourhier, 1975) y Custodio y Llamas, 1983). En efecto, como ya se estableció, los habitantes de la región central de ésta subcuenca utilizan pozos para riego, la extraen, la distribuyen y la aplican. También la mezclan con agua residual como complemento de riego, naturalmente, una parte se evaporará y otra se infiltrará. Sin embargo, parece ser, que la concentración de sales sobre la superficie del suelo es mínima en éstas áreas, pues así lo muestran los resultados de Favela (1986). Por su parte, aunque CETENAL (1982) no determinó conductividad eléctrica, reporta para ésta parte de la Subcuenca de Zumpango valores de 6.7 en pH, lo que indica que son suelos normales. No se reportan horizontes con predominio de arcillas ni materia orgánica, por lo que el intercambio catiónico deberá tener valores bajos.

Ahora bien, en la región central de ésta subcuenca no se utilizan volúmenes importantes de agua residual, pues sólo en algunos casos como el ejido San Sebastián se mezcla con agua potable, sin embargo, en la misma, los ejidatarios utilizan fertilizantes elaborados a base de fósforo y amonio, como el sulfato de amonio $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$, superfosfato triple $(\text{PO}_4)_2\text{H}_4\text{Ca}$ y urea $(\text{CO}(\text{NH}_2)_2)$, además de abonos orgánicos como estiércol de establo, que contiene nitrógeno y fósforo (Fourhier, 1975). La urea, se transforma fácilmente en carbonato amónico en presencia de oxígeno. Pero en realidad los tres compuestos son inestables y se descomponen al contacto con agua y aire. Una parte del amonio puede volatilizarse por un proceso fotoquímico debido a la radiación solar, y la otra parte si no se absorbe rápidamente en las raíces, puede migrar hacia más profundidad, pues es muy soluble en

solución acuosa. Los fosfatos y sulfatos con frecuencia quedan retenidos en el complejo arcillo-húmico (Velásco, 1983). Aunque esto se detalla más adelante, se puede adelantar que, quizá ésta sea en parte, una causa de las pocas cantidades de sulfatos, fosfatos y amonio en agua subterránea. Cabe mencionar que el uso continuo de ellos favorece a la salinización del suelo agrícola, pues pueden acumularse paulatinamente. El tiempo en que puede presentarse la salinización depende de las cantidades y frecuencia de aplicación (Rodríguez Suppo, 1982).

En relación a los fosfatos y sulfatos, derivados de los fertilizantes mencionados arriba, con frecuencia quedan retenidos en el complejo arcillo-húmico, pero no son los únicos que lo hacen, pues éste mismo autor indica que fertilizantes como: urea, sulfato cálcico y cloruro de potasa, entre otros, una vez que entran en solución acuosa, pueden disociarse en sus iones respectivos, siendo los más frecuentes:

Catiónes:

Aluminio (Al^{3+})

Estroncio (Sr^{2+})

Calcio (Ca^{2+})

Magnesio (Mg^{2+})

Potasio (K^+)

Amonio (NH_4^+)

Sodio (Na^+)

Aniónes:

Nitrato (NO_3^-)

Sulfato (SO_4^{2-})

Bicarbonato (HCO_3^-)

Fosfato ($PO_4 H^-$)

Cloruro (Cl^-)

Este orden, del aluminio hacia abajo, constituye lo que se llama la "serie liotrópica de los iones" es decir, el ordenamiento según la fuerza con que están unidos al complejo arcillo-húmico del suelo. Así, los primeros están absorbidos con más fuerza que los últimos. Esto muestra, que existe mayor probabilidad de intercambio con la solución del suelo de aquellos iones débilmente unidos al mismo. Como ya se estableció, los bicarbonatos son aniones que destacan por su fácil intercambiabilidad, pero los cloruros, fosfatos y amonio, no son fácilmente absorbidos por las plantas, pues cuando se fertiliza un suelo con ellos, deben agregarse muy cerca de la raíz y con cierta profundidad para facilitar la absorción de los mismos, pues enseguida pierden las formas químicas que la raíz necesita para usarlos. De no ser así, a excepción del fosfato, los cloruros y el amonio presentan mucha solubilidad y quedan disponibles para migrar hacia zonas más profundas, con la posibilidad de llegar a la zona saturada (Rodríguez Suppo, 1982). Es posible que esto ya se esté presentando en la Subcuenca de Zumpango, pues aunque se detalla en el capítulo cinco, se puede adelantar que ya se han registrado pequeñas concentraciones de amonio y fosfatos y diversas concentraciones de cloruros en el agua subterránea. Según la serie liotrópica se puede opinar, que el amonio, el fosfato y los cloruros, al ser iones que se absorben con menos fuerza, son llevados por la solución del suelo hacia zonas más profundas.

Es importante señalar que lo anterior no sólo se presenta en los iones derivados de los fertilizantes, pues como se ha establecido, a los iones derivados del agua residual les sucede algo semejante.

4) Por lo antes expuesto, Davis (1987), Seoanez (1992) y el USSSL Staff (1973), exponen que el agua subterránea cuando se usa para riego, puede actuar como medio de transporte de sales que se acumulan en el suelo. Por ésta razón, la infiltración de iones hidrosolubles originados por abonos y fertilizantes, puede afectar la composición química del suelo agrícola y afectar también la calidad química del agua subterránea. Asimismo se debe considerar que en este ciclo, las rocas del lugar donde se extrae el agua y que formaron el suelo, ceden iones al agua subterránea, y ésta al ser extraída y aplicada como riego, puede aportar cantidades importantes de iones que se intercambian con el complejo arcillo-húmico de los horizontes superficiales (Peris Mora, 1992).

Con la información anterior, se puede resaltar una diferencia en las tres zonas de riego de ésta subcuenca:

En la zona regada con agua potable y mezclada de la región central de esta subcuenca, la concentración de iones en el suelo es baja, mientras que en las zonas regadas con agua residual es alta, seguramente la diferencia la hace la concentración de ellos en el agua vertida. Posiblemente por ésta causa, Peris Mora (1992), indica que en zonas de riego con agua residual y zonas donde se mezcla residual con potable se han establecido las siguientes ventajas:

- 1.-Todas las sustancias insolubles son retenidas.
- 2.-Se clarifica el efluente.
- 3.-Los organismos patógenos son retenidos hasta en diez veces. En los lechos bacterianos sólo de tres a cuatro.

Sin embargo, también existe una serie de inconvenientes que son los siguientes:

- 1.-No aparece ninguna reducción importante de nitrógeno, por lo que sus formas como el nitrato, presentan mayor disponibilidad de ingresar a niveles inferiores del suelo agrícola.
- 2.-Aumenta el contenido en sales del suelo al darse enlaces iónicos, por ejemplo:

$$\text{Na}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{NaCl}$$
- 3.-Aumenta el contenido en iones del nivel freático, cuya causa principal es el ingreso en solución con el agua de lluvia.

En resumen, la salinidad dependerá entonces de la cantidad y tipo de sales que se encuentran en el suelo agrícola, derivadas del riego con agua residual y fertilizantes, como los citados anteriormente, siendo las más importantes:

- ❖ Sulfato de magnesio (MgSO_4)
- ❖ Sulfato de sodio (Na_2SO_4)
- ❖ Cloruro de sodio (NaCl)
- ❖ Carbonato de sodio (NaCO_3)
- ❖ Cloruro de magnesio (MgCl_2)

Estas sales son las más típicas de encontrar en suelos salinos y son altamente solubles en agua y muy nocivas para las plantas, además de que degradan la estructura del suelo (Téllez, 1985, Cepéda, 1991).

En resumen, de la información aportada por los estudios de suelo realizados hasta el momento en el área de estudio, se puede establecer que:

- a) En áreas de riego del oeste y sureste de ésta subcuenca, los suelos Vertisol y Cambisol son salinos y el Solonchak y Solonetz son sódico-salinos. Una posible explicación de la salinidad y sodicidad del suelo agrícola en dichas áreas, se debe probablemente a la clase textural del mismo, donde predominan arcillas, que como se estableció, tienen baja permeabilidad así como conductividad

eléctrica mayor a 4 mS/cm y pH de hasta 8.5, valor que determina alta alcalinidad al suelo y alto poder de retención de iones (Cepéda, 1991).

b) Suelos normales: Feozem de la parte central, donde se riega con agua potable así como Planosol y Litosol en áreas de piedemonte y montañosas que circundan a toda ésta subcuenca, donde no hay riego. Esto se podría explicar por la mayor permeabilidad del suelo agrícola, clase textural con predominio de arenas, conductividades eléctricas menores a 1 mS/cm y pH de 6.5 a 7.5.

Por supuesto, existen diversos trabajos en donde se detalla salinidad de suelo agrícola por efecto de riego con agua residual. Algunos se citan en la bibliografía como son: Méndez (1982) en el estado de Hidalgo y De Dios (1977) en la periferia de la Ciudad de México.

La información antes expuesta indica que el agua residual es la causa principal de la salinización del suelo agrícola de ésta subcuenca, y hace sugerir que es una posible fuente en la alteración de la calidad química del agua subterránea. Sin embargo, no es una norma, pues existen aguas subterráneas muy salinas -salmueras- que alcanzan hasta 100 000 ppm y que no tienen relación con el agua residual, sino que se han salinizado a partir de aguas fósiles, como es el caso de las aguas marinas con elevada cantidad de iones, atrapada en estratos de roca a través del tiempo geológico (Doménico y Schwartz, 1990). Afortunadamente, como se ha establecido para la calidad del agua subterránea de la Subcuenca de Zumpango, su distribución en el subsuelo no es muy amplia para este caso de salinización.

Por lo anterior, se puede opinar que el mayor riesgo de alteración en la calidad química del agua subterránea se debe a sales originadas en la superficie del suelo, como las que se han mencionado anteriormente, pues una vez que se forman son muy solubles, y si además están disponibles en cantidades importantes y se disuelven con la lluvia, pueden migrar en forma de iones a la zona saturada y probablemente llegar al nivel freático.

3.5-USO ACTUAL

Los principales usos del suelo en el área del presente estudio son:

- 1.-Urbano
- 2.-Industrial y
- 3.-Agrícola-Ganadero

De estos tres usos, la agricultura de riego es la de mayor superficie, es decir, 416.3 Km². Los cultivos más difundidos, son entre otros: maíz, frijol, alfalfa y hortalizas como la zanahoria y papa. Otro uso del suelo, como la ganadería, queda restringido a ranchos y granjas con establos particulares para producción de leche, como los que se localizan hacia el SE y Este de la población de Zumpango de Ocampo.

De acuerdo con datos de INEGI (1990), las áreas urbanas e industriales, con 202 Km², ocupan otra parte importante de ésta subcuenca, y a partir de las dos últimas décadas, las localidades de la zona presentan un constante incremento de habitantes, el aumento demográfico dio lugar a la agregación de localidades sin planeación alguna, pues esto ocasiona que la infraestructura urbana aún sea insuficiente en muchas de éstas, por lo que frecuentemente se observan construcciones de viviendas sin terminar, sin drenaje y sin servicios básicos en general. Además, de acuerdo con Moncada (1982), conforme la ciudad se expande, la dotación de servicios se complica más. El agua, como uno de los condicionantes básicos en la ocupación del suelo, impulsa o frena el desarrollo urbano de las zonas

periféricas y la expansión acelerada del área urbana hace imposible extender las redes de agua con la prontitud que se requiere.

La tabla 3.3, muestra las localidades rurales y urbanas por municipio reportadas por INEGI (2000), en este año existían seis localidades urbanas en Ecatepec, cinco en Coacalco, siete en Zumpango, seis en Tecamac, siete en Tultitlán, en Jaltenco dos urbanas y cuatro rurales, Nextlalpan con tres urbanas y

Tabla 3.3 Principales localidades urbanas y rurales en los municipios de la Subcuenca de Zumpango. Fuente: INEGI (2000)

MUNICIPIO	LOCALIDAD	Nº de habitantes	URBANA/RURAL
<i>Zumpango</i>	1. Zumpango (cabecera municipal)	30 684	urbana
	2. CTC Jaltenco	3654	urbana
	3. San Bartólo Cuautlalpan	8366	urbana
	4. San Lucas Xoloc	4830	urbana
	5. San Marcos Jilotzingo	3982	urbana
	6. San Juan Zitlaltepec	4698	urbana
	7. Los Reyes Acozac	16983	urbana
<i>Nextlalpan</i>	8. Santa Ana (cabecera municipal)	10840	urbana
	9. Santa Lucia	3200	urbana
	10. San Juan Pueblo Nuevo	751	rural
	11. Pueblo Nuevo de Morelos	1368	rural
	12. Ejido San Sebastián	126	rural
	13. Santiago Atócan	126	rural
	14. Xaltócan	3521	urbana
<i>Jaltenco</i>	15. San Andrés Jaltenco (cabecera municipal)	7986	urbana
	16. Santa María Tonanitla	5814	urbana
	17. La Concepción	79	rural
	18. Barrio San Juan Zacazontla	136	rural
	19. Las Chinampas	258	rural
	20. La Asunción	700	rural
<i>Tultitlán</i>	21. Prados Ecatepec	9562	urbana
	22. Las Manzanas	432	urbana
	23. San Pablo de las Salinas	589	urbana
	24. Jardines de San Pablo	800	urbana
	25. Las Magnolias	632	urbana
	26. Izcalli San Pablo	369	urbana
	27. Conjunto San Pablo	562	urbana
<i>Coacalco</i>	28. San Francisco Coacalco (cabecera municipal)	325154	urbana
	29. Villa de las Flores	1584	urbana
	30. Villas del Valle	721	urbana
	31. Lomas de Coacalco	236	urbana
	32. Jardines de San José	458	urbana
<i>Ecatepec</i>	33. Ecatepec de Morelos (cabecera municipal)	1356165	urbana
	34. Guadalupe Victoria	635	urbana
	35. Vista Hermosa	1523	urbana
	36. La Joya	12000	urbana
	37. El Progreso Guadalupe Victoria	985	urbana
	38. Las Palmas	659	urbana
<i>Tecamac</i>	39. Haciendas Ojo de Agua	85095	urbana
	40. Ozumbilla	65231	urbana
	41. Los Acos	5698	urbana

Continuación...

MUNICIPIO	LOCALIDAD	N° de habitantes	URBANA/RURAL
	42. Atzompa	4520	urbana
	43. Santa Cruz	7446	urbana
	44. La Esmeralda	2365	urbana
<i>Tultepec</i>	45. San Francisco Tenopalco	289	rural
<i>Tizayuca</i>	46. Tizayuca (cabecera municipal)	35265	urbana
	47. San Francisco Zacacalco	9532	Urbana
		Total=2 036 618	Total= 38 urbanas y 9 rurales

cuatro rurales, Tultepec con una rural y Tizayuca con dos urbanas. Al predominar áreas urbanas sobre rurales implica dotarlas de agua, si estas presentan zonas industriales, origina como ya se indicó, que se extraigan volúmenes adicionales de agua subterránea y con esto cabe la posibilidad de que se altere la calidad química de la misma.

Al igual que en otras áreas de México, en la región de estudio el uso del suelo está muy condicionado por la disponibilidad de agua, pero a su vez, como resultado de las diferentes actividades se desechan grandes volúmenes de agua residual, que puede tener efectos no deseados en: suelo, agua subterránea y salud. El desagüe urbano doméstico tiene altos contenidos en detergentes fosfatados, grasas y nitratos, el industrial contiene sustancias inorgánicas como metales pesados, solventes e hidrocarburos, la actividad agrícola usa una buena parte del agua residual proveniente de esos desagues.

Debido a la escasez de humedad en esta zona, el agua de los acuíferos se está sobreexplotando, por lo que los gobiernos municipales y estatales no tienen la capacidad de abastecer de agua potable a los ejidos agrícolas y los agricultores, al no tener muchas alternativas usan agua residual, que a pesar de no tener al menos un tratamiento primario, se utiliza para irrigar productos que se distribuyen en mercados locales o del interior del país. Es muy conocido que el agua residual contiene compuestos químicos no deseados, ni para el hombre ni para el suelo, pues en la mayoría de los casos alteran su estructura y su composición química, no obstante al no existir alternativa alguna para muchos lugares de México como en el área en cuestión, es de gran ayuda para la agricultura, de esta forma el agua residual de las zonas urbanas e industriales de esta misma región se emplea para riego, siendo los parques industriales: de Tizayuca, en el noreste, Tultepec y Tultitlán al suroeste, así como Santa Clara, Xalostoc y Cerro Gordo al sureste, ya fuera de ella, quienes incluyen industrias textiles, eléctricas y alimenticias, entre otras más, cuyos desagües van hacia el Gran Canal y al río de las Avenidas de Pachuca. Cabe señalar, que también funcionan industrias aisladas, que podrían generar sustancias contaminantes, como la fábrica de pinturas "De Mateo" S.A. de C.V. localizada en las proximidades de la población de Zumpango, la cual desagua hacia el río de las Avenidas de Pachuca y posteriormente, río abajo se usa para riego.

Los temas que hasta ahora se han analizado, muestran que las propiedades físicas del suelo afectan a las químicas. Un ejemplo de esto, es la relación entre el complejo arcillo-húmico con el agua del suelo, teniendo como factor común a la capacidad de intercambio catiónico entre ambos. Lo anterior, es importante en relación con los vertidos de agua residual que se dan en ésta subcuenca, pues los suelos pueden retener o no a las sustancias presentes en los vertidos. Por ésta razón se puede indicar que:

El drenaje es un factor fundamental que depende sobretodo de la textura, de la estructura y de la porosidad del suelo. Asimismo, las texturas definen según sea su proporción a las propiedades mecánicas que condicionan la capacidad de drenaje, permitiendo la migración de sustancias iónicas hacia la zona saturada.

Como se ha establecido, los suelos arcillosos tienen drenaje deficiente. La proporción alta de arcilla hace que los horizontes posean baja permeabilidad, originando que el suelo que la contenga podrá retener el agua vertida por más tiempo. Desde el punto de vista de calidad del agua, parece afortunado que los suelos arcillosos de ésta subcuenca, presenten los mayores valores de intercambio catiónico, pues esto favorece a la retención de sustancias en estado iónico como los metales pesados; fierro, plomo y algunas formas nitrogenadas, como los nitratos, de gran solubilidad y poca absorción en el complejo arcillo-húmico, que pudieran alterar la calidad química del agua subterránea. Por ésta razón, se puede opinar que existe una relación directa de equilibrio entre los cationes de la solución del suelo y los cationes del complejo arcillo-húmico. Al aumentar, por ejemplo, el calcio en la solución, aumentará también en éste último.

La información anterior indica que si ingresan muchas sustancias iónicas disueltas con el agua de riego, el complejo arcillo-húmico retiene a una gran cantidad, siendo unas utilizadas por los cultivos o quedándose en la estructura del suelo agrícola, pues son nutrientes necesarios para las plantas, como el Ca^{2+} y el K^+ (Rodríguez Suppo, 1982). Sin embargo, otras quedan disponibles para migrar hacia mayor profundidad. Con lo anterior, se puede opinar que los factores que posiblemente favorecen a dicha migración son: 1.- Que el volumen de agua aplicado las contenga, 2.- Que el volumen sea excesivo, 3.- Que el volumen aplicado sea frecuente y 4.- Que sea favorecido por la temporada de lluvias

Algo distinto se presentará con los suelos arenosos, que como se ha visto, tienen como característica principal su mejor capacidad de drenaje, pero presentan el inconveniente de una posible alteración en la calidad química del agua subterránea a causa de su bajo índice de intercambio catiónico.

CAPÍTULO 4 EL RECURSO AGUA

4.1 AGUA SUPERFICIAL

El drenaje natural en esta subcuenca está representado por corrientes superficiales de tipo torrencial, sólo existe un río permanente, se trata del río de las Avenidas de Pachuca, que se origina en la Sierra de Pachuca y cruza la zona de estudio en dirección noreste-oeste. En su cauce fluye agua residual y en temporada de lluvias se mezcla con agua meteórica. Esto también se presenta en los ríos formados en época de lluvias que bajan de la Sierra de Guadalupe, pues desaguan hacia el Gran Canal, ellos son los ríos: Puente de Piedra, Rinconada, el Águila y la Cal en Ecatepec, además del canal Cartagena en Coacalco.

En Tultitlán, el Río Acosila desagüa hacia el colector poniente, y hacia el Río de las Avenidas de Pachuca lo hace el Río San Andrés de la Cañada.

Por otra parte, existen canales de agua residual para riego, distribuidos de la siguiente manera:

- 1.-A ambos lados del río de las Avenidas de Pachuca
- 2.-En cárcamos, que son depósitos de agua residual, a manera de canales, de 1 o 2 Km de longitud y 10 m de profundidad. Algunos son: Ojo de Agua, Ozumbilla, San Pedro Atzompa, Santa Cruz, Tecamac, Los Reyes, Loma Bonita y Pueblo Nuevo (figura 4.1)
- 3.- El Gran Canal de Desagüe, fluye en la zona de estudio de sur a noroeste, a través de él sale parte del drenaje de la ciudad de México y abastece a decenas de canales secundarios.

Cabe mencionar que con el agua residual se da riego únicamente en época seca.

Al NW de ésta subcuenca, se localiza la laguna de Zumpango, (figura 4.1) que ocupa parte de lo que fue la antigua laguna del mismo nombre. En 1985 se asoló, por lo que se rehabilitó y según el Gobierno del Estado de México (2003), desde enero del 2003 regula las avenidas pluviales de los Ríos Cuautitlán y Tepotzotlán, almacenando un promedio de 60 millones de m³, de estos una quinta parte es agua residual procedente del poniente del área metropolitana de la ciudad de México y se usa para regar áreas agrícolas al norte y noroeste de esta subcuenca, que incluyen partes de municipios como Hueypoxtla, Tepotzotlan, Apaxco, Teoloyucan y Huehuetoca y Zumpango; con ello se forma un distrito de riego para 24 600 hectáreas.

Aplicar agua residual sobre suelos agrícolas, fue una práctica que se multiplicó en el siglo pasado, al establecerse granjas destinadas a este propósito, cerca de las principales poblaciones de Inglaterra, Francia y Alemania, posteriormente esta práctica fue imitada y se expandió en muchas partes del mundo industrializado. En México, empezó hacia 1896 en el Estado de Hidalgo, en una zona conocida actualmente como valle del Mezquital, localizado a unos 5 Km al norte de esta subcuenca, y luego se expandió hacia otros lugares del centro de México (Ryan, 1989).

De acuerdo con los agricultores de ésta subcuenca, la historia del riego con agua residual, empezó aproximadamente hacia 1968, con la apertura de ejidos y comunidades agrícolas establecidas hacia el poniente, cerca de la laguna de Zumpango (figura 4.1). En ese año, también se empezaba a desarrollar el riego aplicando agua residual del Gran Canal de Desagüe, proveniente del oriente de la ciudad de México. Por esta razón, se instaló equipo de bombeo a lo largo del mismo, para regar varios ejidos, al sur de esta subcuenca.

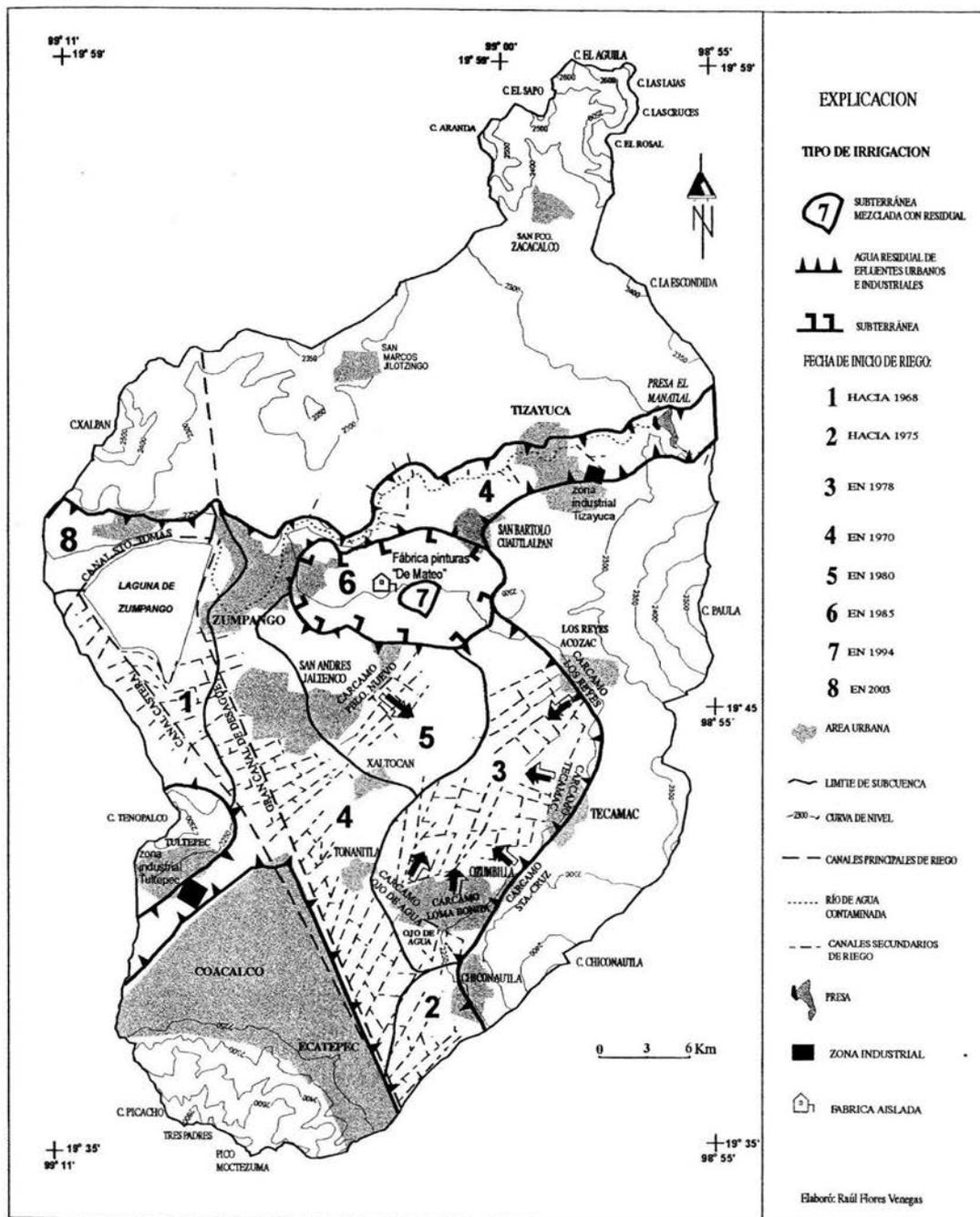


Figura 4.1 Desarrollo histórico del riego

Posteriormente, con la apertura de nuevas comunidades ejidales se formó el distrito de riego Chiconautla-Textcoco, en el que se riegan 4 300 hectáreas. Hacia el noreste, la presa llamada “El Manantial” se estableció para dotar de agua a las zonas ejidales del oriente de la población de Tizayuca. Al finalizar la década de los setentas, aparece un nuevo sistema de riego con agua residual, representado por cárcamos. Este sistema de riego se vio favorecido, por que una parte del agua residual se logro aplicar y otra desagüar hacia el Gran Canal, por ello, se estableció que los cárcamos se desarrollaran a las afueras de las poblaciones. Éste sistema, fue imitado posteriormente y se expandió por poblaciones del centro de esta subcuenca, como en Pueblo Nuevo de Morelos (figura 4.1).

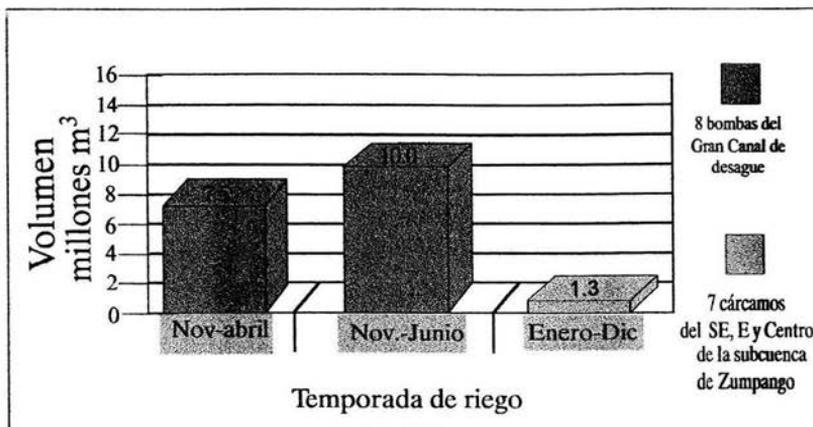
El establecimiento de zonas de granjas y ranchos hacia la región central de la Subcuenca de Zumpango, impulsaron el desarrollo de la extracción del agua subterránea para riego, a partir de los años ochentas. Asimismo, nuevas comunidades ejidales se establecieron, como el ejido “San Sebastián” en el que según los pobladores, han empezado a presentarse dificultades en la extracción de agua subterránea, debido entre otras causas a la sequía prolongada del año, originando que desde hace 13 años se haya empezado a utilizar una mezcla de agua de pozo con residual (figura 4.1).

El interés de conocer la distribución y evolución del uso del agua residual en riego en esta subcuenca, tiene la finalidad de analizar la coincidencia espacial entre las áreas de irrigación más antiguas con la presencia de suelos salinos y con la posible alteración en la calidad química del agua subterránea bajo ellos. Tomando como ejemplo lo que sucede en la región del Mezquital, entre más áreas se incorporen al riego con agua residual y durante mayor tiempo, más probable es que llegue a la zona saturada, alterando consigo la calidad del agua subterránea (Peris Mora, 1992).

Por lo anterior, es conveniente tener una idea de la cantidad promedio de agua residual generada dentro de la Subcuenca de Zumpango. Algunos datos reportados por el Plan de Desarrollo Municipal 1997-2002 del Estado de México, calculados en un colector general, que dirige el agua residual doméstica e industrial hacia el Gran Canal de Desagüe indican que el municipio de Zumpango, tiene una descarga de 293.6 l/s, Coacalco 364.8 l/s y Ecatepec 411.5. Similarmente Tecamac desagua 300 l/s, una parte es dirigida hacia el Gran Canal por medio de conductos subterráneos y otra hacia los cárcamos. De acuerdo con el personal técnico de ODAPAS (Organismo Descentralizado de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento) de este municipio, los cárcamos: Ojo de Agua, Tecamac y Loma Bonita, funcionan 24 horas al día y Santa Cruz y Los Reyes funcionan 12, los 365 días del año y bombean 10 l/s. Esto significa, que se aplican 1.3 millones de m³ al año, de agua residual, para regar 900 hectáreas en los ejidos que la utilizan (figura 4.2).

Por su parte, las unidades de riego establecidas a lo largo del Gran Canal de Desagüe, reciben un promedio de 60 l/s de agua residual no tratada, procedente de la ciudad de México y de las descargas industriales y domésticas locales. El volumen de agua aplicada es de 7.5 millones de m³ en 180 días. No obstante, los periodos de sequía, obligan a aplicar un volumen extra de agua residual, frecuentemente dos meses más, lo cual representa, que el volumen, alcance un total, de 10 millones de m³/año; aplicados a 1100 hectáreas (figura 4.2).

Figura 4.2 Volúmenes de agua residual aplicados por temporada de riego



4.2- AGUA SUBTERRÁNEA

La presencia de agua subterránea está controlada por la estructura geológica y por las propiedades físicas de las unidades de roca existentes como la permeabilidad y porosidad de las formaciones litológicas, siendo algunas rocas ígneas y sedimentarias las más aptas para retener agua, pues con frecuencia presentan altos porcentajes de porosidad y, en consecuencia tienen mejores condiciones de permeabilidad que las metamórficas (Griffin, 1988).

De acuerdo con Huizar et al, (2003), la Subcuenca de Zumpango presenta dos acuíferos principales y dos acuitardos:

1.- *Acuífero mixto* (ver glosario) integrado por las unidades: Qal, Qb, Tpt, Tpp, Tmrd y Tmra, cuya composición litológica ya se ha descrito. Está limitado parcialmente, en su parte superior, por la base de los depósitos lacustres (Qla) y en la inferior por la formación Mexcala-Méndez (Ksm) que son acuitardos (figura 2.6). Las pruebas de bombeo revelan que es semiconfinado hacia el sur y sureste de esta subcuenca y no confinado hacia el norte y noroeste de la misma. Por su litología y existencia de fallas que la afectan (figura 2.6 y 2.7), este acuífero es mixto, pues presenta dos tipos de permeabilidad: granular y fracturada.

2.- *Acuífero fisurado* (ver glosario) está limitado parcialmente, en su parte superior, por el acuitardo de la Formación Mexcala-Méndez (Ksm) y se encuentra en contacto con el acuífero mixto, (figura 2.6). Este acuífero corresponde a la Formación el Doctor, sin embargo sus características hidráulicas son inciertas, pero como se trata de un acuífero de extensión regional dichas características se infieren de pruebas de bombeo disponibles fuera de la Cuenca de México, donde aflora, como en Oaxtepec, Morelos.

Para tener una idea de cuanta agua pueden transmitir las formaciones litológicas antes descritas, la tabla 4.1 muestra algunos datos de conductividad hidráulica, que es una expresión numérica de la permeabilidad en las formaciones litológicas que los integran.

Tabla 4.1 Valores de conductividad hidráulica en acuíferos y acuitardos de la Subcuenca de Zumpango

Formación geológica	Conductividad hidráulica (m/s)	Coefficiente de almacenamiento
Unidad lacustre (acuitardo)		
Arcilla	6.0E-4	5E-2 a 8E-5
Arena fina	2.0E-4	2E-3 a 5E-3
Basalto (acuífero mixto)	5.8E-3	3E-3
Andesita (acuífero mixto)	2.0E-5	7E-4
Formación Mexcala-Méndez	2.3E-6	1.2E-1
Formación el Doctor (acuífero)	1.0E-2	5.7E-1
Base de la Formación el Doctor	incierto	sin dato

Fuente. Huizar et al, (2003)

De la tabla anterior, se puede resaltar la alta permeabilidad del basalto con 5.8E-3 m/s y las calizas marinas de la Formación el Doctor con 1.0E-2. Estas rocas, en comparación con el resto de las formaciones y unidades litológicas, presentan los mayores valores de conductividad hidráulica. Si esta última característica se relaciona con la gran superficie montañosa -229.1 Km² - compuesta de roca volcánica de basalto (Qb) y riolita-andesita (Tmra) en esta subcuenca, entonces se puede deducir que la conductividad hidráulica favorece al aporte de agua, en cantidad importante que puede ser aprovechada. Esto como se ha mencionado, es por que dichas rocas presentan frecuentemente fracturas y permeabilidad alta (Huizar et al, 2003), además de que son las áreas de recarga natural en las que la distribución de la lluvia tiene los rangos más altos que van de 550 a 600mm anuales (figura 2.5), y por estas razones pueden transmitir agua con mayor facilidad que los acuitardos pues estos son los lugares de menor permeabilidad: unidad lacustre y Formación Mexcala-Méndez con 6.0E-9 y 2.3E-6 m/s respectivamente.

De acuerdo con datos de la carta hidrológica de aguas superficiales de la ciudad de México y regiones circundantes, elaborada por la Secretaría de Programación y Presupuesto a través de la Coordinación General de Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática (1983), en la subcuenca de Zumpango se presenta un coeficiente de escurrimiento superficial con un rango que va de 5 a 10%. Este rango se obtiene al considerar la permeabilidad de las unidades litológicas, la cubierta vegetal y la precipitación media anual, el resultado es que dicho coeficiente representa el porcentaje de agua precipitada que drena o se acumula superficialmente. El rango de 5 a 10%, está clasificado como escurrimiento superficial bajo. Esto indica que las unidades litológicas en esta subcuenca tienen permeabilidad alta en áreas montañosas volcánicas favoreciendo a la infiltración, además de permeabilidad media a baja en las planicies aluvial y lacustre respectivamente, donde en consecuencia se presenta el único río permanente representado por el río de las Avenidas de Pachuca (figura 2.5)

El agua subterránea, es la principal fuente de agua potable, para los habitantes en el área de estudio y es también usada para la industria y el riego de algunas zonas agrícolas. Los municipios que la extraen en mayor cantidad son: Tizayuca, Ecatepec y Zumpango. La tabla 4.2, muestra los volúmenes de agua extraídos en relación al número de algunos pozos funcionales para los municipios que se localizan dentro de la subcuenca de Zumpango.

Tabla 4.2 Extracción de agua subterránea en la Subcuenca de Zumpango

Municipio	Número de pozos funcionales	Caudal total diario (miles de m ³)	Caudal total anual (millones de m ³)
Zumpango	16	19000	6.9
Ecatepec	24	29160	10.6
Coacalco	3	4100	1.5
Tizayuca	28	32541	11.8
Tecamac	12	19363	7
total	71	104 164	38 019 860

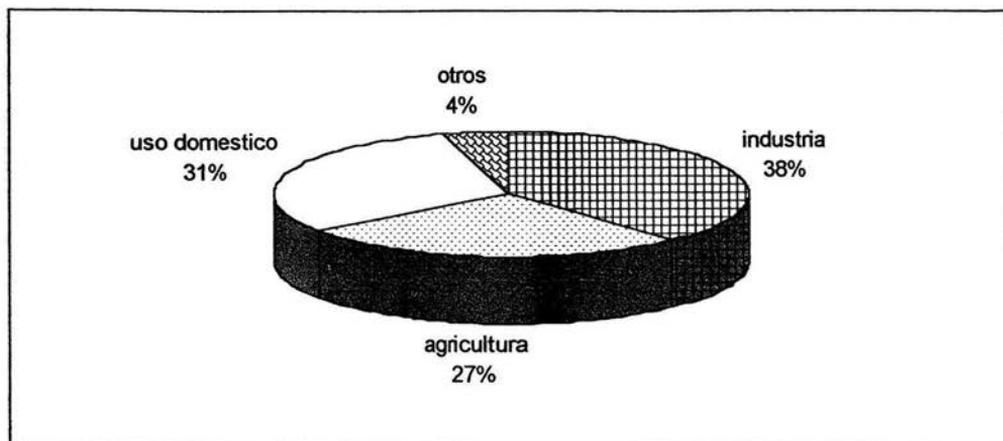
Fuente: Plan de desarrollo municipal 1997-2002 del Estado de México y del Estado Hidalgo

Como se aprecia en la tabla 4.2, el caudal total de agua subterránea, en el año 2000 era de 38 millones de m³, si se compara con el agua residual aplicada, que en ese mismo año era de 27.9 millones de m³, se puede opinar que existe la posibilidad de que el agua residual podría influir, en parte, y quizá de manera poco importante en la recarga subterránea. Esto se podría explicar, por que la evapotranspiración es alta en toda ésta zona y podría favorecer a la formación de sales en el suelo agrícola, a partir del agua residual, que posiblemente se disolverán e infiltraran con el agua meteórica, llegando hasta la zona saturada, esto en temporada de lluvias, que es, de acuerdo con los agricultores de ésta subcuenca cuando llueve más intensamente.

Hasta antes del año 2000 los datos de extracción de agua subterránea en esta subcuenca eran inciertos, la Gerencia Regional de Agua del Valle de México indicaba que se extraían 16.7 m³/s (datos no publicados) de estos, el 80% provenía de los depósitos lacustres -acuitardo- y del acuífero mixto en la región de Zumpango y el otro 20% del acuífero mixto en la región de Tizayuca. La recarga por lluvia era de 2.92 m³/s y el aporte de flujo subterráneo que entra horizontalmente, en los límites de esta subcuenca, se estimó en 3.64 m³/s; lo que muestra una extracción muy alta en comparación a la recarga.

Huizar et al, (2003), describen ejemplos de los efectos de extracción en ésta subcuenca, cuyos resultados muestran que en la parte correspondiente a la región de Tizayuca, la tasa de extracción registrada para 1990 era de aproximadamente 1.25 m³/s y el nivel del agua en los acuíferos, estaba a una profundidad de 23 m en 1976. Como resultado de incremento en la extracción de agua, el nivel descendió más, alcanzando, para finales de 1989, una profundidad promedio de 40 m en los pozos del ramal Tizayuca-Pachuca (figura 2.7). Esto indica que el nivel del agua se abatió en promedio 1.5 m/año. Una explicación de la caída del nivel del agua, es indicada por la ampliación de la zona industrial de Tizayuca, siendo la actividad industrial la que mayor porcentaje registra por uso de agua en ésta subcuenca, tal como se ve en la figura 4.3.

Figura 4.3 Principales usos y porcentajes de agua potable en la Subcuenca de Zumpango



Fuente: Plan de desarrollo municipal 1997-2002 del Estado de México y del Estado Hidalgo

La figura 4.3, muestra, que el ramo industrial, utiliza la mayor cantidad de agua, alcanzando 11.6 millones de $m^3/año$ y le corresponde el mayor valor porcentual: 38.

Para uso doméstico, el 31% equivale a 9.5 millones de $m^3/año$. Éste valor, posiblemente tendrá valores más altos en relación con el tiempo, pues la tendencia de crecimiento de población y ampliación de zonas urbanas es relevante, principalmente en la periferia de las cabeceras municipales donde se observan construcciones con fines industriales y habitacionales como en Tizayuca, Zumpango, Coacalco y Ecatepec. Según Moncada (1982), el consumo promedio de los habitantes del área metropolitana de la Ciudad de México, en 1980, era de 250 litros/habitante/día y según la CNA (1990) de 360 litros/habitante/día, esto indica un claro incremento en el consumo de agua para uso doméstico, obteniéndose el 100% de la explotación intensiva de pozos. La figura 4.3, muestra el incremento en extracción de agua subterránea para los años 1980, 1990 y 2000, resaltándose, el incremento en uso doméstico, esto debido a la concentración de poblaciones con crecientes demandas del servicio de agua potable.

Asimismo, en actividades agrícolas el 27% equivale a 8.3 millones de $m^3/año$, ésta actividad es importante en las zonas centrales de la Subcuenca de Zumpango, pues es ahí, donde se utiliza agua subterránea para riego.

Finalmente, el restante 4% que corresponde a 1.2 millones de $m^3/año$, está referido a actividades terciarias, como el comercio y servicios, distribuidos en toda ésta subcuenca y también primarias como la ganadería, desarrolladas principalmente en la periferia de la población de Zumpango de Ocampo.

CAPÍTULO 5 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE HIDROGEOQUÍMICA

5.1-ORIGEN DEL CONTENIDO IÓNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

Hasta ahora se ha visto como el agua residual puede salinizar al suelo agrícola y éste es capaz de retener iones aportados por aquella, pero algunos que son muy solubles en el agua como nitratos, amonio, cloruros y otros menos solubles como boratos y fosfatos, en cantidades importantes evidencian alteración en la calidad química del agua subterránea (Maidment, 1993, Moore y Ramammothy, 1984). Estos mismos autores explican que el amonio, los nitratos y cloruros, son escasos en rocas del subsuelo y sugieren que su fuente es antrópica. Para los últimos dos, sugieren una fuente externa al medio subterráneo, que frecuentemente es el agua meteórica y aquella correspondiente a los desagües urbanos e industriales.

Por su parte los iones: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^+ , Cu^+ , Co^+ , Cd^+ , Cr^+ , Pb^+ , Zn^+ , Ni^+ , Mn^+ entre otros, tienen como fuente principal a las rocas de la corteza terrestre (Price, 2003) (tabla 5.1).

Tabla 5.1 Composición química de la corteza terrestre

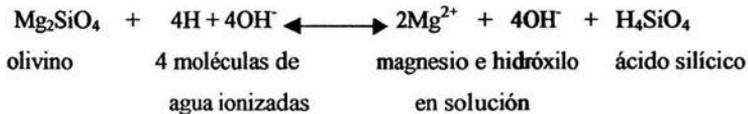
ELEMENTO	% EN PESO	ELEMENTO	% EN PESO
O	49.5	Ti	0.6
Si	25.7	Cl	0.2
Al	7.4	P	0.11
Fe	4.7	Mn	0.09
Ca	3.4	C	0.08
Na	2.6	S	0.06
K	2.4	Ba	0.04
Mg	1.9	N	0.03
H	0.9	F	0.03
		otros	0.49

Fuente: Chamizo y Garritz (1991)

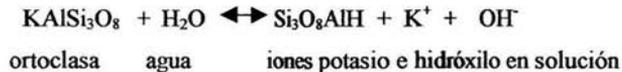
Cabe resaltar, que de los más de 100 elementos químicos existentes, el Ca, Na, K y Mg son de los más abundantes pues suman el 10% de la composición química de las rocas de la corteza y sumados al O, Si, Al y Fe, forman casi la totalidad de ésta, con un 97.66%, esto es por que forman parte de todas las rocas ígneas y sedimentarias de la corteza terrestre. Si éstas forman parte de un acuífero, entonces podrían ceder iones al entrar en contacto con el agua, lo cuál lleva a establecer la pregunta acerca de que, si el silicio, aluminio y fierro son más abundantes que el calcio, magnesio, sodio y potasio, ¿por qué éstos últimos cuatro son más abundantes en el agua subterránea y superficial?. Como respuesta se debe considerar a la solubilidad, pues esta propiedad fisico-química hace la diferencia de concentraciones en el agua, ya que es independiente de la abundancia (Chang, 1992).

Un ejemplo que ayudará a comprender el predominio de los iones calcio, magnesio, sodio y potasio sobre el silicio, aluminio y fierro se muestra en la siguiente reacción, propuesta por Raiswell et al, (1983), en ella

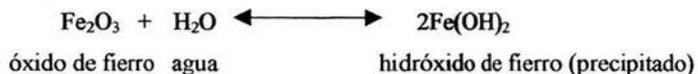
se considera agua y olivino magnésico -forsterita- un silicato que está presente en las rocas volcánicas básicas como las que existen en el área de estudio:



Otras reacciones, de acuerdo con Bloom (1974), entre agua con ortoclasa, donde:



Y agua con óxido de hierro (hematita):



El resultado de éstas reacciones muestra que el magnesio y el potasio van quedando en solución; contrariamente el silicio y el aluminio así como el hierro, aunque también se separan del mineral y están sujetos a disolución, la mayor parte de los iones en sus minerales respectivos se precipitan en estado coloidal, en forma de óxidos e hidróxidos, adquiriendo una baja concentración en agua respecto a los iones calcio, magnesio, sodio y potasio. Algo semejante, parece que le sucede a algunos iones menores como B⁻, P⁻ y a los metales traza: Mn, Zn, Pb, Co, Cu, Cd, Cr y Ni, entre otros más, pues es baja su solubilidad y concentración en muestras de agua subterránea y superficial (Griffin, 1988) (tabla 5.2).

Se puede así opinar, que es la hidratación la fase inicial del ataque químico a la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, ésta consiste en la penetración del agua en su sistema cristalino, siendo capaz de separar iones del mineral mediante la hidrólisis y aceptarlos en solución. Como se estableció con la hidrólisis y carbonatación, se puede acelerar el aporte de iones de un mineral a partir del ataque químico de los iones H⁺ y CO₂ disueltos en agua que la acidifican (Custodio y Llamas, 1983). El resultado de esto es un alto poder de disolución del agua sobre los minerales de las rocas de la corteza terrestre, sin embargo, se da principalmente en las rocas de la superficie, en las que, la carbonatación y la hidrólisis representan los procesos de meteorización principales de ataque a las mismas. De acuerdo con Custodio y Llamas (1983), en el agua subterránea los valores promedio de CO₂ se encuentran entre 1 y 30 ppm y sólo en casos excepcionales de agua carbónica natural originada por aporte de actividad volcánica, llegan a alcanzar más de 1000 ppm. La información anterior está indicando que aunque el ataque químico del agua a las rocas del subsuelo es constante, es también relativamente más lento que en superficie. De esta manera, el agua que fluye por la superficie o por el interior de ésta, adquiere una composición química variable, de acuerdo a las rocas entre las que fluye.

En las tres últimas décadas, algunos trabajos de hidrogeoquímica subterránea como Porras y Thauvin (1978), Custodio y Llamas (1983) y Maidment (1993) han establecido que el agua subterránea está compuesta por los cationes mayores Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ y por los aniones mayores SO₄²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻. Estos últimos tres, frecuentemente se presentan tanto en agua superficial como subterránea, aún cuando su proporción es pequeña dentro del total de las rocas de la corteza, pues sólo suman 0.36% (tabla 5.1). Una posible explicación a esto, es por que en sus procesos de formación, las rocas ígneas no los crean en cantidades importantes (Price, 2003). Se originan principalmente en procesos de superficie, como sucede en algunas rocas sedimentarias, como las evaporitas, en las que los sulfatos y cloruros son originados en ambientes acuosos por evaporación y precipitación química, el amonio y nitratos, principalmente por oxidación en procesos atmosféricos y biológicos, al igual que los carbonatos y bicarbonatos. Esto indica que son iones afines al agua y por lo tanto tienen buenas condiciones de solubilidad (Raiswell et al, 1983, Snoeyink et al, 1987).

Por su solubilidad los elementos Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- y Cl^- , son nombrados iones mayores. Esto origina que su presencia sea frecuente y su concentración importante en cualquier muestra de agua subterránea y superficial. La anterior característica parece implicar que es una norma, pues de acuerdo con Griffin (1988), los iones antes mencionados, en conjunto promedian más del 95% del contenido iónico total en dichas muestras. Similarmente, Custodio y Llamas (1983) explican que el restante porcentaje de iones se encuentra en cantidades más pequeñas y son conocidos como iones menores los que forman menos del 1% del contenido iónico total de una muestra de agua. Por último, también pueden presentarse los elementos traza, cuya suma en una muestra de agua promedia 0.05%. La tabla 5.2 indica la clasificación por contenido iónico y sus concentraciones en ppm.

Tabla 5.2 Concentraciones promedio, en ppm, de iones mayores, menores, elementos traza y gases frecuentes en muestras de agua superficial y subterránea

IONES MAYORES		ELEMENTOS TRAZA	
Ca^{2+}	10 y 250*	Mn^{2+}	<0.2 ^a
Mg^{2+}	1 y 100*	Zn^{2+}	0.1 y 5 ^a
Na^+	1 y 150*	Cr^{2+}	<0.2 ^a
K^+	0.1 y 100*	Co^{2+}	<0.1 ^a
Cl^-	10 y 250*	Cd^+	<0.1 ^a
SO_4^{2-}	2 y 150*	Cu^+	<1 ^a
HCO_3^-	50 y 350*	Pb^+	0.01 y 1 ^a
IONES MENORES		Ni^+	<1 ^a
NO_3^-	0.1 y 10*	GASES	
SiO_2	1 y 40*	CO_2	1 y 30*
B^-	<0.1*	O_2	0 y 5*
PO_4^{3-}	0.01 y 1*		
NH_4^+	<0.1*		
Al^{3+}	0.005 y 0.3*		
Fe^{2+}	0 y 10*		

Fuente: *Custodio y Llamas (1983)

^aGriffin (1988)

El tiempo de interacción entre las rocas del subsuelo y el agua subterránea, varía mucho, es mayor cuanto mayor sea la profundidad y menor la permeabilidad, además, por su insaturación el agua subterránea tiene mayor oportunidad de disolver minerales. Custodio y Llamas (1983), señalan que en el contexto de las rocas ígneas, basalto y andesita dan un aporte importante de iones al agua subterránea, a causa de su amplia distribución en la corteza terrestre. Según Brownlow (1996) y Armienta et al, (1987), la mayoría de las rocas sedimentarias al ser más porosas, son capaces de aportar sales más rápidamente que las rocas ígneas y metamórficas.

Por otro lado, Palmer (1992) menciona seis formas en que puede presentarse infiltración y aporte de iones en solución hacia el agua subterránea:

- 1.- Por infiltración de agua meteórica, pues contiene iones de cloro, que puede acumular y/o infiltrar a través de los poros del suelo hacia el agua subterránea.
- 2.- Infiltración en las márgenes de la cuenca por corrientes procedentes de las montañas circundantes
- 3.- Infiltración en las montañas
- 4.- A partir del sistema de redes de canales

5.- Por exceso de riego con agua residual al suelo agrícola y

6.- Por infiltración a partir del sistema de desagüe.

Las tres primeras constituyen las fuentes de recarga naturales, mientras que las tres últimas contribuyen a la recarga antrópica actual, y puede considerarse ésta última una recarga inducida o artificial, integrada por infiltración de agua residual de riego que puede alterar la calidad química del agua subterránea, aunque como se ha establecido, la mayor parte del agua residual se evapora y se concentran los iones que contiene, formando sales que con las lluvias podrían infiltrarse hasta la zona saturada.

En resumen, se pueden establecer dos fuentes principales de iones al agua subterránea de esta subcuenca; i) disolución en rocas y suelo y ii) parcialmente por aportes de superficie -antrópicos- como riego con agua residual, predominando la primera. Cabe resaltar que la fuente principal de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^+ , Cu^+ , Co^+ , Cd^+ , Cr^+ , Pb^+ , Zn^+ , Ni^+ , Mn^+ y B^- entre otros son los elementos químicos que contienen las rocas de la corteza terrestre; y parcialmente la fuente de Cl^- , P^- , NO_3^- , es el agua residual usada en la agricultura de esta zona.

5.2-COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Una vez conocido el origen de los iones en el agua subterránea, es ahora posible interpretar la concentración de aquellos en ésta, pues como se ha indicado, por su insaturación el agua incorpora en solución sustancias iónicas que dan lugar a su contenido mineral.

De esta forma, el grado de mineralización del agua subterránea puede ser expresado por:

1.- La Conductividad Eléctrica (C.E.) y

2.- Los Sólidos Totales Disueltos (STD).

Esto significa que todos los iones disueltos, en particular las sales existentes en el agua, registran el paso de una corriente eléctrica, denominada conductividad eléctrica ya que la cantidad de sólidos totales disueltos en dicha muestra, es proporcional a la corriente eléctrica que pasa a través de ellos (Griffin, 1988). La figura 5.1, muestra la correlación entre ambos parámetros. En esa figura puede verse que la dispersión de puntos es muy parecida, sugiriendo que en efecto existe una relación proporcional entre ambos valores. También se ha incluido la recta de regresión de sólidos totales disueltos respecto a la conductividad eléctrica. La interpretación de dicha recta, es que ésta representa la variable dependiente y está en función de los sólidos totales disueltos.

En cuanto a los valores promedios para ambas parámetros, la figura 5.1 muestra que los valores más bajos se presentan en los pozos 8 y 9 de la región central de ésta subcuenca, y los más altos en los pozos: 15 y 19 de la región oeste (figura 5.2). Esto sugiere, que el riego con agua subterránea en la parte central favorece un bajo contenido mineral, mientras que el riego con agua residual favorece a incrementar el contenido iónico del agua subterránea, principalmente de cloruros, nitratos y sulfatos.

La distribución espacial de ambos parámetros en la región central, es decir en los pozos 7, 8, 9, 10, 11 y 12 muestra que los valores promedio de conductividad eléctrica llegan a $400 \mu\text{S}/\text{cm}$, el valor promedio de los sólidos totales disueltos es $275 \text{ mg}/\text{l}$ y se incrementa hacia las zonas de Zumpango de Ocampo, San Andrés Jaltenco y Coacalco-Ecatepec -pozos: 14, 15, 17, 19 y 26-, alcanzando ahí valores promedio de $1450 \mu\text{S}/\text{cm}$ para conductividad y $1200 \text{ mg}/\text{l}$ para sólidos totales disueltos (figura 5.3). Esta información

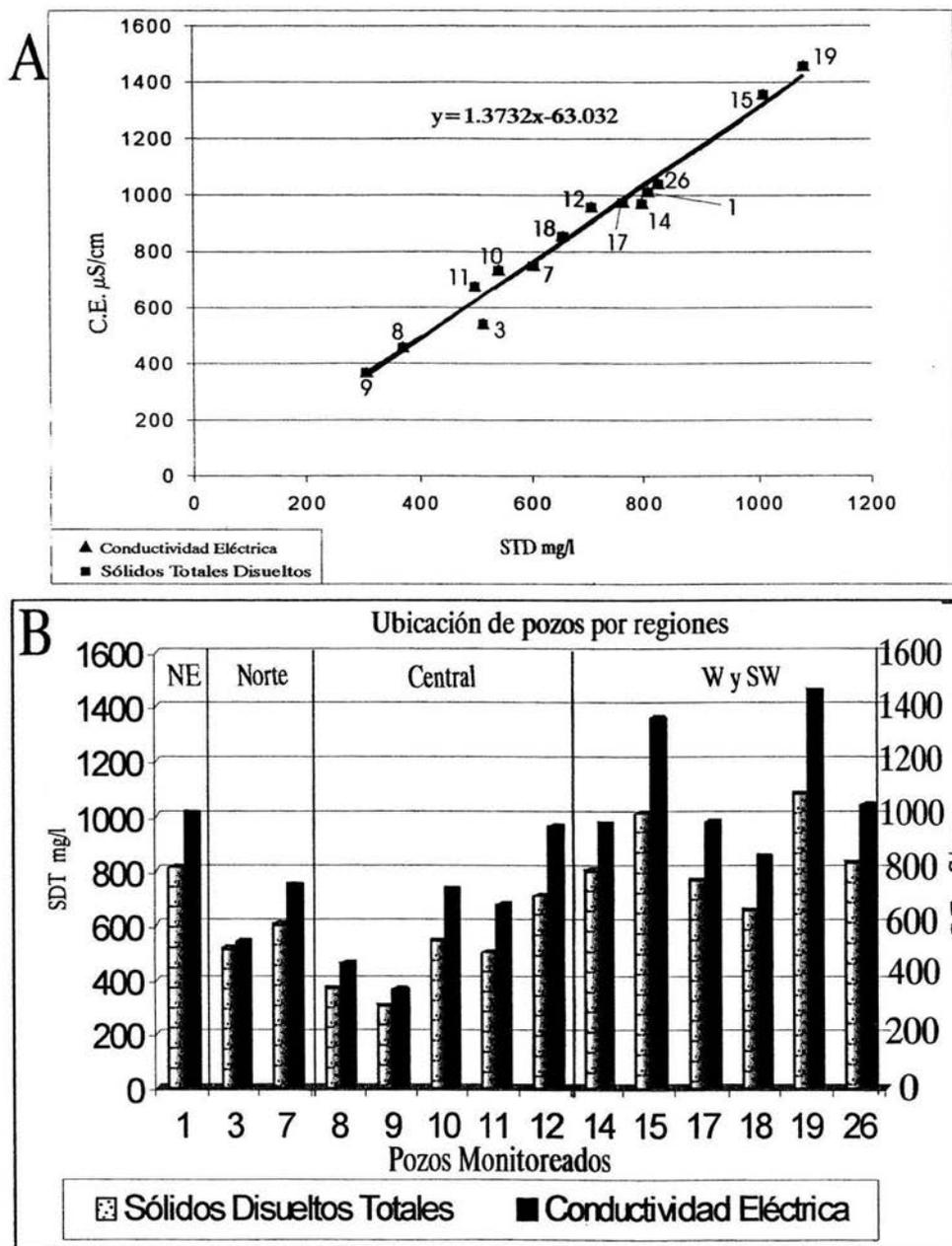


Figura 5.1 Gráficas de C.E y STD en agua subterránea para el año de 1997. En A) se muestra la correlación entre ambas determinaciones físicas y se ha incluido la recta de regresión de Y sobre X. Puede verse que los puntos graficados (pozos) ocupan la misma posición, dando la impresión de que es un solo punto, se debe a que su tendencia es proporcional y son por lo tanto correlacionables. En B) resalta dicha proporción siendo los pozos: 15 y 19 en la región W y SW de ésta subcuenca los de más altos valores, en contraste con los pozos 8 y 9 del la región central con los valores más bajos.

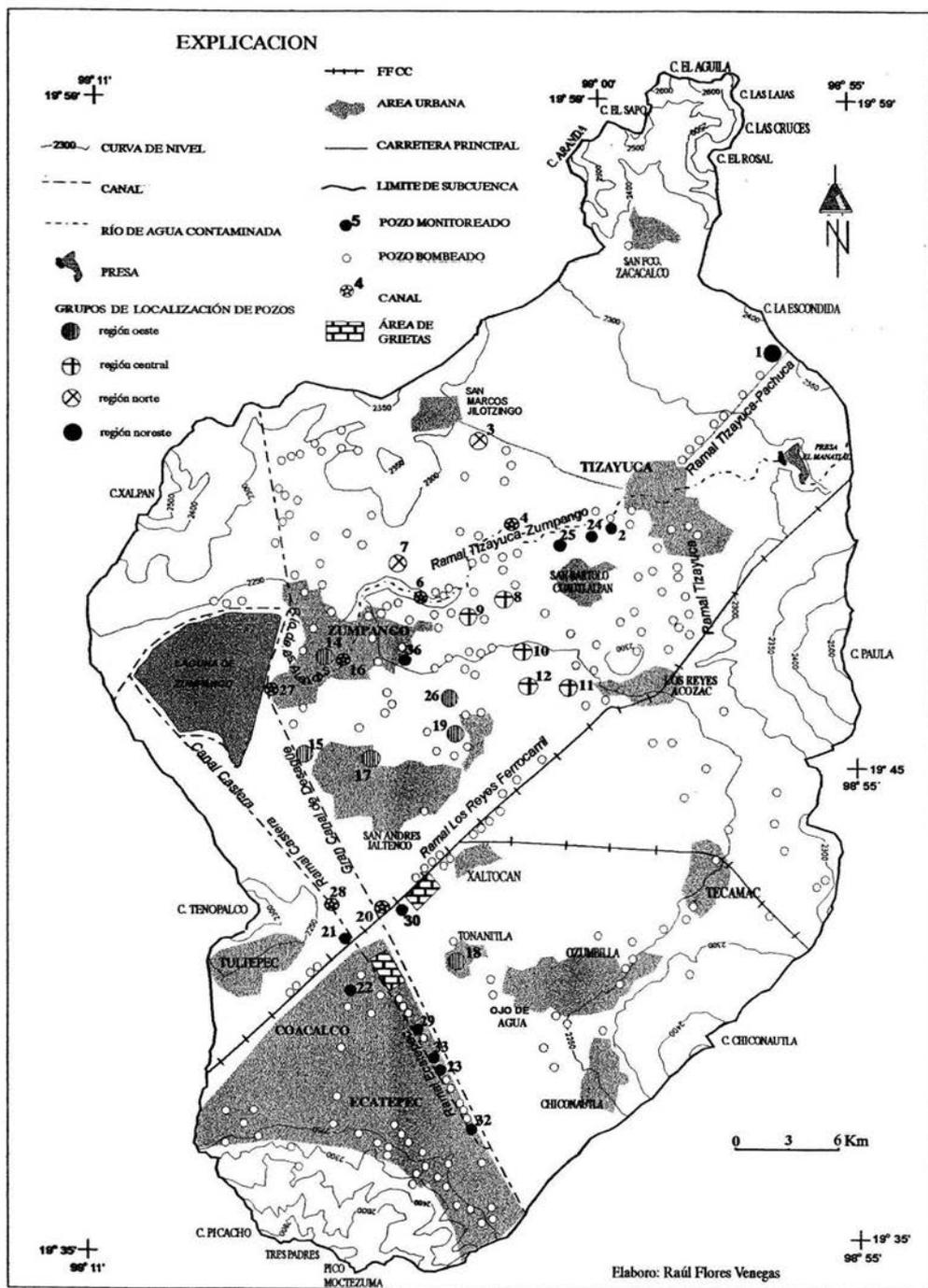
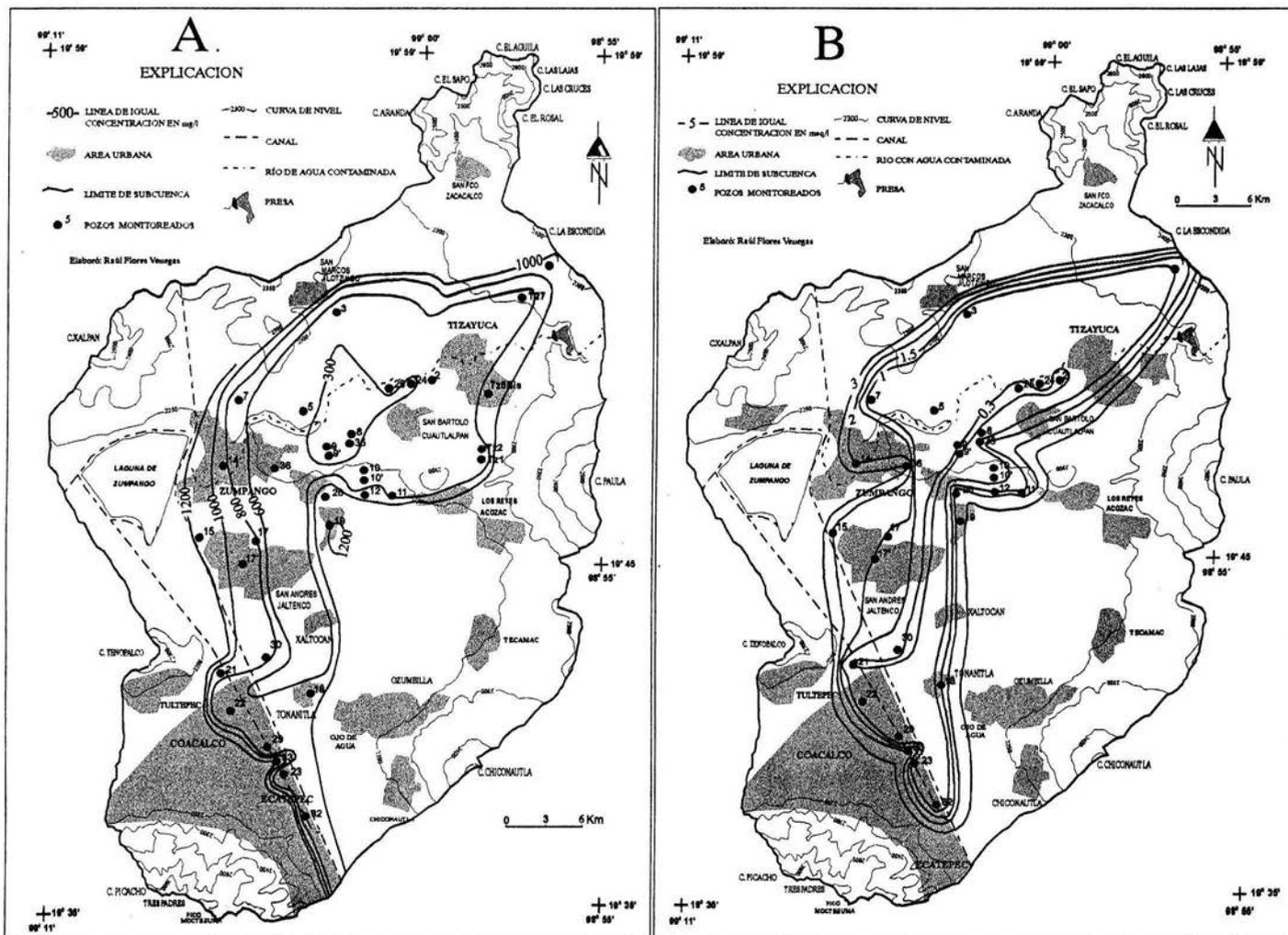
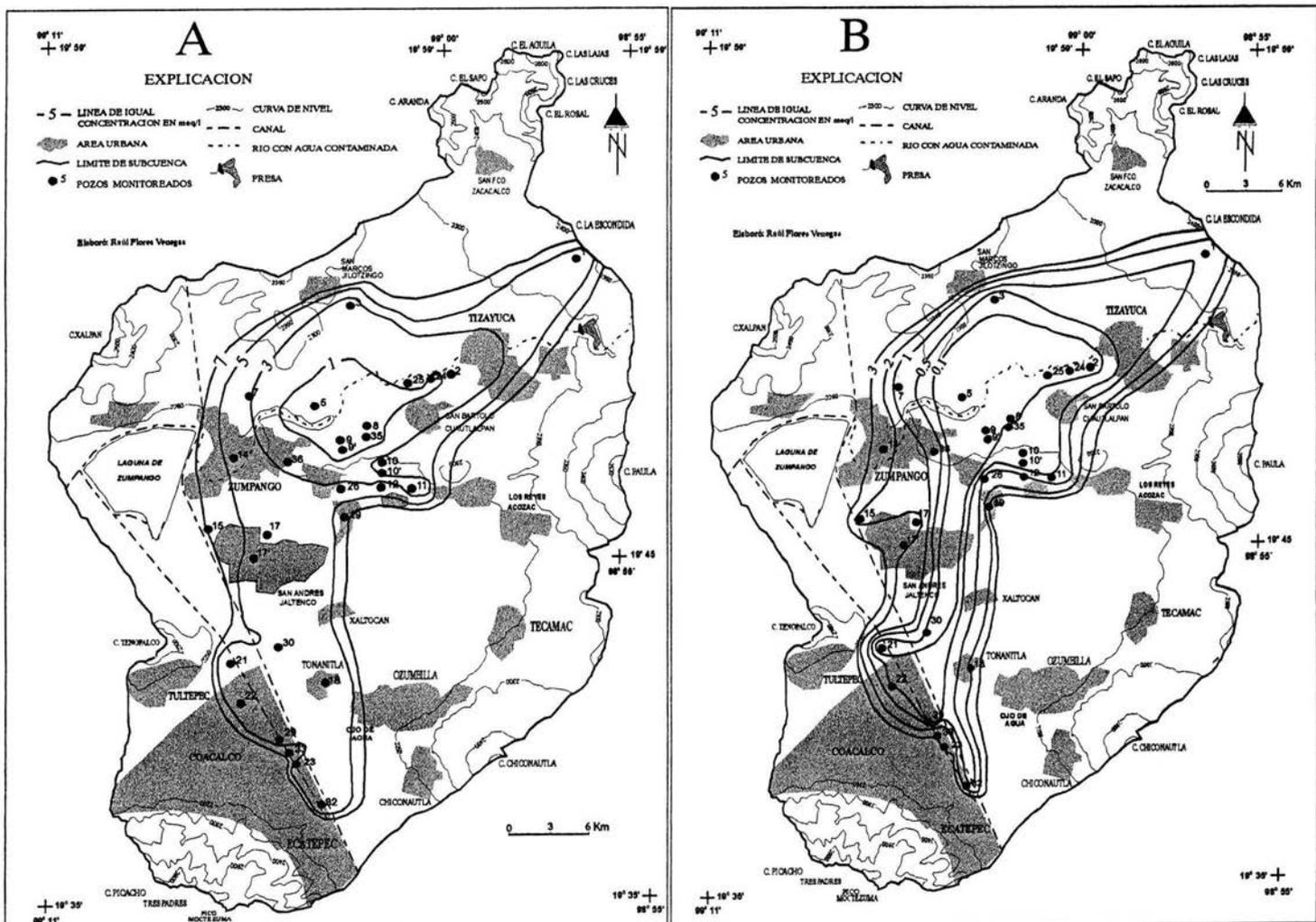
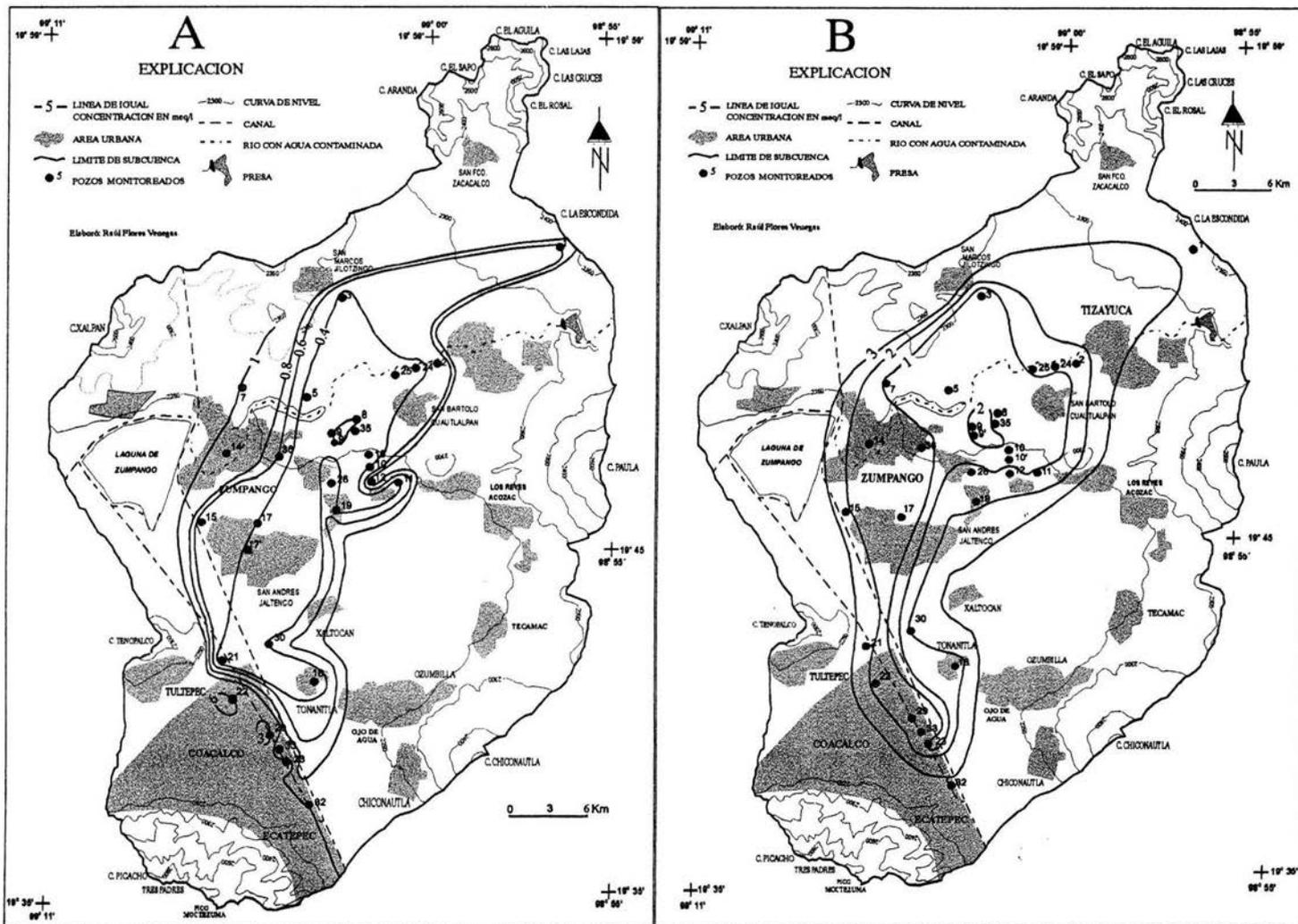


Figura 5.2 Localización de pozos y canales de monitoreo







muestra que en la región central de ésta subcuenca, el agua subterránea para riego al ser frecuentemente extraída e infiltrada, forma parte de un flujo local subterráneo.

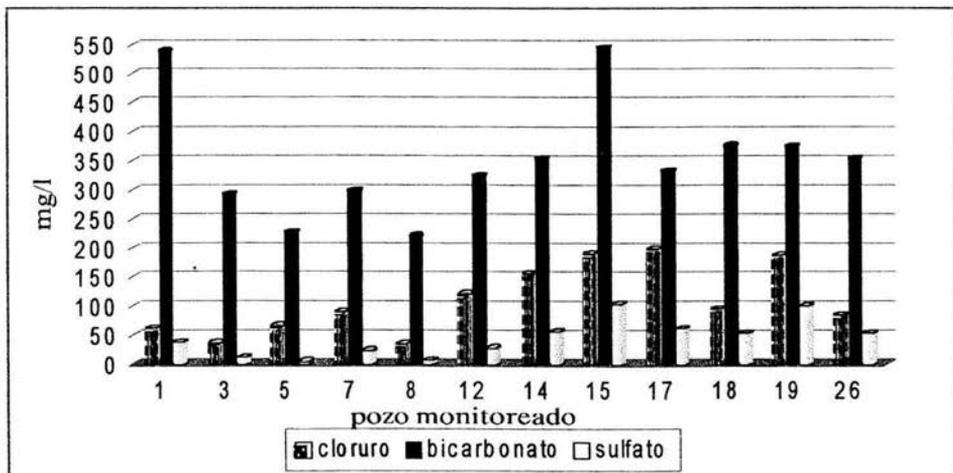
El agua subterránea de esta misma región de la Subcuenca de Zumpango, al diferir en concentración iónica de aquella del área oeste, determina que es el agua subterránea más vulnerable a alterar su calidad química.

Por otro lado, se presentan también los sólidos suspendidos totales, que se componen de partículas orgánicas y/o inorgánicas que han sido extraídas a la par con el agua bombeada. El pozo 15 de la parte oeste (figura 5.2), es relevante en éste sentido ya que presenta cantidades importantes de materia orgánica en suspensión, cuya composición química no fué determinada. Sin embargo su apariencia sugiere que es materia vegetal en descomposición o heces. Una posible explicación, es que al estar localizado en las proximidades del Gran Canal de Desagüe, a 25 m aproximadamente presenta alguna infiltración de agua residual desde ahí.

De igual manera que con la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos, los iones: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , P^- , NO_3^- , B^- , Fe^+ , Cu^+ , Co^+ , Cd^+ , Cr^+ , Pb^+ , Zn^+ , Ni^+ y Mn^+ , así como el valor de índice de relación hidrogeoquímica cloruro/sodio, presentan el mismo patrón de distribución espacial. En las figuras 5.3 a 5.5. se muestra la dispersión de algunos de estos parámetros. Aunque esto se detalla más adelante, se puede adelantar que el patrón de distribución de sustancias iónicas, en parte, hace evidente que la mayor mineralización coincide con las direcciones del flujo subterráneo.

En el área de estudio los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} y los aniones HCO_3^- y Cl^- predominan sobre el resto del contenido iónico. Los cationes mayores presentaron la proporción siguiente; $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, con valores promedio de 63, 51, 31 y 5 ppm respectivamente, los valores promedio, en ppm, para aniones fueron; HCO_3^- , 325 > Cl^- , 104 > SO_4^{2-} , 37 para cada uno respectivamente; los menores contenidos de HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} , coinciden con los lugares donde se riega con agua subterránea, principalmente el pozo 8 de la región central de ésta subcuenca (figura 5.2). Los mayores contenidos en los pozos 15 y 19 (figura 5.6), localizados cerca de lugares donde se riega con agua residual. Esto sugiere que los cloruros y sulfatos de este agua, favorecidos por el agua meteórica, pueden infiltrarse y llegar hasta el agua subterránea. Los sulfatos también pueden provenir; por influencia de algún depósito de azufre de origen volcánico localizado dentro de las rutas de flujo subterráneo.

Figura 5.6 Gráfica de concentración de aniones en agua subterránea para el año de 1997



En cuanto a los cloruros, es frecuente que los desagües domésticos presenten concentraciones promedio de 20 a 50 mg/l y los industriales de más de 150 (Seoanez, 1992). Esto explicaría, sumado al riego con agua residual y de lluvia la media de 190 mg/l, encontrada en los pozos 14, 15, 17 y 19 del oeste de ésta subcuenca (figura 5.6 y 5.2).

A excepción de los metales traza, el resto de los iones en el agua subterránea de ésta subcuenca tienen concentraciones constantes en temporada seca -enero a mayo- y, aumentan en temporada de lluvias -junio a octubre-. Sobretodo el cloruro y el sodio (figura 5.7). Como se expuso, existen suelos salinos que pueden contenerlos y el agua de lluvia podría disolverlos, e infiltrarlos hacia el agua subterránea. Esto determina la posibilidad de ingreso de iones del agua superficial hacia el agua subterránea de ésta subcuenca. Además, como se detalla posteriormente, podría favorecer a que imperen mezclas de aniones y cationes en el agua subterránea lo que podría indicar alteración en la calidad química de la misma.

Por otra parte, Griffin (1988) explica que el registro de temperatura y de pH, también puede sugerir la fuente de los iones en el agua subterránea, pues en forma general éstos indican por donde está fluyendo el agua y de dónde se están obteniendo minerales. Para tratar de comprender esto primero se debe considerar la temperatura del agua subterránea, que en ésta subcuenca tiene un rango que va de 20 a 29°C. En realidad, todos los pozos monitoreados (figura 5.2) superan en más de 4 °C a la temperatura atmosférica media anual de 19°C, reportada en las estaciones meteorológicas (cuadro 2.2). Ésta elevada temperatura puede explicarse a causa del movimiento de fallas en la región, que afectan a la Subcuenca de Zumpango.

Según Armstead (1989), el movimiento de fallas activas es una fuente de calor que eleva la temperatura del agua subterránea. La figura 2.9 muestra la existencia de fallas paralelas que cruzan ésta subcuenca, siendo principalmente la F12, F13 y la zona de distensión entre ellas, quienes posiblemente originan fallas normales de menor extensión, como las que se presentan en la figura 2.5, 2.6 y 2.7, que son consideradas activas por Vásquez y Jaimés (1990) y Huizar et al, (2003). Cabe resaltar que los pozos 14, 15, 17 y 19 (figura 5.2) son los que tienen la más alta temperatura en toda ésta subcuenca, por ejemplo, el pozo 14, llega a 29°C, y el 15, en promedio 25° C a lo largo del año. Ésta temperatura quizá es obtenida por su cercanía con las fallas normales de la parte oeste (figuras 2.5, 2.6, 2.7 y 2.9). Una investigación que apoya lo anterior, es la de Prol y Juárez (1986) en Huizar (1997), quienes a partir de mediciones con un geotermómetro de cuarzo, elaboraron un mapa geotérmico de México. En él, la cuenca hidrográfica del río de la Avenidas de Pachuca, que incluye una parte de la Subcuenca de Zumpango, queda comprendida en un rango de temperatura que va de 140 a 150°C. En dicha investigación se concluye, que las fallas activas son el origen de la elevada temperatura del agua subterránea en ésta zona.

Derivado de lo anterior, el gradiente geotérmico se hace presente sobre la temperatura del agua subterránea. Armstead (1989), conceptualiza a éste gradiente indicando que a medida que se avanza hacia el interior de la corteza terrestre hay una elevación de la temperatura. Además, menciona que en el planeta dicho gradiente varía mucho de un lugar a otro, presentándose el valor más bajo, en lugares del norte de Rusia, con 10°C/Km, y otros de hasta 800°C, como en la región volcánica de Lordello, Italia. Aún cuando el valor del gradiente geotérmico puede variar mucho en la corteza terrestre, algunos factores como la actividad tectónica y volcánica de la región considerada, son fundamentales para establecer su valor. Este mismo autor, da un rango promedio de gradiente geotérmico para México que va de 31.4 a 39.3°C/Km. Como se estableció antes, los pozos de bombeo de la Subcuenca de Zumpango, apenas rebasan los 200m de profundidad. Si se considera el promedio de dicho rango, entonces se puede indicar que el agua obtendrá hasta 3.5°C/100m o bien 7°C en esos 200m de profundidad máxima.

A partir del concepto de agua termal, considerada así cuando la temperatura del agua subterránea es igual o superior a la temperatura atmosférica media anual, Schoeller (1962) en Custodio y Llamas (1983) establece la siguiente clasificación:

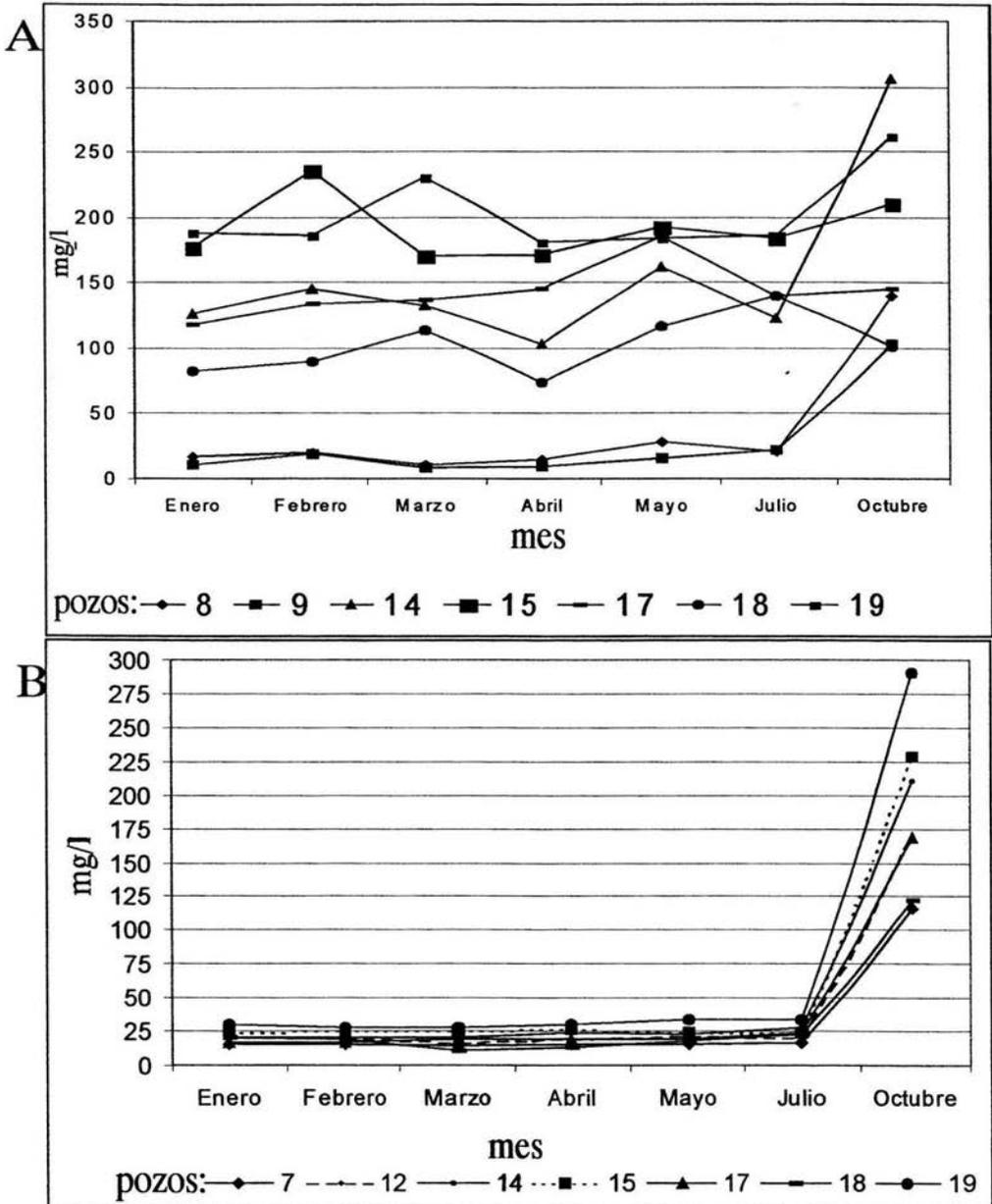


Figura 5.7 Gráficas de Cloruro y Sodio, que muestran su variación temporal en agua subterránea, para el año de 1997. En A) se observa que los pozos de la región central: 8 y 9, así como los de la región W: 14, 15, 17, 18 y 19 de ésta subcuenca, tienen concentraciones constantes de cloruros en temporada seca: enero a mayo y luego se incrementan notablemente en temporada de lluvias: junio a octubre. En B) se observa algo semejante con las concentraciones de sodio, en los mismos pozos del oeste y en el 7 y 12 de la región central. Este incremento posiblemente es ocasionado por la infiltración de agua meteórica que disuelve sales de cloruro de sodio, previamente aportadas por el agua residual y formadas en el suelo agrícola, durante la temporada seca.

- a).-Si la temperatura del agua subterránea supera en 4°C a la temperatura media anual del lugar, se considera agua hipertermal.
- b).-Si la temperatura media anual del lugar, es menor o igual a la temperatura del agua subterránea y ésta es menor o igual a la temperatura media anual del lugar, más 4°C, se considera agua hortotermal o normal
- y c).-Si la temperatura del agua subterránea es inferior a la temperatura media anual del lugar, se considera agua hipotermal o fría

De acuerdo a la anterior clasificación, el agua de ésta subcuenca es hipertermal, pues la temperatura promedio del agua subterránea es de 23.8°C contra los 19°C de la atmosférica.

En resumen, con la información antes expuesta, parece probable que el agua subterránea está adquiriendo su temperatura, en primer lugar, por fallas activas y en segundo, por influencia del gradiente geotérmico. Cabe resaltar que la temperatura es un factor muy importante al influir en la saturación mineral del agua subterránea, según Maidment (1993), la temperatura alta favorece a que el agua subterránea en sus rutas de flujo pueda acelerar la disolución de minerales y transportarlos en solución, pues si se da un incremento de 10°C en la temperatura, esta hace doblar la velocidad de reacción.

Finalmente, respecto al potencial de hidrógeno -pH-, los valores obtenidos se encuentran en el rango de clasificación que va de neutra a alcalina, pues oscilan entre 6.8 y 8.0. Esto implica que el agua está fluyendo en un ambiente volcánico intermedio, cuyas rocas cálcicas, magnésicas y sódicas originan la formación de carbonatos como calcita y magnesita, que favorecen a condiciones de alcalinidad en el agua subterránea. Ésta explicación, se da a partir del registro de iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y HCO_3^- presentes en el agua subterránea, debido a que en todos los tiempos de muestreo y a lo largo del año; tienen una concentración importante (figuras 5.6 y 5.7).

5.3 FLUJO PRINCIPAL DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Hasta ahora, la información que se ha expuesto muestra que el mayor grado de mineralización del agua subterránea se localiza hacia las poblaciones de Zumpango de Ocampo, Coacalco y Ecatepec. Ésta y otras bases que a continuación se explican, evidencian la dirección del flujo subterráneo para la Subcuenca de Zumpango:

1.-De acuerdo con Palmer (1994), Griffin (1988), Secretaría de Recursos Hidráulicos (1973) y Custodio y Llamas (1983), la representación sobre un mapa con líneas de igual concentración iónica, puede mostrar áreas de alta y baja mineralización del agua subterránea e indica la dirección del flujo subterráneo general para una zona en particular. De acuerdo con Price (2003), la afirmación anterior, se basa en que el agua subterránea se mueve de lugares de baja concentración de sólidos disueltos totales -agua subterránea insaturada- hacia lugares de alta concentración de los mismos. El agua en este proceso tiende a alcanzar un equilibrio mineral.

Aquí cabe la pregunta acerca de que, si en verdad existe un equilibrio mineral, entonces ¿por qué no toda el agua subterránea tiene la misma concentración iónica?. Como respuesta posible se debe considerar, que con frecuencia existen diferencias en las concentraciones iónicas, principalmente a causa de las actividades económicas, que inducen a una alteración en la calidad química del agua subterránea, por ejemplo, el riego agrícola con agua residual. En la región central de ésta subcuenca, el agua subterránea se extrae y se infiltra ahí mismo, lo que origina un flujo local de escasa concentración iónica con baja mineralización. Esta contrasta con las porciones territoriales del noreste y oeste, en las que el flujo local es afectado por el agua residual, adquiriendo así una mayor concentración iónica. Por lo anterior, la representación de isolíneas evidencia si el flujo subterráneo que se está determinando, se origina en la Subcuenca de Zumpango o proviene de fuera de ella. En ésta subcuenca, la interpretación de los mapas de isolíneas para todos los iones determinados, indica que el flujo general presenta dos direcciones preferenciales:

- a).-De noreste a oeste, es decir, del área de Tizayuca hacia Zumpango de Ocampo y San Andrés Jaltenco y
 b).- De suroeste a oeste, es decir, del límite suroeste de ésta subcuenca, hacia Coacalco, Ecatepec y Zumpango (figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.8 y 5.9).

La posibilidad de que el agua fluya hacia las direcciones antes mencionadas, también puede tentativamente ser explicado a causa de que son las áreas urbanas de mayor superficie en ésta subcuenca, con la mayor cantidad de industrias, casas habitación y además las que usan los mayores volúmenes de agua potable. Por ésta razón, el agua al ser extraída frecuentemente en volúmenes grandes, favorece su desplazamiento por las regiones centro, sur y oeste. Es también probable que el flujo provenga de zonas cercanas a la misma, creando la posibilidad, de que se genere mayor concentración de iones disueltos en el agua subterránea, como los Cl^- , cuyo origen probable es la infiltración a partir del agua de lluvia y/o de riego con agua residual, como se da a lo largo del río de las Avenidas de Pachuca y quizá también de la disolución de minerales de las rocas del subsuelo por donde fluye en aquellos lugares.

La región central de ésta subcuenca presenta la menor mineralización de agua subterránea (figura 5.8), esto es debido a que corresponde a las partes topográficamente altas de la zona de estudio. Debido a esto, podría ser la zona más vulnerable a alterar su calidad química, pues si el flujo subterráneo se está presentando en las direcciones antes señaladas, es probable que transporte sustancias iónicas que alteran dicha calidad como nitratos, que podrían infiltrarse hacia el agua subterránea a causa de la practica de actividades agrícolas, ganaderas e industriales que se presentan dentro y fuera de los límites físicos de ésta subcuenca. Por ejemplo, las poblaciones de Las Pintas, Ixtahuaca de Cuahutemoc y Villa de Tezontepec, entre otras, practican agricultura con agua residual en áreas de planicie de la cuenca del río de las Avenidas de Pachuca y esto se complementa con la actividad industrial en áreas fabriles de Tizayuca, Ecatepec y de la Ciudad de México (figura 4.1).

La figura 5.9, muestra isólinas de conductividad eléctrica en porciones territoriales de la Subcuenca de Zumpango y cercanas a la misma, se puede ver que la conductividad eléctrica aumenta a partir de Pachuca, con $800 \mu S/cm$, hacia Tizayuca, donde se registran 1000, para luego descender hasta 400 en la región central de ésta subcuenca. Posteriormente, los valores se incrementan hacia las poblaciones de Zumpango de Ocampo, San Andrés Jaltenco y Coacalco-Ecatepec. Similarmente, el incremento de la conductividad eléctrica se hace evidente al dirigirse de los pozos del ramal Atlamica, hacia los ramales Reyes-Ferrocarril y Ecatepec. Esto indica la posibilidad de que el flujo subterráneo esté ingresando a la Subcuenca de Zumpango, desde Tizayuca y también por el suroeste (figura 5.8 y 5.9).

2.- La dirección del flujo subterráneo también se puede explicar, a partir de la diferencia de potencial que tiene el agua subterránea, pues se mueve siempre de lugares de alta energía a otros de baja energía, cuyo movimiento es causado principalmente por dos fuerzas físicas; presión y gravedad. En ésta investigación, la piezometría, se obtuvo de Huizar (1997) quien ha establecido la superficie potenciométrica para el año 1989, en las porciones NE y norte de la Subcuenca de Zumpango, y de algunas áreas cercanas a la misma, establecidas hacia la población de Pachuca (figura 5.9). Esta figura muestra una superficie potenciométrica que va de la isólinea localizada al sur de Pachuca, cuya cota es de 2280 m.a.s.n.m., hacia la cota de 2210 m.a.s.n.m. en las poblaciones de Zumpango y Tizayuca. Lo anterior de acuerdo a Huizar (1997), manifiesta que el flujo subterráneo puede ir de noreste a suroeste. La figura 5.8 representa el flujo subterráneo y su relación con la mineralización.

Finalmente, con lo antes expuesto se puede deducir que debido a los diversos orígenes, no todos los iones presentes en el agua subterránea de la Subcuenca de Zumpango tienen su origen en ella, pues pudieran estar llegando de zonas circundantes, por vía superficial a través del río de la Avenidas de Pachuca y los canales que la cruzan como el Gran Canal de Desagüe. Esto no significa que haya infiltración desde éste canal pues está revestido, pero si es posible que la haya cuando se riegan los campos agrícolas con el agua residual que lleva y posiblemente también por vía subsuperficial, como se expuso a través del flujo subterráneo.



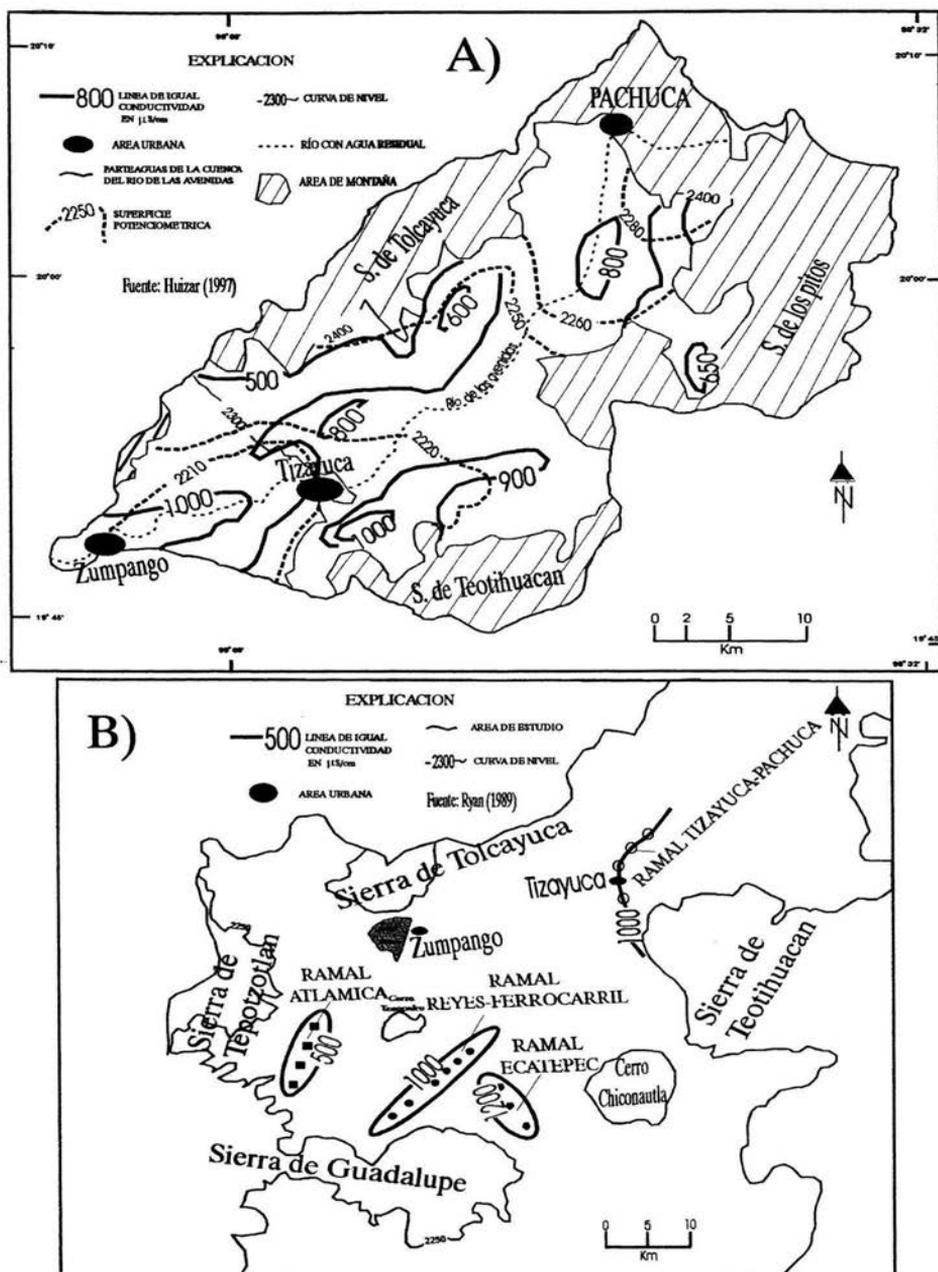


Figura 5.9 Distribución de la conductividad eléctrica en zonas cercanas a la Subcuenca de Zumpango. En A) para la región norte y NE, que es la cuenca del río de Avenidas de Pachuca y en B) para la región sur y SW, que corresponde a las zonas urbanas de Coacalco, Ecatepec y Tepoztlán respectivamente.

CAPÍTULO 6 CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA

6.1-CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA SUPERFICIAL

Antes de seguir hablando del agua subterránea, es conveniente revisar la calidad química del agua superficial usada para riego, teniendo con esto, la intención de establecer una base más firme que indique si alguna sustancia iónica presente en el agua residual, también se presenta en el agua subterránea, luego que hasta ahora se ha establecido la posibilidad de que el agua residual de riego ya está alcanzando la zona saturada.

Si se considera que no toda el agua es óptima para riego, ya que puede contener sustancias químicas consideradas tóxicas. Entonces se debe recurrir a los contenidos máximos permisibles como se muestra en la tabla 6.1 para sustancias químicas frecuentes en el agua residual de riego.

Tabla 6.1 Norma mexicana referente a sustancias químicas en agua residual para uso agrícola (en mg/l excepto cuando se indique otra unidad)

acroelina	0.1	fósforo total	5.0
aldrín	0.02	heptacloro	0.02
aluminio	0.20	manganeso	0.02
antimonio	0.1	níquel	0.05
arsénico	0.1	nitratos	30.0
bicarbonatos	100.0	nitrógeno total	30.0
berilio	0.1-0.5	plomo	0.5
boro	0.75	potasio	250.0
cadmio	0.01	pH	5.0-9.0
carbonato de sodio residual (meq/l)	2.5	RAS (relacion de absorción de sodio) en meq/l	18.0
cianuro	0.02	salinidad efectiva (meq/l)	15.0
cloruros	147.5	selenio (como selenato)	0.02
cobre	0.20	sodio	250.0
conductividad eléctrica (μ S/cm)	1000.0	sólidos totales disueltos	500
cromo	0.01	sólidos suspendidos totales	50.0
DDE	0.04	sulfatos	130.0
dieldrín	0.02	toxafeno	0.005
hierro	5.0	zinc	2.0
nitritos	6.0	radioactividad beta total (Bq/l)	1.0

Fuente: Instituto Nacional de Ecología NOM-001-ECOL-1996 (vigente)

Observese que en esta tabla se incluyen elementos traza como: metales pesados y boro, que aún en pequeñas cantidades pueden originar efectos adversos en plantas, como marchitamiento. Los iones mayores Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- y Cl^- como se ha indicado, pueden asociarse y formar sales que afectan las plantas o a las personas que las consumen, o bien reaccionar con el suelo agrícola, produciendo entre otros efectos: humedad no satisfactoria, pérdida de estructura y pérdida de permeabilidad por exceso de sodio. Así también se puede alterar la calidad química del agua subterránea cuando éstas sustancias profundizan y alcanzan la zona saturada (Gómez Lucas et al, 1992).

Con la información anterior y como indican Canovas (1990) y Gómez Lucas et al, (1992), la calidad química del agua para riego está controlada básicamente por las siguientes características:

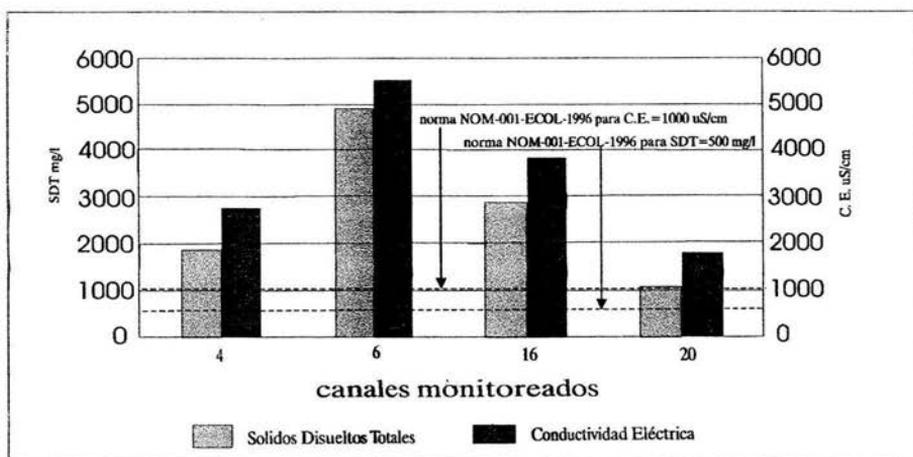
1.-Salinidad

2.-Sodicidad

3.-Metales pesados y boro

De acuerdo con Doménico y Schwartz (1990), dos métodos de análisis del agua residual que muestran su grado de salinidad son i) sólidos totales disueltos y ii) conductividad eléctrica. La figura 6.1 muestra los valores de ambas determinaciones para agua residual, de los canales principales que cruzan ésta subcuenca (canales 4, 6, 16 y 20 de la figura 5.2).

Figura 6.1 Gráfica de concentración de Sólidos Totales Disueltos y valores de Conductividad Eléctrica en agua residual para el año de 1997



Como se ve en la figura anterior, el agua residual está fuera de la normatividad establecida, que es de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para conductividad eléctrica y 500 mg/l para sólidos disueltos totales. Desde luego esto parece normal, sabiendo que es agua residual sin tratar. Sin embargo, es importante considerar que la sal más abundante generada por dicha agua es el NaCl, luego que los iones sodio y cloruro son los de mayor concentración en el agua residual de ésta subcuenca. Esto tiene la desventaja, de que si es depositada en el suelo con el riego, y no es utilizada por las plantas, cabe la posibilidad de que llegue a la zona saturada, pues como se indicó en el capítulo tres es una sal muy soluble y al contacto con el agua, se disocia en los iones Cl^- y Na^+ , siendo el Cl^- , el que puede profundizar más. Debido entre otros factores, a su débil fuerza de retención en el complejo arcillo-húmico del suelo.

Es probable que esto le suceda también a las sales: Na_2HCO_3 , Na_2SO_4 y KCl, es decir, que se disocian en sus iones respectivos, pero estos son retenidos con mayor fuerza por dicho complejo, a causa de que existen pocas cantidades de SO_4^{2-} y K^+ en el agua subterránea de ésta subcuenca.

Con lo antes expuesto, se puede indicar que los cloruros ya alcanzaron la zona saturada. Quizá no sea aventurado afirmar esto, pues en el agua subterránea los resultados de análisis químico para éste ion sugieren que existe algún arribo de ellos a causa del agua superficial y meteórica (figura 5.7), ya que como se ha establecido, no existe ion cloruro en las rocas del subsuelo de la Subcuenca de Zumpango.

En cuanto a la sodicidad, determinada por la relación de adsorción de sodio -RAS-, los puntos de muestreo: 16 y 20 (figura 5.2), tienen valores que alcanzan el límite de la norma que es 18 meq/l, sin que a lo largo del año se encuentren fuera de ésta.

No obstante su límite con la norma, se puede opinar que el sodio en el agua residual, está alcanzando niveles que pueden afectar al suelo más que al agua subterránea. Esto se explica por que los suelos Solonetz y Solonchak tienen alto contenido de sodio e importante capacidad de intercambio catiónico, cuyas superficies son regadas con agua del Gran Canal de Desagüe. Ahora bien, dado que el agua residual de dicho canal contiene sodio en cantidades importantes, es probable que éste ión sea retenido en buena medida por el complejo arcillo-húmico de ambos suelos, con la posibilidad de que ingrese al agua subterránea en poca cantidad. Lo anterior, se puede explicar al comparar los valores promedio de RAS:

*En los suelos Solonchak y Solonetz = 27 meq/l,

*En el agua residual de riego = 18 meq/l

*y en el agua subterránea = 0.5 meq/l.

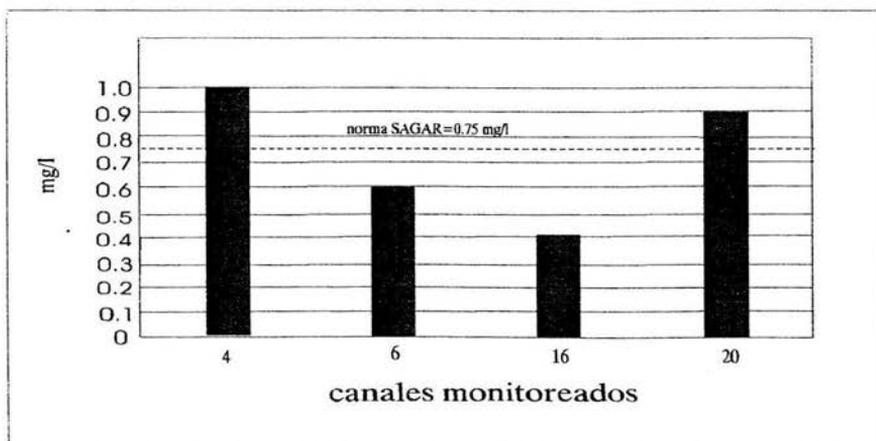
Lo que indica, que la mayor parte del sodio es retenido en el suelo y sólo una pequeña cantidad podría estar llegando al agua subterránea.

La información antes expuesta se puede resumir en la figura 6.2, en la cual se califica el índice RAS y la conductividad eléctrica del agua residual de riego en ésta subcuenca. El resultado es agua muy salina, pues sobrepasa la normativa en todos los tiempos de muestreo. Similarmente el RAS se encuentra en niveles medios a altos de sodificación, por lo que es poco recomendable su uso para riego.

No obstante ésta recomendación, algunos ejidatarios como los del ejido "La Laguna" cercano al Gran Canal de Desagüe, indican que al no tener apoyos de los gobiernos municipales o estatales para un programa de riego con agua potable, se ven obligados a dar uso continuo al agua residual. Ésta práctica agrícola, como se ha analizado, afecta no sólo al suelo, al que le da propiedades salinas y sódicas, que pueden, a su vez, afectar la calidad química del agua subterránea de la Subcuenca de Zumpango.

En cuanto al boro, el punto de muestreo 20 (figura 5.2), localizado en el Gran Canal de Desagüe, es el más relevante, pues tiene valores que promedian 1.12 mg/l a lo largo del año. Estos valores están fuera de la norma que es de 0.75 mg/l. Por esa razón, es probable que el Gran Canal de Desagüe lo capte de parques industriales y áreas urbanas de la parte NE y E de la Ciudad de México y municipios del Estado de México. Específicamente de las industrias farmacéuticas y químicas localizadas en esas zonas, como son: Laboratorios Silanes, Novartis y la división cosméticos de Procter & Gamble de México. Éste último, elabora artículos como jabones, que contienen boratos de sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y los dos primeros, elaboran artículos tales como raticidas y fármacos, que contienen compuestos a base de boranos B_2O_3 (figura 6.3).

Figura 6.3 Gráfica de concentración de Boro en agua residual para el año de 1997



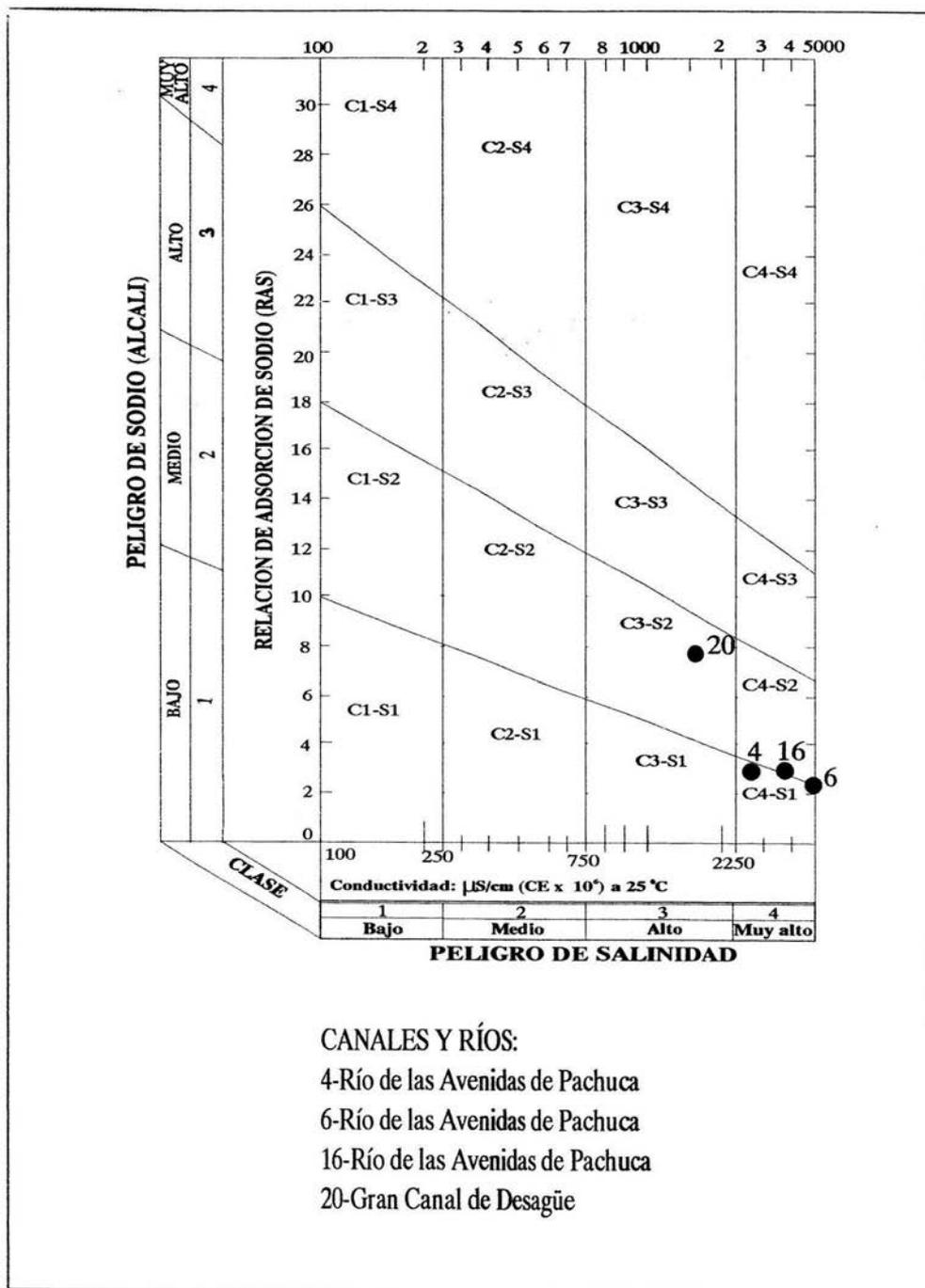


Figura 6.2 Diagrama del departamento de agricultura de E.U. para clasificación de agua de riego (promedio de siete muestreos de agua residual)

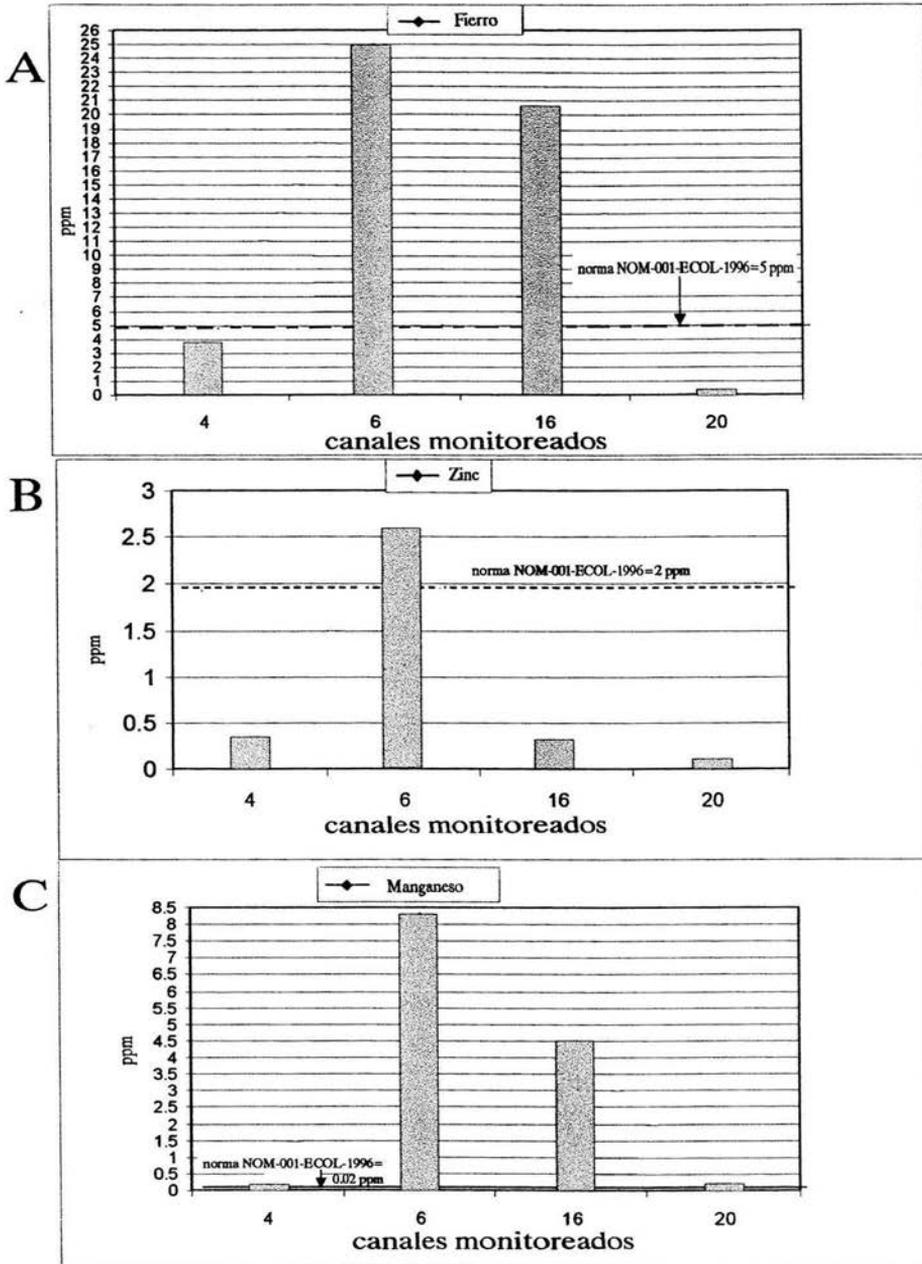


Figura 6.4 Gráficas de Fe, Zn y Mn en agua residual para el año de 1997. En A, se ve que la norma para Fe es superada por los puntos 6 y 16 de Río de las Avenidas de Pachuca. En B y C, la normativa para Zn y Mn es también superada por el punto 6. Estas elevadas concentraciones pueden explicarse por la actividad industrial, desarrollada principalmente en las poblaciones de Tizyuca y Pachuca, las cuales tienen parques industriales con fabricas metalmeccánicas, que arrojan su desagüe hacia éste río y posteriormente es usado en la agricultura.

En relación a los metales pesados en agua residual, el Cd, Cr, Co, Cu, Ni y Pb mantienen valores dentro de la norma correspondiente a cada uno a lo largo del año (figura 6.4). Esta figura, muestra que el Fe, Zn y Mn, en los canales de monitoreo: 4, 6 y 16 (figura 5.2) del río de las Avenidas de Pachuca, están fuera de la norma.

Una posible explicación, del predominio de Fe, Zn y Mn y de su alta concentración sobre Cd, Cr, Co, Cu, Ni y Pb en el Río de las Avenidas de Pachuca, es por su uso frecuente en las industrias metalmeccánicas, de los parques industriales de las Ciudades de Pachuca y Tizayuca, pues ahí existen fábricas que trabajan metales, como fierro, en la "Laminadora del Centro" en Tizayuca, e Infra, con recubrimientos de zinc, en Pachuca, cuyos desagües vierten en el Río de las Avenidas de Pachuca.

Contrariamente a lo que podríamos esperar del Gran Canal de Desagüe, éste, presenta menos concentraciones de Zn, Fe y Mn. Cuando se presentan, posiblemente son generados por industrias farmacéuticas como Schering-Plough de México, localizado en la zona industrial de Vallejo, donde se trabajan productos a base de zinc, como "Mexana" que es óxido de zinc. También Bayer y Bristol-Myers de México, entre otras que fabrican colorantes a base de dióxido de zinc, localizados en la zona industrial de Xalostoc y Vallejo respectivamente.

Finalmente, con la información antes expuesta se puede opinar, que el agua superficial no es de buena calidad química para riego y con ésta practica, existe una posibilidad real de que algunas sustancias iónicas, como cloruros, pueden estar llegando de una fuente externa al agua subterránea. Esto es el indicio más claro de que el agua superficial, aporta cloruro, específicamente a partir de una mezcla con agua meteórica, que también contiene y disuelve sales como NaCl, aportadas previamente por el agua residual; con una posterior infiltración que puede llegar a la zona saturada.

6.2 CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

6.2.1-FACIES HIDROGEOQUÍMICAS

La composición química y las facies hidrogeoquímicas -ver glosario-, están estrechamente relacionadas, debido a que la litología es la causa principal que las relaciona, aunque también pueden ser influenciadas por las actividades económicas que se han indicado anteriormente.

Los resultados de concentración de los iones mayores Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- y Cl^- , en el agua subterránea de ésta subcuenca, para la temporada seca -enero a mayo-, se han graficado en las figuras 6.5, 6.6 y 6.7. Éstas figuras, muestran la presencia de dos facies hidrogeoquímicas principales

- 1.-cálcica-magnésica-bicarbonatada y
- 2.-magnésica-cálcica-bicarbonatada-clorurada.

La existencia de estas facies está bien definida y manifiesta dos regiones geológicas e hidrogeoquímicas que imprimen sus características químicas al flujo de agua subterránea, la facie cálcica-magnésica-bicarbonatada corresponde a los aprovechamientos ubicados hacia el norte y noreste del área de estudio, relacionados con un ambiente geológico de rocas andesitas y basaltos, en donde forman parte de la recarga natural local (figura 2.5 y 5.8). Ahí los cultivos son en gran parte de temporal, de manera que no ingresa agua residual y la composición mineral de éste agua se origina de las plagioclasas y ferromagnesianos que constituyen dichas rocas.

La facie magnésica-cálcica-bicarbonatada-clorurada se presenta en los pozos situados en la planicie, corresponde a las regiones centro y sur que extraen agua, de materiales granulares de textura variable, como se expuso va desde arcilla a grava-conglomerado. En esta parte del área de estudio se practica la agricultura de riego con agua residual principalmente.

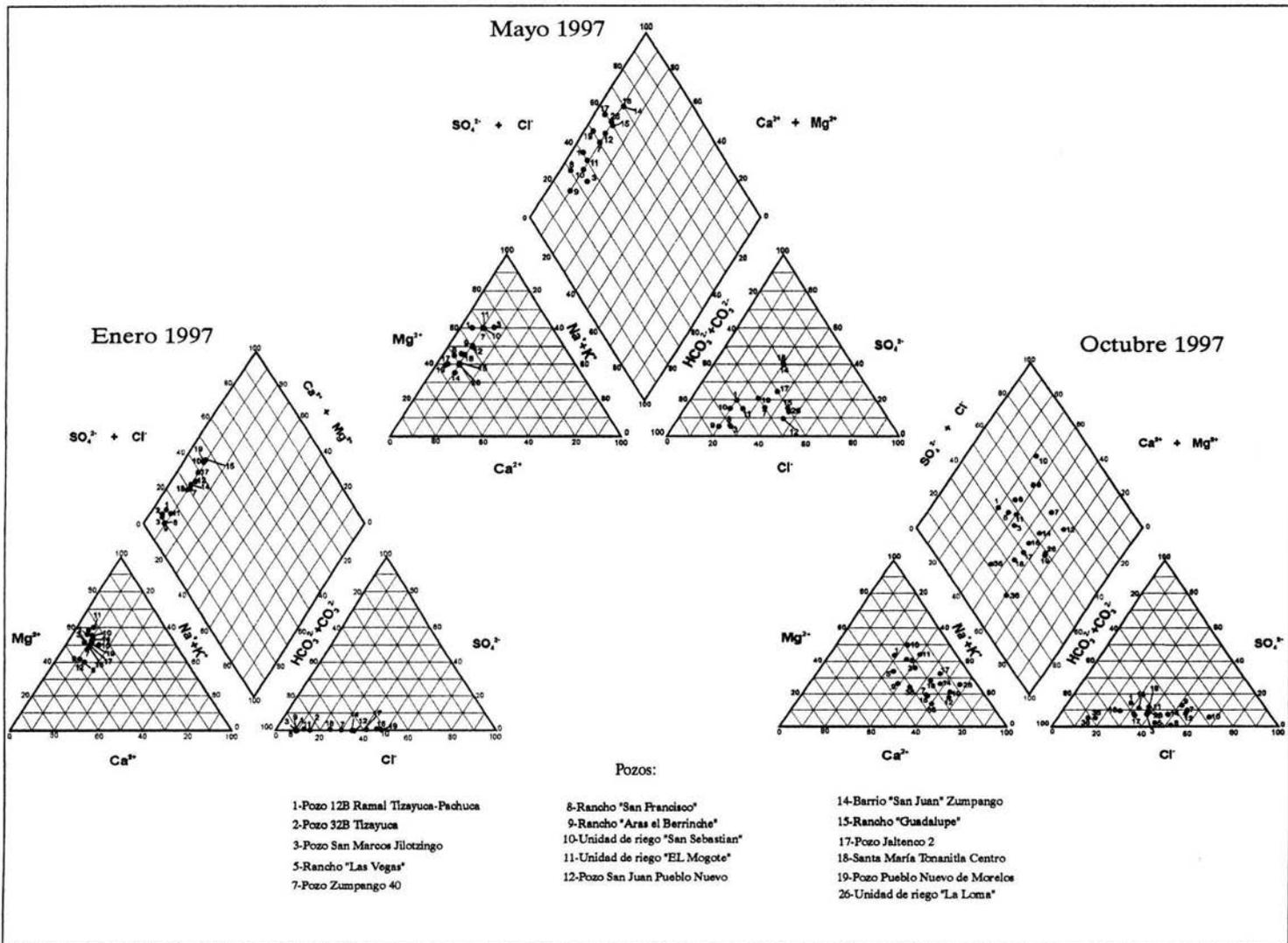


Figura 6.5 -Principales mezclas de agua subterránea y su evolución temporal en 1997 mediante diagramas de Piper

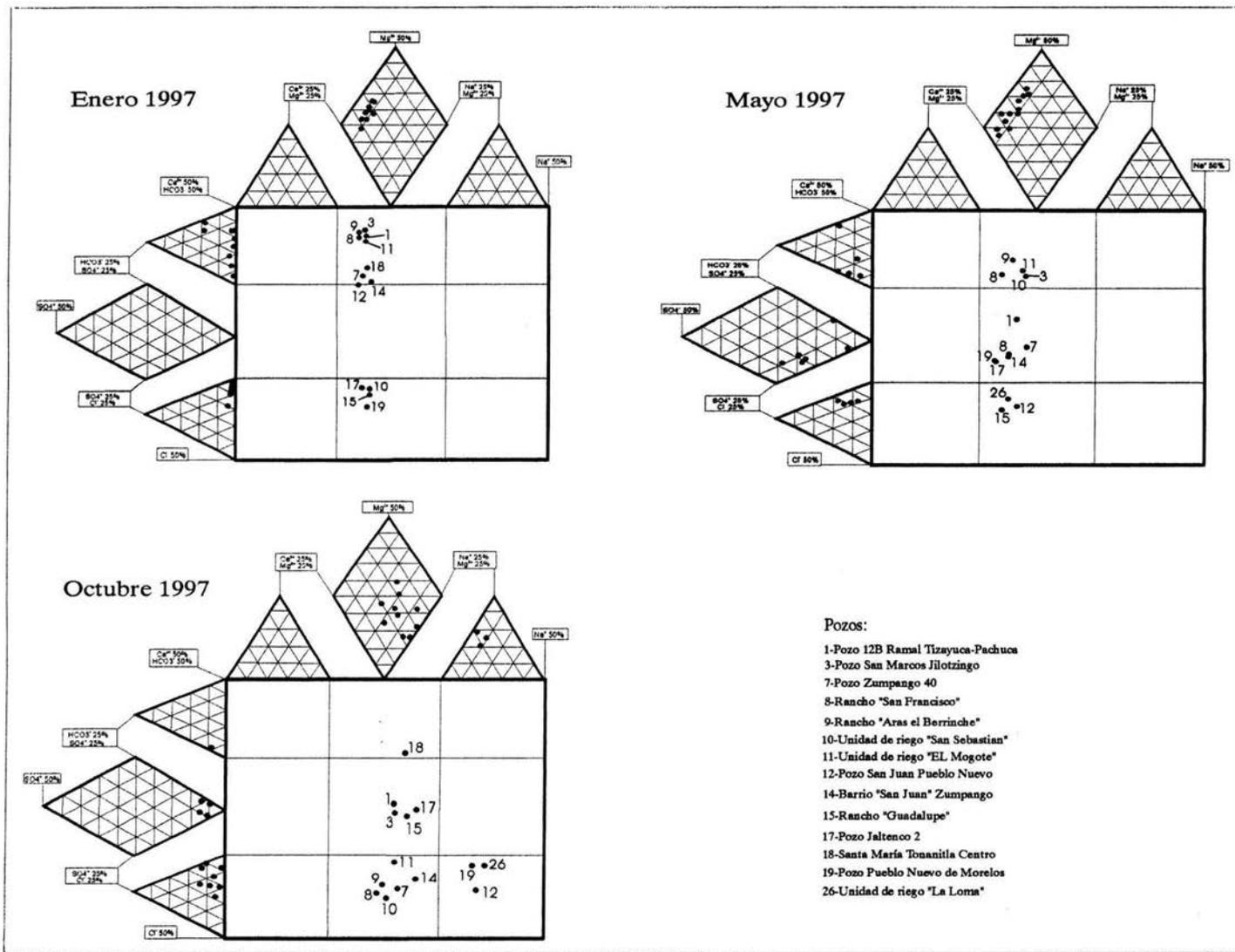


Figura 6.6 -Principales mezclas de agua subterránea y su evolución temporal en 1997 mediante diagramas de Durov

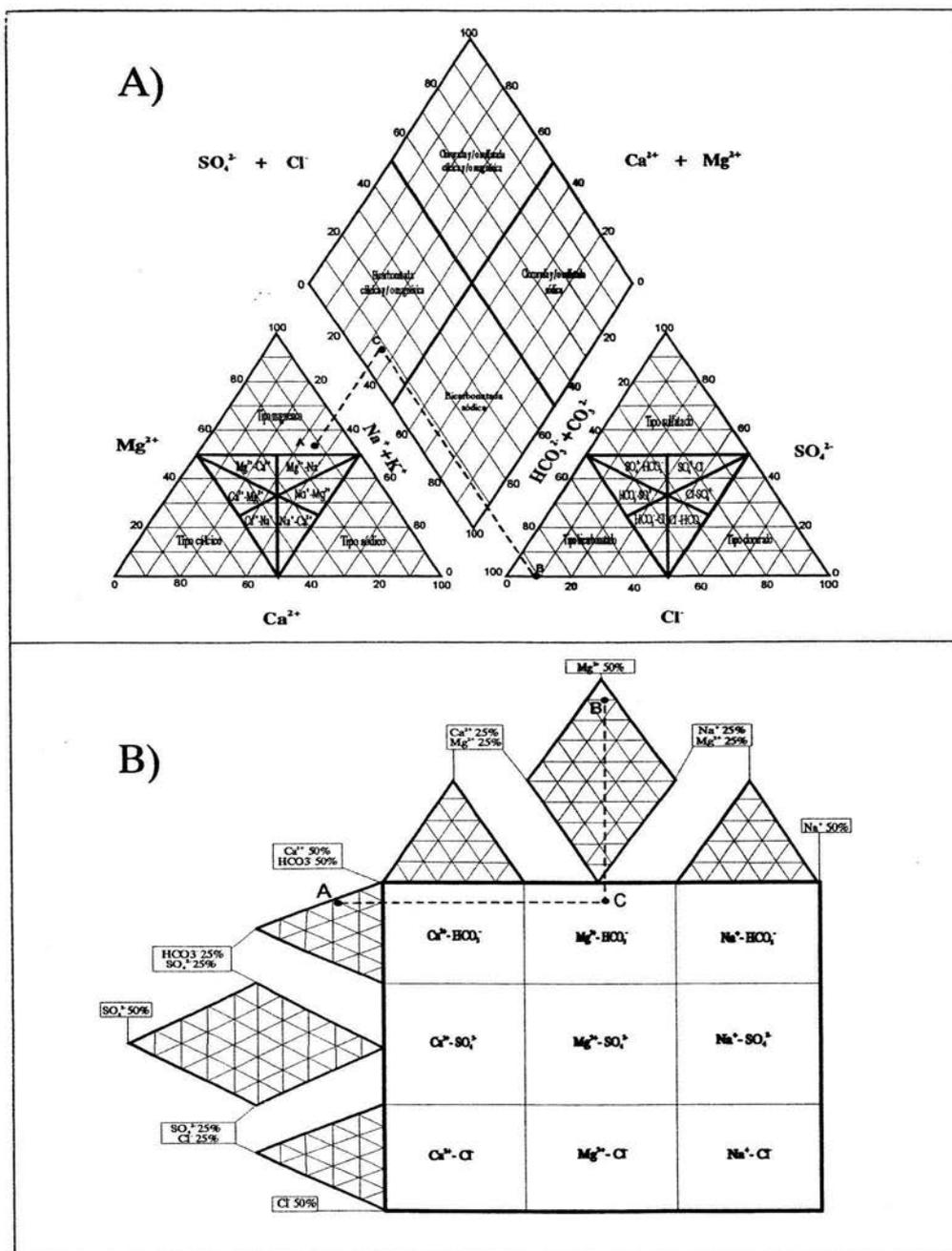


Figura 6.7 Principales mezclas de agua subterránea. En A) diagrama de Piper y en B) de Durov. los números que rodean a cada triángulo y a los rombos son porcentajes de meq/l de iones mayores. En ambos diagramas si el punto A y B de los triángulos se intersectan en el rombo, se obtiene el punto C y se ve a la mezcla predominante en una muestra de agua.

Las características hidrogeoquímicas del agua de los aprovechamientos de ambas facies se mantiene prácticamente constante durante todo el periodo seco -enero a mayo-, observándose tan sólo, sensible tendencia hacia una facie más clorurada

Posteriormente, a mediados de junio, llega la temporada de lluvias y se empieza a ver un cambio en la mezcla de agua subterránea predominante, pues se da una tendencia hacia la facie magnésica-cálcica-clorurada, que es constante hasta julio. Dicha facie, se observa principalmente, en los pozos: 14, 15, 17, 18 y 19 de la región oeste de ésta subcuenca (figura 5.2). El cambio de bicarbonato a cloruro, como anión principal, se debe probablemente a la suma de cloruros que han sido aportados previamente en temporada seca con el agua residual y los que aporta el agua meteórica. Los cloruros, depositados en el suelo con el riego, quizá en forma de sales como el NaCl entran en solución con los del agua de lluvia, llegando probablemente a la zona saturada (figura 5.7). Esto sucederá principalmente en áreas agrícolas que usan agua residual todo el año, entre otras, los ejidos: Ojo de Agua, Loma Bonita y Santa Cruz con sus cárcamos y el ejido La Laguna, que obtiene agua residual del Gran Canal de Desagüe. Por ésta razón, como se ha indicado, se puede deducir que si el flujo subterráneo llega de fuera de los límites físicos de la Subcuenca de Zumpango, una parte de los cloruros existentes en el agua subterránea podrían ser de origen antrópico. Esto podría explicarse, si se considera que hay uso de agua residual en las poblaciones ya mencionadas de la Cuenca del Río de las Avenidas de Pachuca y del área oeste de ésta subcuenca, donde respectivamente Huizar (1997) y Ryan (1989) suponen infiltración de Cl⁻ a partir de dicha práctica agrícola.

A mediados de octubre ya finalizando la temporada de lluvias, se observa un cambio en la mezcla de agua predominante pues se presenta una sensible tendencia hacia la facie sódico-clorurada en los pozos 7, 12 y 14 de la zona oeste y hacia la sódico-bicarbonatada en los pozos 15, 17, 18 y 19 de esa misma zona (figura 5.2, 6.5, 6.6 y 6.7). El cambio de calcio y magnesio por sodio como catión principal, se debe probablemente a:

Los suelos agrícolas en éstas partes, como se ha indicado, son sódico-salinos, por ejemplo, el Solonchak y Solonetz, y salinos como el Vertisol y Cambisol. Estas características de acuerdo con Girón (2002), las obtienen principalmente del agua residual vertida sobre ellos. En consecuencia alguna cantidad de sodio que puede ser disuelto con agua de lluvia llegará a la zona saturada aunque en bajas concentraciones, pues los valores de sodio se mantienen bajos, sólo incrementados al final de la temporada de lluvias que es en octubre (figura 5.7). Esto se puede explicar por los altos valores de relación de absorción de sodio -RAS-, que en los cuatro suelos arriba mencionados tienen un valor promedio de 28, alcanzando hasta 185 en el Solonchak (tabla anexa de resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002)). Lo anterior muestra que la mayor cantidad de sodio en el agua de riego es retenido en el complejo arcillo-húmico del suelo y cantidades relativamente bajas ingresan al agua subterránea. Aunque esto se detalla más adelante, se puede adelantar que en la misma, el RAS se mantiene con valores de menos de 0.5, sólo incrementados al final de la temporada lluviosa que es en octubre, en donde se presentan valores promedio de 5.

Por su parte, los pozos 8, 9, 10 y 11 de la región central (figura 5.2), tienden hacia la facie magnésica-cálcica-clorurada (figura 6.5, 6.6 y 6.7). Dicha área, como se ha establecido, presenta riego con agua de pozo, localizada en formaciones aluviales, con suelo de tipo Feozem, de textura arenosa, con permeabilidad moderada a alta y con buen drenaje interno. Estas características físicas indican la posibilidad de que el cloruro muy soluble en solución acuosa, traído con el agua de lluvia y agua residual, ingresa en el suelo y posteriormente al agua subterránea.

Por último, los pozos 3 y 5 (figura 5.2), se mantienen todo el año en la facie magnésica-cálcica-bicarbonatada (figura 6.5, 6.6 y 6.7). Estos se ubican en zona de riego con agua subterránea, hacia la margen norte de ésta subcuenca, donde existen algunas elevaciones de poca altura pertenecientes a la Serranía de Tolcayuca (figura 2.5 y 4.1). Esto, implica, que el agua subterránea fluye por las asociaciones

de roca volcánica, que en ese lugar son principalmente basaltos y andesitas y éstas como se ha indicado, proporcionan cantidades importantes de calcio y magnesio.

Noviembre marca la llegada de la nueva temporada seca en la Subcuenca de Zumpango, iniciándose un nuevo ciclo en la composición química del agua subterránea. Probablemente, en esta temporada la composición química en todos los pozos iniciará nuevamente una tendencia paulatina hacia la facie cálcica-magnésica-bicarbonatada, regida principalmente por la disolución de rocas del subsuelo, que posteriormente cambiará con la adición del riego y lluvia; en la de lluvias.

Cabe mencionar, que cuando se da cambio de facies hidrogeoquímica en el agua subterránea, no es estrictamente radical, pues aunque si se nota, los iones dominantes que determinan el cambio apenas rebasan el 50% del contenido iónico total en meq/l; siendo éste, el porcentaje límite que indica el cambio de una facie a otra (figura 6.7). Para ejemplificar lo anterior, con relativa claridad las figuras 6.5 y 6.6, muestran el cambio que se presenta de mayo a octubre, donde el Cl toma el lugar del HCO_3^- con un porcentaje promedio de 60% en los pozos 14, 15, 17, 17", 18 y 19 de la región oeste de ésta subcuenca. Este cambio de facie aunque pequeño, evidencia que probablemente el agua subterránea de la Subcuenca de Zumpango está siendo afectada químicamente por la llegada de iones de agua superficial y/o meteórica.

La última posibilidad es que los pozos de la parte sur -pozos 29, 33, 23 y 32-, entre otros más de la figura 5.2, extraen agua de un sistema de flujo que está a mayor profundidad, la cual es apoyado por la temperatura del agua de esos pozos, razón por la cual se trata de un agua con mayor mineralización.

Para ilustrar un poco más el cambio de facies en ésta subcuenca, la figura 6.8 muestra un ejemplo en dos etapas; una con riego y otra sin riego de agua residual respectivamente. El agua subterránea fluye por las asociaciones de rocas volcánicas hacia las unidades aluvio-lacustres de la planicie. Observese, que sin agua residual la facies se mantiene y cuando se mezcla con ésta cambia. Lo anterior puede ilustrar la posible evolución del agua subterránea en la zona, así como también, la presencia de una mezcla de la misma con agua meteórica y/o residual.

De la información antes expuesta, se pueden establecer las facies hidrogeoquímicas en el agua subterránea para ésta subcuenca tal como se muestra en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Facies hidrogeoquímicas de agua subterránea en la Subcuenca de Zumpango

Facies	Localización	C.E. $\mu\text{S/cm}$	STD mg/l	$r \text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$	$r \text{Cl}^-/\text{Mg}^{2+}$	$r \text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$	$r \text{Cl}^-/\text{Na}^+$	$r \text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$
Ca-Mg- HCO_3^-	Región central	< 500	< 500	< 2	< 0.8	< 2	< 2	< 0.2
Mg-Ca- HCO_3^- -Cl	Entre centro y oeste	500-1000	500-1000	2-4	0.8-1	2-3	2-4	0.2-0.4
Na-Cl- HCO_3^-	oeste y SW	> 1000	> 1000	> 4	> 1	> 3	> 4	> 0.4

r = Coeficiente de relación en meq/l

En la tabla 6.2, los coeficientes de relación entre iones mayores indican su predominio en el contenido mineral del agua subterránea; por ejemplo, la relación $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ muestra que por cada miliequivalente del ion bicarbonato existen dos de cloruro en la región central de ésta subcuenca y más de tres hacia el oeste y suroeste de la misma. En la relación Cl^-/Na^+ , por cada miliequivalente de cloruro existen dos de sodio en la porción central y más de cuatro en la oeste y suroeste, posiblemente a causa del riego con agua residual que se da en ellas.

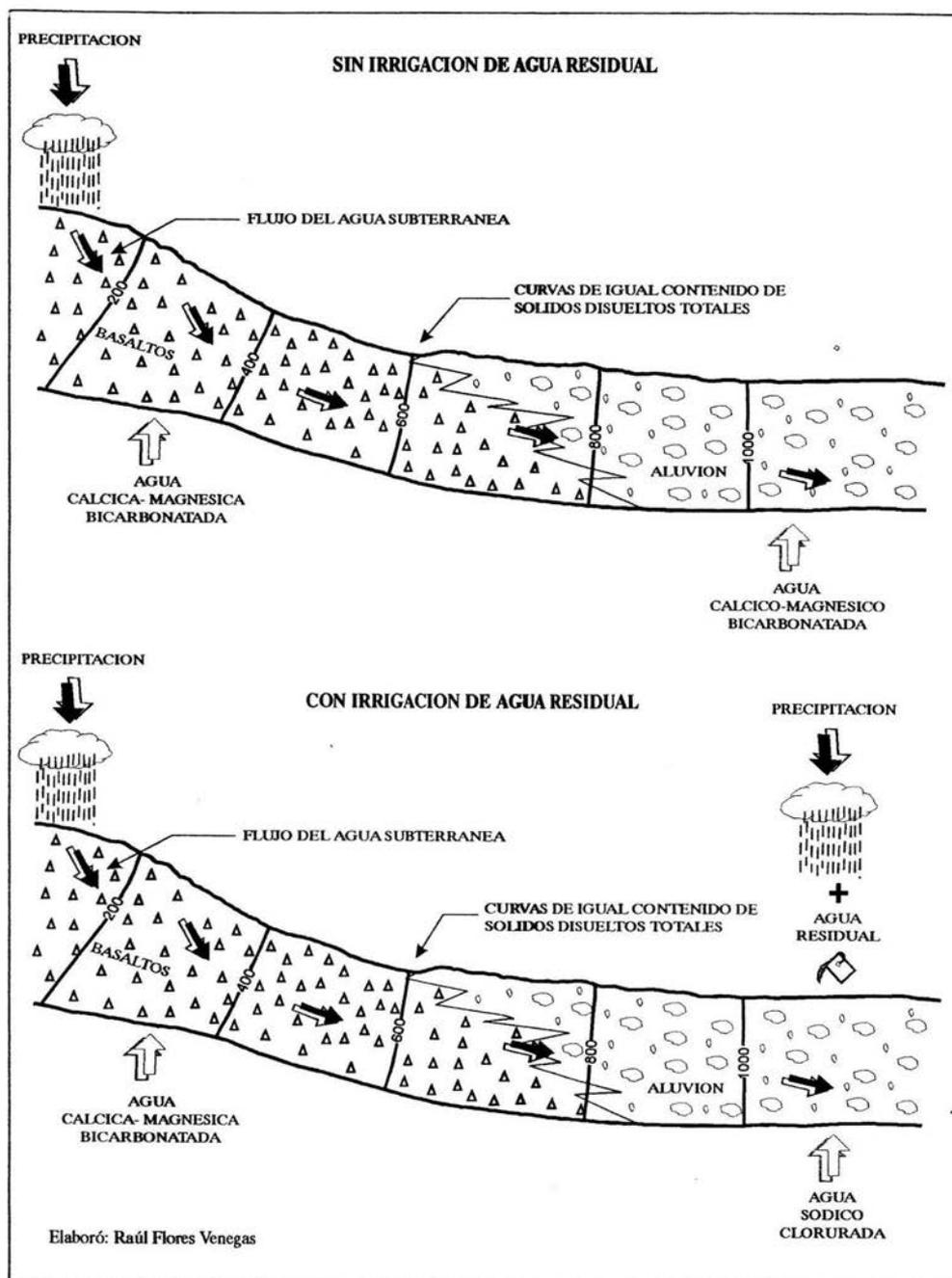


Figura 6.8 Modelo conceptual de evolución hidroquímica

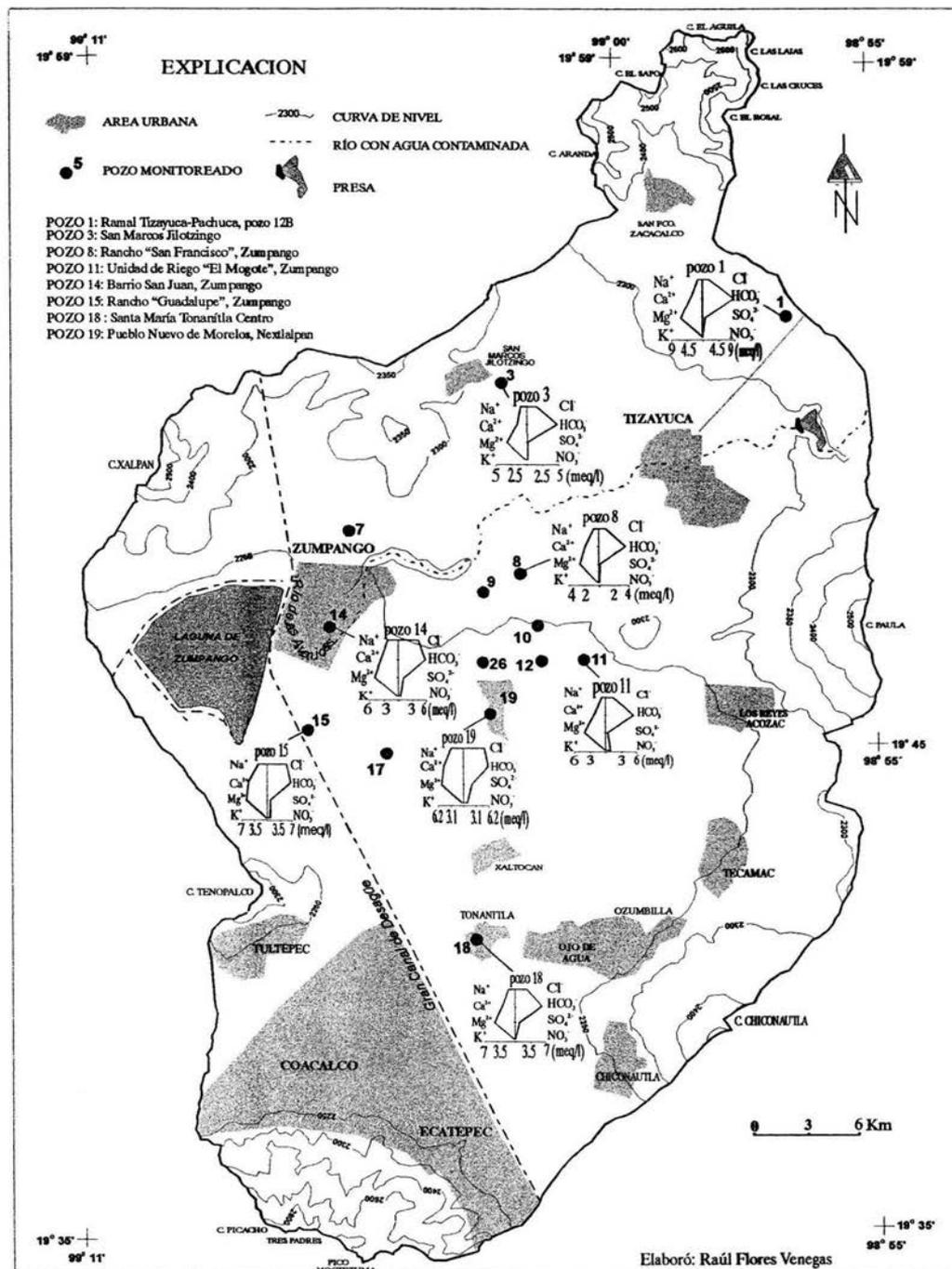


Figura 6.9 Composición química del agua subterránea, a partir del Diagrama de Stiff

Por último, la figura 6.9 representa gráficamente las características químicas del agua subterránea, observese que hacia los pozos 14, 15, 19 del oeste de esta subcuenca la composición química se incrementa, de la que resaltan los nitratos y cloruros, esto da evidencia de que el agua subterránea tiene dirección noreste-oeste y se carga de iones procedentes del agua residual aplicada en la planicie

6.2.2 NORMATIVA DE CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

No obstante que la mayor parte de los iones disueltos en el agua subterránea, son importantes para la salud del hombre, existen otros que la perjudican y por lo tanto existen límites en su concentración para consumo humano (Price, 2003). La tabla 6.3 muestra los límites permisibles de acuerdo con diferentes normas de calidad para uso doméstico.

Tabla 6.3 Normativa mexicana e internacional para potabilidad del agua (en mg/l excepto cuando se indique otra unidad)

CRACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS	SSA-MEXICO Modificación a la NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización 16 noviembre de 1999	USA-EPA 815-F-008 as may 2000	OMS Guidelines for drinking quality 2 nd ed. Vol. 2 Health criteria and other supporting information 1998 (pp.281-283) Geneva Worl health organization	Valor promedio
color	15 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto	15 unidades	15	15
olor y sabor	agradable (se aceptan aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores siempre y cuando no sean objetables desde el punto de vista biológico y químico)	n/s	n/s	n/s
turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN)	1 (UTN)	5 (UTN)	3.66
aluminio	0.20	0.05-0.20	0.20	0.20
amonio	n/s	n/s	1.5	1.5
antimonio	n/s	0.006	0.005	0.005
arsénico	0.025	0.05	n/s	0.037
bario	0.70	1.0	0.70	0.80
berilio	n/s	0.004	n/s	0.004
boro	n/s	n/s	0.5	0.5
cadmio	0.005	0.005	0.003	0.004
calcio	150	100	200	150
carbonatos totales	400	450	400	417
cianuros (como CN ⁻)	0.07	0.2	0.07	0.34
cloro libre residual	0.2-1.50	n/s	n/s	0.85
cloruros (como Cl ⁻)	250.0	250.0	250.0	250.0
cobalto	n/s	n/s	n/s	n/s
cobre	2.0	1.0	1.0	1.33
romo	0.05	0.10	0.05	0.06

Continuación....

CRACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS	SSA-MEXICO Modificación a la NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización 16 noviembre de 1999	USA-EPA 815-F-008 as may 2000	OMS Guidelines for drinking quality 2 nd ed. Vol. 2 Health criteria and other supporting information 1998 (pp.281-283) Geneva Worl health organization	Valor promedio
DDT (total isómeros)	1.00	n/s	n/s	1.00
dureza total (CaCO ₃)	500.0	n/s	n/s	500
endrín	n/s	0.0002	n/s	0.0002
fenoles o compuestos	0.001	n/s	n/s	0.001
hierro	0.3	0.3	0.3	0.3
fluoruros (como F ⁻)	1.5	2.0	1.5	1.66
fosfatos (como PO ₄ ⁻)	0.10	n/s	n/s	0.10
gamma-HCH (lindano)	2.0	0.004	n/s	1.00
heptacloro y epóxido	0.03	0.0002	n/s	0.032
hexaclorobenceno	0.01	0.0002	n/s	0.0051
magnesio	150	150	150	150
manganeso	0.10	0.05	0.10	0.25
mercurio	0.001	0.002	0.001	0.004
mercurio	0.001	0.002	0.002	0.0016
metóxícloro	20.0	0.1	n/s	10.05
níquel	n/s	n/s	0.02	0.02
nirtitos (como N)	1.0	1.0	3.0	1.66
nitratos (como N)	10.0	10.0	10.0	10.0
nitrógeno amoniacal	0.50	n/s	1.5	1.0
pH (unidades de pH)	6.5-8.5	6.5-8.5	6-8.5	7.5
plaguicidas µg/aldrín y dieldrín	0.03	0.0002	n/s	0.0151
plomo	0.01	0.015	0.01	0.0116
potasio	15	12	15	14
sodio	200.0	200	200	200
sólidos totales	500.0	500.0	1000	666
sulfatos (como SO ₄ ⁼)	400	250	250	300
sustancias activas al azul de metileno	0.50	0.45	0.50	0.65
trihalometanos totales	0.20	n/s	n/s	0.20
zinc	5.0	5.0	3.0	4.3

n/s=no sancionado

Las sustancias en estado ionico que indican alteración en la calidad química del agua subterránea, son:

- Los compuestos de nitrógeno: principalmente NO₃⁻ que como se estableció, es la forma más estable y soluble, también NO₂⁻ y NH₄⁺
- Cloruros
- Iones menores como F⁻, principalmente en forma de PO₄⁻ y B⁻
- Algunos metales pesados de interés toxicológico como: Cd, Pb, Cr y Co
- Detergentes y pesticidas

Las determinaciones químicas, muestran que en cuanto al ion nitrato, todos los pozos se mantienen dentro de las normas mexicana e internacionales de 10 mg/l (tabla 6.3). Cabe resaltar que los pozos 8, 9, 10, 11, 12 y 26 (figura 5.2) de la región central de esta subcuenca presentan las mayores concentraciones de este ion, como el pozo 8 que promedia 3.8 mg/l a lo largo del año. La explicación a esto es que están circundados por áreas de riego con agua residual donde el suelo de tipo Feozem de origen aluvial, con textura principalmente arenosa, y en el que se usan fertilizantes a base de nitrógeno como la urea $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, pueden oxidarse y transformarse a nitratos con la posibilidad de migrar hacia la zona saturada; esto a favor de la porosidad de las texturas arenosas.

Cabe resaltar, que el agua subterránea bajo los suelos arcillosos Solonchak, Vertisol y Solonetz contiene nitrógeno en forma de amonio, nitritos y nitratos, cuya fuente posible es el agua residual. Sin embargo, dichas formas nitrogenadas también se presentan en el agua subterránea, bajo los suelos arenosos como el Feozem, cuya fuente posible son los fertilizantes. Ahora bien, si en ambos casos existe nitrógeno, entonces cabe plantearse la siguiente pregunta ¿por qué se presenta mayor concentración de nitratos en el agua freática bajo los suelos arenosos que bajo los arcillosos?. Para la posible explicación, se puede considerar a la textura del suelo, pues la porosidad del suelo arenoso favorece la infiltración de iones solubles por su baja capacidad de intercambio catiónico.

En cuanto a los nitritos, todos los pozos monitoreados en ésta subcuenca (figura 5.2) se mantienen dentro de la norma de 1mg/l de la Secretaría de Salud de México (tabla 6.3).

Para el amonio, las concentraciones obtenidas se mantienen en la norma de 1.5 mg/l, establecida por la OMS (1998), pues la Secretaría de Salud de México (1999) y la USA-EPA (2000) no lo sancionan. Sin embargo, al ser un ión ausente en las rocas de la Subcuenca de Zumpango y presente en el agua residual usada en la agricultura, hace sugerir una vez más que el agua superficial ya está llegando a la zona saturada. Las mayores concentraciones de este ion se presentan en los pozos 8, 9, 10, 11, 12 y 26 (figura 5.2) que promedian 0.3 mg/l. También se registra amonio en los pozos 15, 17 y 19 de la región oeste (figura 5.2) donde promedian 0.5 mg/l.

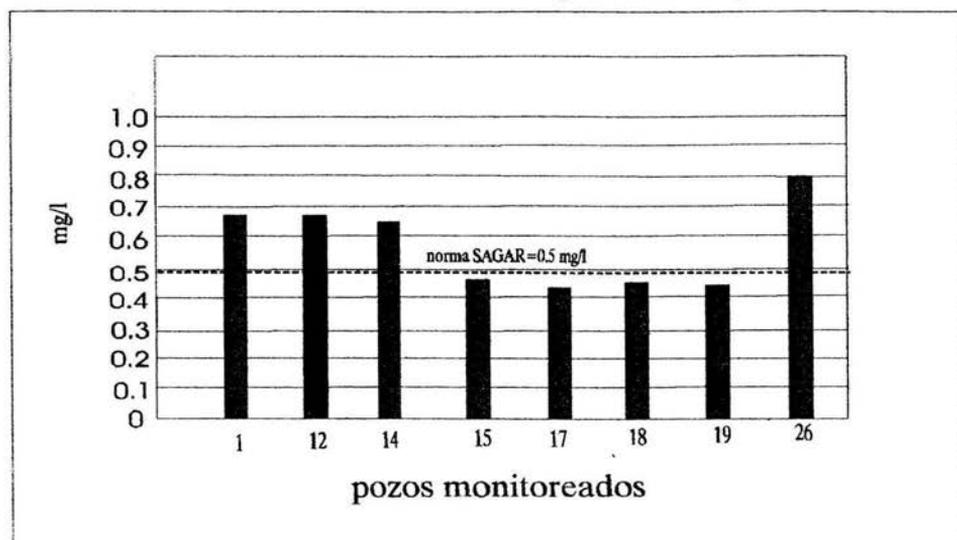
En resumen, la información antes expuesta, indica que la presencia de las formas nitrogenadas -nitrato, nitrito y amonio- coincide espacialmente en ésta subcuenca. La causa posible, es, que existen fuentes específicas superficiales ya indicadas, como son el riego con agua residual y la aplicación de fertilizantes, en puntos bien definidos de aplicación.

Como se estableció, el cloruro es un indicador de contaminación del agua subterránea y la norma nacional e internacional para este ión es de 250 mg/l (tabla 6.3). Como se ve en la figura 5.7, los pozos 8, 9, 14, 15, 17, 18 y 19 de la figura 5.2 la cumplen en temporada seca -enero a mayo-, pero al llegar la de lluvias, estos mismos pozos empiezan a elevar sus concentraciones, algunos saliendo de la norma como el pozo 14 que en octubre presenta 306 mg/l y el pozo 15 en ese mismo mes tiene 262 mg/l. Como se ha mencionado, este incremento en temporada de lluvias es originado por que el agua meteórica disuelve en el suelo las sales de NaCl aportadas con el agua residual en temporada seca, de manera que las disocia y los cloruros llegan al agua subterránea.

Respecto al boro, los pozos 1, 12, 14, 15, 17, 18, 19 y 26 de la figura 5.2, tienen concentraciones fuera de la norma OMS (1998), que es de 0.5 mg/l (tabla 6.3). Sin embargo, como se ve en la figura 6.10, los pozos 14, 15 y 19 de la figura 5.2, aunque promedian concentraciones más bajas a dicha norma, tienen una variación temporal constante en temporada seca -enero a mayo-, que se incrementa al final de la de

lluvias, en octubre. Una explicación a esto es, que se infiltra con el agua meteorica que lo disuelve cuando fue aportado previamente en temporada seca con el agua residual, pues como ya se ha visto, lo contiene, principalmente el Río de las Avenidas de Pachuca. De esto se deduce que su origen principal es el agua residual.

Figura 6.10 Gráfica de concentración de Boro en agua subterránea para el año de 1997



El límite para el fósforo por la norma mexicana es de 5 mg/l (tabla 6.3) y, todos los pozos de esta subcuenca la cumplen, están dentro de ella. Aún cuando los pozos de la región oeste, 15 y 19 de la figura 5.2 presentan las más altas concentraciones, promediando 2.5 mg/l, no rebasan la norma nacional. Esto se explica, por que el fósforo es poco soluble y seguramente es retenido por el complejo arcillo-húmico y por las plantas, que lo utilizan como nutriente; esto reduce su presencia y concentración en el agua subterránea.

Respecto a los metales traza: Cu, Co, Cr, Cd, Ni, Fe, Mn, Pb y Zn, se mantienen dentro de las normas respectivas de la Secretaría de Salud de México y de la normativa internacional (tabla 6.3). Esto significa que aún cuando algunos metales como el cobalto, que están considerados como iones que alteran la potabilidad del agua, presentan escasas concentraciones en agua subterránea, pues como ya se expuso, las rocas los contienen sólo como asociaciones de minerales, siendo difícil que entren en solución acuosa. Asimismo, no se registra un incremento significativo en relación a su variación temporal. Sólo el Fe, Mn y Co, aumentan ligeramente sus concentraciones en temporada de lluvias. La baja concentración de metales pesados en agua subterránea, revela nuevamente el poder de retención del suelo en la zona no saturada; pues como se estableció, tiene rangos que van de neutro a alcalino. Esto origina que los metales se precipiten sobre él y en su interior, minimizando su migración hacia la zona saturada. Por ésta razón, la infiltración de metales desde la superficie se podría omitir, deduciéndose que las bajas concentraciones reportadas parecen tener una fuente natural, es decir, que el agua subterránea las obtuvo de las rocas volcánicas del subsuelo.

6.2.3-DETERGENTES Y PESTICIDAS EN AGUA SUBTERRÁNEA

Los detergentes, frecuentemente están formados por un aditivo como el sulfato de sodio y un tensoactivo -ver glosario- como el alquil aril sulfonato de sodio, que es afín al agua (figura 6.11). El uso doméstico de los detergentes es común, por esto los desagües urbanos son una de las principales fuentes en la alteración química del agua subterránea, cuando existe migración desde el suelo (Stryer, 1995).

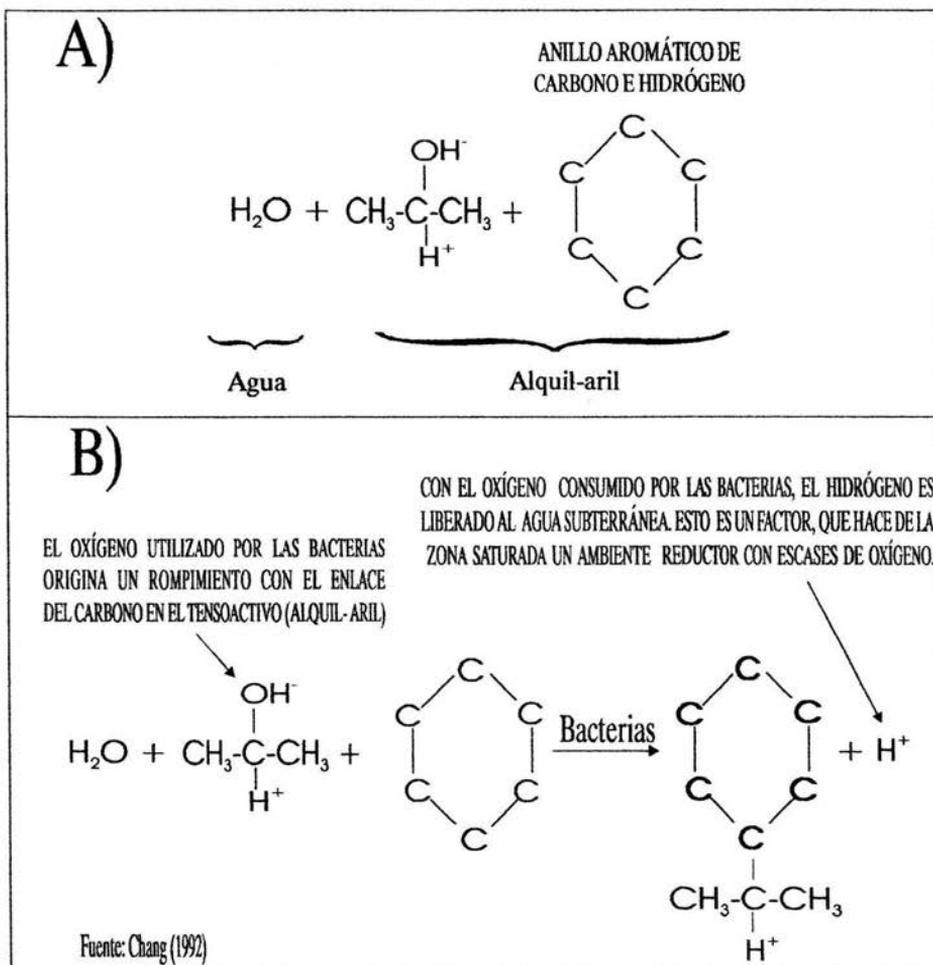


Figura 6.11 Estructura química de un tensoactivo de uso común (alquil-aril). En A) combinación de agua con el alquil-aril y un anillo aromático que complementa la estructura del tensoactivo. En B) la acción bacteriana rompe dicha estructura además de consumir oxígeno, libera hidrógeno al agua subterránea, y da a éste propiedades reductoras.

Cuando el agua contiene residuos de detergentes, estos reducen la tensión superficial del líquido en el que están disueltos. Esto significa que el tensoactivo adquiere carga eléctrica negativa, atrayendo cationes como amonio y potasio, pudiendo transportarlos conjuntamente con el agua donde está disuelto. Lo anterior, favorece la migración hacia la zona saturada de microorganismos que se alimentan de los cationes mencionados; causando mal sabor y olor, degradando así la potabilidad del agua subterránea.

Si los detergentes son capaces de llegar a la zona saturada, las bacterias anaerobias, principalmente las desulfovibriones, rompen enlaces iónicos del tensoactivo, por ejemplo, rompen el enlace que existe entre el hidróxilo con el carbono y son capaces de separar el ión hidrógeno del oxígeno (figura 6.11). Esta acción bacteriana, tiene como objetivo final obtener oxígeno, que es consumido en sus funciones vitales. En realidad, los detergentes se degradan muy lentamente, aún en ambientes reductores. Esto se debe a que el tensoactivo presenta un triple enlace, dado entre el carbono, el hidróxilo, el hidrógeno y el CH₃, haciéndolo muy resistente a la hidrólisis y a la acción bacteriana (Price, 2003). Según Rodgers (1995), se han encontrado detergentes en agua subterránea con una edad de 2 años. Los detergentes sólo son perjudiciales a la salud cuando se presentan en grandes cantidades (Custodio y Llamas, 1983). En agua subterránea, con frecuencia se reportan concentraciones muy bajas o escasas, menores a 6 µg/l (Rodgers, 1995). Pudiera ser, que por ésta razón, la Secretaría de Salud de México (1999), establece un límite de 10 µg/l para Benceno, 300 para Etilbenceno, 700 para Tolueno y 500 para Xileno (tabla 6.3), que son los hidrocarburos aromáticos frecuentes en tensoactivos y pesticidas. Dada su baja concentración, se juzgó innecesaria su determinación en el agua subterránea de ésta subcuenca.

6.2.4. MICROORGANISMOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

Hasta ahora se ha visto, el efecto de algunas sustancias químicas que alteran la calidad química del agua subterránea, pero, cabe analizar ahora, a otro factor que puede alterarla. Se trata de los microorganismos, que según Kemmer y McCallion (1989), se encuentran frecuentemente en el agua y por su causa mueren 7 000 000 de personas al año (OMS, 1998).

Como se estableció en el capítulo tres, las propiedades físico-químicas del suelo, ejercen una acción protectora al agua subterránea, pues lo hacen actuar como un filtro donde, por un lado se reduce la cantidad de sustancias en estado iónico que pudieran llegar a la zona saturada y por otro, la cantidad de microorganismos que aporta el agua residual aplicada con el riego. Aún con ésta acción protectora del suelo pueden presentarse bacterias aerobias como aerobacter y tiobácilos en la zona no saturada, y anaerobias como desulfovibrion y clostridium en la zona saturada. De éstas últimas, como se verá más adelante, su concentración es escasa en el agua subterránea.

Sin embargo, existen algunas más, que, desde el punto de vista de potabilidad del agua son más peligrosas, se trata de los microorganismos coliformes que son un género de la familia enterobacteriáceas como la Escherichia Coli, Citrobacter, Klebsiella y Enterobacter. Éstas son bacterias aerobias termotolerantes, es decir, viven en ambientes con presencia de oxígeno, necesario para desarrollar sus funciones vitales, a temperaturas promedio de 44 °C. Son también coliformes, todos los bacilos aerobios como la Shigella y anaerobios Gram negativos, no esporulados -sin esporas- como la Gallionella, que producen fermentos en agua a 37 °C en menos de 48 horas (Cienfuentes et al, 1993, Schaechter et al, 1994).

Los coliformes antes mencionados, cuando son ingeridos en agua, provocan enfermedades en el hombre, siendo las más frecuentes; diarreas, infecciones en el tracto urinario y fiebre tifoidea, cuyos síntomas se manifiestan en menos de 48 horas. Ésta es, según los operadores de los pozos de bombeo, una de las razones principales por las que el agua destinada a uso doméstico es clorada durante su distribución en ésta subcuenca.

Finalmente, sólo como punto de comparación y para tener una idea de la cantidad de microorganismos presentes en el agua subterránea, la tabla 6.4, muestra el reporte de dos análisis microbiológicos. Con el número 1, el realizado por Kemmer y Mc Callion (1989), donde se indican las bacterias frecuentes en el agua subterránea y sus concentraciones, y con el número 2, el de Ruíz (1996), donde se considera la totalidad de coliformes. Ambos análisis por el método del número más probable (NMP). Ésta es una técnica frecuente de análisis microbiológico, que consiste en identificar y cuantificar microorganismos cuando están en medio acuoso o en lactosa (Schaechter et al, 1994).

Tabla 6.4 Concentración promedio de bacterias frecuentes en agua subterránea

1.-Análisis microbiológico en un pozo de bombeo de la cd de Irving, Texas, E.U., por Kemmer y Mc Callion (1989).				2.-Análisis microbiológico en un pozo de bombeo del municipio de Tepotzotlán, Edo. de México, por Ruíz (1996).			
Las cantidades en número de microorganismos por 100 ml							
Bacterias aerobias		Bacterias anaerobias		Coliformes totales por el método del número más probable (NMP) Las cantidad en número de microorganismos por 100 ml 0.0			
Escherichia coli	150	Desulfovibrio	20				
Flavobacterium	no	Clostridium	No				
Mucoids	No	Sphaerotilus	No				
Aerobacter	No	gallionella	no				
Pseudomonas	no						
Bacterias formadoras de esporas							
Subtilis	No						
Cereus	No						
megtherium	no						

De la tabla 6.4, cabe resaltar una diferencia entre ambos análisis: Kemmer y McCallion (1989), sí detectaron microorganismos por que analizaron agua subterránea sin clorar y Ruíz (1996) no los reportó, pues analizó después de haberse clorado.

En resumen, con la información anterior se puede deducir, que el agua subterránea contiene microorganismos siempre y cuando haya alimento disponible para ellos. En el caso de ésta subcuenca, no se conocen las cantidades existentes de ellos, ni las que se pudieran eliminar con la técnica de desinfección -cloración-. Sin embargo, es seguro que existen concentraciones de bacterias que varían de un lugar a otro, pues aunque esto se explica más adelante, se puede adelantar que se están reportando enfermedades por bacterias, lo que significa que la frecuente cloración, sólo minimiza el contenido de microorganismos en el agua subterránea; tal como se ve en el análisis de Ruíz (1996).

6.2.5-EFECTOS EN LA SALUD POR ANIONES, CATIONES Y METALES PESADOS ENCONTRADOS EN AGUA SUBTERRÁNEA

Las sustancias iónicas que se han analizado anteriormente consideradas como tóxicas y aún las que no lo son como los cationes mayores, pueden provocar efectos en la salud una vez que sobrepasan la norma respectiva. Esto se debe a que las sustancias iónicas que se utilizan como materia prima en los procesos industriales, son en su mayor parte fabricadas y utilizadas por los países industrializados; en tanto, los que están en desarrollo como el nuestro también las utilizan para sus procesos industriales, pero son altamente dependientes de la información referente al riesgo a la salud y al efecto sobre los recursos naturales como el agua y el suelo, y por lo mismo, se conocen con retardo, en ocasiones prolongado mañosamente por el país de origen o por el receptor, en función de conveniencias económicas inadmisibles.

La Secretaría de Salud de México (1999), considera como sustancias tóxicas a 230 de éstas, la USA-EPA (2000), a 270 y la OMS (1998), a 354. Algunas, se pueden ver en la tabla 6.3. De varias, ya se conoce con relativa claridad su efecto en el hombre, tal es el caso del ion nitrato, que de acuerdo con el DWHE Task Force USA (1990), Palmer (1994) y Ryan (1989), es buen indicador de alteración en la calidad química del agua subterránea, pues como se ha indicado, es producto de la contaminación antrópica y biológica. De otras, como los hidrocarburos aromáticos: tolueno y xileno, aún se está conociendo su efecto en la salud, y de otras más como el diclorobenceno, que aún es necesario conocerlo más.

A continuación se indican, los efectos que pueden provocar sólo unas cuantas sustancias iónicas que son representativas en términos de salud humana y que han sido determinados en ésta investigación:

ANIONES:

COMPUESTOS DE NITRÓGENO: NITRATOS (NO_3^-), NITRITOS (NO_2^-) y AMONIO (NH_4^+)

Según Frieh y Saint Blanquant (1985), el carácter tóxico de la forma NO_3^- , se debe principalmente a su capacidad de convertirse en el interior del organismo en otras especies. La saliva contiene una enzima: la nitroreductasa, con cuya presencia y en las condiciones de pH que se producen en la cavidad bucal, permite la transformación de nitrato/nitrito. En los lactantes, sobre todo hasta los cuatro meses, esas condiciones se dan incluso en la cavidad gástrica, por ausencia de ácido. Los nitritos por su carácter reductor, son capaces de provocar una intoxicación, ocasionalmente mortal llamada metahemoglobinemia.

El otro efecto de los nitratos es su capacidad de constreñir los vasos capilares sanguíneos induciendo decremento del flujo sanguíneo e incrementando la falta de oxígeno del organismo. El diagnóstico de intoxicación en adultos por nitratos, se presenta por incremento en las velocidades de respiración y corazón, producción excesiva de saliva, debilidad, temperatura subnormal y una progresiva discoloración de la piel. Algunas personas manifiestan falta de ánimo, indiferencia, diarrea y frecuente urinación. El calentamiento del agua y su evaporación, origina la concentración de nitratos en el agua y de éste modo, se incrementa su tendencia a inducir cianosis en adultos, siendo su mayor efecto las diarreas. Las personas con disfunción renal, son blanco fácil de los nitratos, los cuales provocan cianosis y reducen el transporte de oxígeno en los tejidos de la sangre (Lu, 1992).

Por su parte, el ion nitrito, es un agente reductor, pues transforma al ion Fe^{3+} a Fe^{2+} en la molécula de hemoglobina sanguínea, formando nitrosaminas, que se pueden producir en el organismo como consecuencia de la reacción de los iones nitrito o del ácido nitroso sobre una amina terciaria o secundaria y con esto; adquiere carácter cancerígeno.

Como se estableció, los países subdesarrollados adquieren la información de riesgo a la salud que se genera en los desarrollados. En México, la literatura médica no reporta estudios referentes a efectos por compuestos de nitrógeno. Por ésta razón, para tener una idea del efecto de dichos compuestos en el agua potable, Dissanayake y Weerasooriya (1990) realizaron un estudio de la incidencia de varios tipos de cáncer en humanos, en relación a concentraciones de nitratos en Sri Lanka. Sus resultados revelan una correlación positiva y significativa de cánceres de hígado, esófago, intestino delgado y estómago. La abundancia de nitratos en agua subterránea de ciertas provincias de ese país, han sido atribuidos a fertilizantes nitrogenados, residuos industriales, humanos y animales en regiones densamente pobladas. La correlación de abundancia de nitratos y las tasas de cáncer son significativas. Sin embargo, los nitratos pueden no ser considerados como los únicos causantes en vista de que muchos otros factores inducen cáncer.

CLORUROS (Cl)

En concentraciones razonables no son dañinos para la salud, pero a más de 250 mg/l, que es la norma de Secretaría de Salud de México (1999), dan sabor salino al agua, si el catión es sodio, siendo desagradable para el consumo humano. Si éste es prolongado, provoca irritación gastrointestinal y diarreas (Plunkett, 1978, OMS, 1998).

SULFATOS (SO₄²⁻)

El efecto toxicológico más frecuente, es la laxación y la irritación gastrointestinal que provoca frecuentemente diarreas (DWHE Task Force USA, 1990). Por ello, la Secretaría de Salud de México (1999), recomienda un límite superior de 400 mg/l (tabla 6.3).

CARBONATOS (CO₃²⁻) Y BICARBONATOS (HCO₃⁻)

Son de poca importancia sanitaria, sólo en casos de aguas altamente alcalinas, son rechazadas para el abastecimiento público (Ruiz, 1996). El límite establecido es de 400 mg/l por la Secretaría de Salud.

FÓSFORO (P)

A concentraciones superiores a la norma de 5 mg/l, e ingestión crónica, puede causar efectos gastrointestinales, fragilidad de los huesos largos, puede dañar al hígado y a los ojos. El cuadro sintomático agudo por consumo de fósforo es: cianosis, cardiomiopatía, náusea, vómito y sudoración (Lewis, 1993 y De Fernicola, 1994).

BORO (B)

La toxicidad a través de la ingestión en el cuerpo humano son gastroenteritis, edema cerebral, degeneración de la grasa del hígado y riñones, anorexia y diarrea. Además, la ingestión de grandes cantidades de boro, puede afectar al sistema nervioso central originando el síndrome clínico denominado borismo (APHA, 1992).

CATIONES:

CALCIO (Ca²⁺), MAGNESIO (Mg²⁺), SODIO (Na⁺) y POTASIO (K⁺)

De acuerdo con el DWHE Task Force (1990) y OMS (1998), son nutrientes esenciales más que tóxicos en el hombre, y no presentan riesgo a la salud. Salvo en concentraciones que sobrepasen su norma respectiva (tabla 6.3) ocasionan efectos laxantes (Secretaría de Salud de México, 1999, OMS, 1998).

METALES PESADOS

No todos los metales representan riesgos para el hombre; algunos no son tóxicos, mientras que otros, aún cuando lo sean, son muy escasos o sus compuestos son insolubles. Por ésta razón, la OMS (1998) indica que, sólo unos pocos de ellos se consideran en la actualidad como contaminantes ambientales, siendo los principales: Hg, Cr, Cd, Pb, As y Co, entre otros. La tabla 6.5, muestra la producción en México de algunos que afectan la salud humana.

Tabla 6.5 Producción de los principales metales de interés toxicológico en México
(datos en Toneladas)

METAL	1980	1990	2000
ARSENICO	6922	4636	5250
CADMIO	1967	1581	1791
MANGANESO	9867	154215	160966
MERCURIO	1043	490	146
PLOMO	176597	102826	145549

Fuente: SEDESOL (2001)

La carcinogenicidad -que produce cáncer- es sólo uno de los efectos potenciales a la salud por metales y sus compuestos. Otros efectos adversos pueden manifestarse en los sistemas: inmunológico, neurológico, conductual, pulmonar, cardiovascular, renal, piel, intestinal y teratogénico (Nogawa, 1984).

CADMIO (Cd)

El riesgo de la contaminación por cadmio se ha logrado reconocer como daño para la salud, cuando existe ingesta de alimentos almacenados en vasijas y recipientes con superficies recubiertas de cadmio.

Una vez ingerido, tiende a concentrarse en las paredes del intestino delgado, en las células de la mucosa gastrointestinal. Se ha observado que los eritrocitos contienen cantidades de 60% de éste metal y se une a la metalotioneína, una proteína de bajo peso molecular. Una vez absorbido, es tenazmente retenido y se acumula principalmente en el hígado y los riñones. La concentración en la corteza renal se incrementa con la edad. Ahí su vida media se estima en 40 años y en el hígado 10 años. El órgano principal afectado es el tracto gastrointestinal, mientras que los riñones, huesos, corazón, páncreas y testículos, son afectados siguiendo una exposición crónica. Síntomas de anemia son frecuentes en personas con toxicidad crónica de cadmio y a bajas concentraciones se dan vómitos, diarreas y colitis, así como hipertensión. La detección del cadmio en el pelo, ha sido propuesto como un indicador de hipertensión. La disfunción renal causada por cadmio reduce la producción de vitamina D, cuya función es absorber calcio, pero el cadmio es un bloqueador e induce una osteomalacia. Esta enfermedad consiste en resblandecimiento óseo generalizado por disminución del calcio disponible, debido a interferencias en la función fijadora fosfocálcica con osteoporosis la cual es desosificación con disminución absoluta de tejido óseo, que da por resultado un aumento de tamaño de la médula ósea y debilidad estructural del hueso. La inhibición de síntesis de ácidos nucleicos y síntesis de proteínas se ha asociado con el cadmio. Puede atravesar la placenta y ser retenido en el feto. Un ejemplo se ha reportado en mujeres japonesas, pues en México no existen casos semejantes registrados, en donde los niveles de cadmio en el cordón umbilical fueron más altos, que en la sangre materna de mujeres embarazadas (Lester, 1987).

CROMO (Cr)

Ingerido en los alimentos y el agua, en forma de Cr^{6+} , luego, pasa a la corriente sanguínea en donde adquiere la forma Cr^{3+} y se distribuye por varios órganos: hígado, bazo y huesos. La presencia de bajas concentraciones de las formas trivalentes y hexavalentes de cromo en el ambiente es dañina para la salud, ya que causan problemas de carácter general, entre los que destacan el daño renal (Lester, 1987).

El Cr^{6+} se absorbe rápidamente en el organismo y es la forma más tóxica. La concentración aumenta con la edad, pero su vida media en el organismo se desconoce. Los efectos agudos de exposición oral incluyen corrosión del tracto gastrointestinal y necrosis del riñón. Las formas hexavalentes y trivalentes son carcinogénicas. La evidencia de esto, se da a partir de las pruebas *in vitro*, los cuales sugieren la iniciación mutagénica de las células somáticas, en interacción con el DNA. Estudios recientes con células de sangre de humanos, indican que el Cr^{6+} es reducido intracelularmente a Cr^{3+} , el cual se convierte en un agente genotóxico. En Japón, en 1975, se presentó un caso de contaminación por Cr^{6+} . El cromo se filtró a partir de residuos químicos usados en materiales para construcción hacia el agua subterránea y como resultado, localmente se extrajo agua contaminada con concentraciones de más de 2000 veces la norma oficial. Hubo más de treinta muertes (Lester, 1987). En México no se han reportado casos semejantes, pero podrían ocurrir si no se controla el uso de agua residual que lo contiene y que eventualmente podría llegar al agua subterránea.

MANGANESO (Mn)

Ingresa al organismo por absorción gastrointestinal. En la sangre es absorbido, se une a las proteínas plasmáticas y se concentra en pulmones, hígado, riñones, intestino delgado, corazón, huesos y cerebro. El óxido de manganeso tiende a concentrarse en los ganglios basales del cerebro y en el cerebelo. Esto provoca el desarrollo de síntomas neurológicos, cambios de conducta, cambios óseos en niños, lupus eritromatoso, un estado de debilidad general, anemia y problemas respiratorios. El cambio en la capacidad de concentración y de atención mental acompañado de movimientos involuntarios, señala la posibilidad de un primer nivel de intoxicación en una persona. La intoxicación aguda provoca dolores de cabeza, somnolencia, irritabilidad, debilidad y confusión mental. La sintomatología de la intoxicación crónica severa por manganeso se presenta en manifestaciones psicológicas de inestabilidad emocional e irritabilidad y cambios neurológicos como el aumento del tono muscular, posturas anómalas, temblores, voz monótona y alteraciones en el lenguaje hablado (Plunkett, 1978, OPS-OMS, 1988)

PLOMO (Pb)

Ingresa con alimentos y agua contaminados. El plomo absorbido se distribuye en todo el organismo; en la sangre, el plomo se disuelve en el plasma y se une a la hemoglobina del glóbulo rojo (eritrocito). Debido a que el plomo se distribuye rápidamente hacia otros tejidos, el aumento en la concentración de plomo sanguíneo indica una exposición reciente, por tanto, en los casos de exposiciones intermitentes y variables, el dato sobre la concentración de plomo en sangre tiene un uso limitado. El plomo se acumula en los tejidos del organismo, principalmente en tejido óseo -huesos y dientes-. Es un metal carcinogénico y los efectos sistémicos son: irritabilidad, dolor de cabeza, insomnio, anorexia, anemia, dolor muscular y en articulaciones, gastritis, afecciones al hígado y riñones por bioacumulación (Allen et al, 1993 y Lewis, 1993).

FIERRO (Fe)

El consumo de altas cantidades de hierro en dos de sus formas: Fe^{2+} y Fe^{3+} produce hemosiderosis o nemocromatosis. La primera se refiere a un incremento generalizado de hierro en los tejidos corporales, particularmente en el hígado y en el sistema retículo endotelial. La segunda presenta cambios fibróticos en el órgano afectado y pigmentación de la piel del enfermo. En altas concentraciones provoca daños a

los pulmones y está asociado a la caída de dientes. Aún se cuestiona si es cancerígeno (Buzzi, 1992 y Lewis, 1993).

ZINC (Zn)

Se absorbe vía el duodeno. Las metaloenzimas requieren de pequeñísimas cantidades para síntesis y metabolismo. Existe evidencia, de que el exceso de zinc en la sangre, se une a la albúmina y con ello se presentan síntomas de toxicidad como vómito, deshidratación, desequilibrio electrolítico, diarrea, dolor estomacal, náusea, letargo, mareo e incoordinación muscular. La dosis vomítica de zinc en el agua es de 675 mg/l. El papel del zinc como carcinogénico aún es cuestionable (Elimder, 1984).

NIQUEL(Ni)

Una vez absorbido, es transportado en la corriente sanguínea ligado a la albúmina. Durante su distribución en el organismo, el níquel forma complejos con aminoácidos, péptidos y se acumula en tejidos de órganos como el pulmón, el riñón, el hígado, glándula endocrina y cerebro. La forma más tóxica y común del níquel, es el níquel carbonil, siendo capaz de causar efectos mutagénicos una vez que se liga a los fosfatos y bases heterocíclicas de los ácidos nucleicos, pues toma el lugar de otros elementos tales como el Mg. Esto resulta en la desestabilización de la estructura helical doble del DNA y RNA que provoca una replica no exitosa (Allen et al, 1993). Es por tanto un metal bioacumulativo y carcinogénico. La distribución del níquel se da a todos los órganos con las más altas acumulación en los riñones, lo que provoca cáncer de riñón. Otros sitios de acumulación incluyen la glándula pituitaria, el hígado y los pulmones (Schneider, 1980).

El níquel, también es capaz de cruzar la barrera placentaria, pues así lo demuestra la acumulación de níquel en el feto de las madres expuestas a éste. El consumo prolongado se asocia con la caída de dientes. En un estado avanzado de ingestión provoca vómito, náusea, dolor de cabeza, debilidad y palpitaciones, en adición se ha reportado hiperniqueleemia que es concentración anormalmente alta de níquel en la sangre y ésta contribuye a la hipersensibilidad, encefalopatía y aterosclerosis (ver glosario) (Lippman, 1992).

COBRE (Cu)

Una vez absorbido es transportado en la corriente sanguínea y se acumula normalmente en los músculos, el hígado y cerebro. En casos de toxicidad aguda, se localiza en el cerebro, hígado, estómago, raíz del pelo y orina. Los niveles de cobre en el pelo reflejan su estado y cantidad acumulada a lo largo del crecimiento. Otros síntomas son úlceras gástricas, necrosis hepática, daño renal e ictericia que es una enfermedad producida por la presencia en la sangre de pigmentos biliares y caracterizada por la amarillez de la piel y conjuntivas. La toxicidad crónica en el hombre es poco frecuente pero ha sido reportada de causar la "enfermedad rosa" en infantes que ingieren agua contaminada con el metal en concentraciones de 0.8 mg/l. Se ha reportado también que niveles elevados de cobre son asociados con desordenes fisiológicos como atresia biliar caracterizada por ser una alteración que impide el buen funcionamiento de la vesícula biliar como órgano importante, no dejando secretar la bilis, también cirrosis que es un trastorno hepático con destrucción de las células del parénquima del hígado y su sustitución por tejido conectivo, y leucemia, que se caracteriza por la producción o acumulación incontrolada de leucocitos inmaduros, y en que muchas células no alcanzan la madurez -leucemia aguda- o se acumulan leucocitos maduros en la sangre por que no mueren al término de su vida media normal -leucemia crónica- y por último aterosclerosis e hipertensión. El cobre es carcinogénico comprobado en animales y en el hombre (OMS, 1998).

COBALTO (Co)

En la sangre es llevado por las células rojas de la sangre en concentraciones de 0.07 a 0.36 $\mu\text{g/l}$ de sangre. El 43% del cobalto total en el cuerpo se encuentra en los músculos, el 14% en los huesos y el resto en los tejidos blandos. Provoca manifestaciones tóxicas serias, incluyendo agrandamiento de la tiroides, myxedema es decir, una enfermedad causada por deficiencia de la tiroides e insuficiencia cardiaca congestiva, que es un estado crónico o agudo caracterizado por que el corazón no aporta el oxígeno necesario para satisfacer las necesidades corporales en infantes. Dosis excesivas han causado policitemia que es la formación excesiva de células rojas en la sangre, la cual está asociada con hipertensión. Es un metal carcinogénico (APHA, 1992).

6.3-ENFERMEDADES REPORTADAS EN EL PERIODO 1996-2003 PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

Nuestro país realmente cuenta con pocos estudios referentes a los efectos en la salud por sustancias químicas. Como hemos visto, a pesar de la existencia de una numerosa literatura de efectos en la salud por las mismas, en la práctica se restringe mucho el uso de la información obtenida. Por ésta razón, es difícil obtener datos epidemiológicos confiables. Esto se debe a los problemas de efectos aislados por uso de agua residual o por otras influencias ambientales y a la confidencialidad de los datos médicos.

Existen entonces, pocos estudios disponibles; dos de ellos, (Cienfuentes et al, 1993; 1995), demostraron concentraciones altas de Cd, Pb y Mn en la sangre y orina de un grupo de trabajadores mexicanos que practican irrigación con agua residual, en comparación con otro grupo que posee tierras de temporal. Estos trabajos sirven para ejemplificar, que existe una posibilidad real de que la salud de una parte de la población de la Subcuenca de Zumpango, puede estar afectada a partir de bacterias coliformes y contaminantes inorgánicos como metales pesados ya mencionados. En ambos casos por causa de la práctica agrícola con el agua residual.

En cuanto a agua subterránea, la Comisión Nacional del Agua (2000) estableció, desde hace algunos años, un programa de sanidad del agua para salvaguardar la salud pública. Éste incluye:

- Clorinación de las fuentes de agua que van a ser distribuidas a las poblaciones.
- Control de calidad del agua embotellada y en la fabricación de hielo.
- Control en el uso del agua residual, singularmente en irrigación de cultivos que se comen crudos, como las hortalizas.
- Promoción de la instalación de plantas de tratamiento.
- Protección sanitaria de fuentes de agua de bebida como agua subterránea y ríos.
- Control especial en las descargas de centros de alto riesgo como hospitales y laboratorios.

Como se ha indicado, el agua subterránea abastece a más de 2 000 000 de habitantes en esta subcuenca y se extrae de pozos de bombeo, siendo clorada antes de pasar a las redes de distribución. Por ésta razón, parece ser que de las anteriores medidas, la primera es la de más relevancia y aplicación por parte de las autoridades. Al resto no se les ha puesto mucha atención, pues no se tiene registro de plantas de tratamiento en la Subcuenca de Zumpango y tampoco se tiene un control de uso de agua residual, ya que como se ha expuesto, su uso es intensivo y sin ningún tratamiento previo. Además, dichas medidas están indicadas principalmente para evitar la contaminación por microorganismos.

Por otro lado, a los servicios de agua potable se les ha inscrito en el campo de la salud pública. La razón, es que siendo el agua fuente de vida también es extremadamente vulnerable a contaminarse y es, paradójicamente, vehículo para la transmisión de sustancias nocivas y microorganismos causantes de enfermedades. La salud humana depende de la cantidad de agua suministrada pero principalmente de

su calidad. Según la OMS (1998), la cuarta parte de las camas disponibles en todos los hospitales del mundo, están ocupadas por enfermos, cuyas dolencias se deben a la insalubridad del agua.

Por lo que se refiere a México, en el transcurso de los últimos 55 años la mortalidad por diarreas ha disminuido en forma sostenida. Sin embargo, las tasas de mortalidad continúan siendo muy elevadas; 39.5 por cada 100 000 habitantes. Si este dato se compara con la de los países desarrollados; 1 por cada 100 000 habitantes, entonces se observa una diferencia notable. Esta diferencia, quizá sea una evidencia, de que la potabilidad del agua es deficiente.

Según cifras del Sistema Único de Información Epidemiológica de la Secretaría de Salud (2000), el Estado de México y el Distrito Federal, acumularon casi el 31% de los casos registrados de enfermedades diarreicas en todo el país con 673 552 y 534 635 casos respectivamente.

Ahora bien, los datos anteriores y las estadísticas disponibles, son generadas principalmente por algunas instituciones de salud gubernamentales como el Instituto Nacional de Salud Pública, que esporádicamente reportan datos de frecuencia de enfermedades. Debido a la confidencialidad de los datos médicos en instituciones de salud de esta subcuenca, sólo se lograron obtener algunos de ellos en la Unidad de Medicina Familiar del Instituto Mexicano del Seguro Social de Zumpango. Este lugar proporciona servicio médico a un 70% de la población de Zumpango y localidades circundantes como San Sebastián y Pueblo Nuevo de Morelos, del municipio de Nextlalpan. El resto se obtuvo de fuentes documentadas como el de Oláiz et al, (2003). La tabla 6.6 resume éstos registros, por ejemplo en la población de Zumpango, las enfermedades gastrointestinales reportadas en el periodo 1996-2000, tuvieron los siguientes porcentajes: el 46.1% fue a causa de enfermedades infecciosas intestinales, otro 33% atribuido a parásitos intestinales y un 20.7%, provocado por enfermedades gastrointestinales de causa no definida. En relación a éste último porcentaje, no es posible precisar con detalle el origen de todas ellas, pues pueden coexistir varios posibles factores, tal como agua de bebida y alimentos contaminados regados con agua residual de los que se derivan aniones y cationes, que como se ha visto producen principalmente padecimientos gastrointestinales.

Tabla 6.6 Enfermedades gastrointestinales registradas en las principales poblaciones de la Subcuenca de Zumpango

ENFERMEDAD	Zumpango** periodo 1996-2000	Coacalco* periodo 2000-2003	Ecatepec* periodo 2000-2003	Tizauca* periodo 2000-2003
enfermedades infecciosas intestinales	634	896	1352	485
amibiasis	365	621	798	521
ascariasis	71	125	485	sin dato
colera	13	48	130	7
giardiasis	7	23	45	2
enfermedades gastrointestinales de causa no definida	285	754	652	135
suma	1375	2467	3462	1150
total			8454	

**Fuente: Instituto Mexicano del Seguro Social -Unidad de Medicina Familiar de Zumpango-

*Fuente: Oláiz et al, (2003)

De la tabla 6.6 cabe resaltar que el mayor número de enfermedades se presenta en las poblaciones de Zumpango, Coacalco y Ecatepec. Esto se podría explicar, por que en estas poblaciones los aprovechamientos contienen elevados contenidos minerales que integran sustancias contaminantes, y como se ha establecido, hacia ellas se dirige el flujo de agua subterránea, mismo que ingresa a esta subcuenca por Tizayuca, población con menor número de enfermedades que las tres anteriores.

Hasta ahora se ha mencionado la localización de algunos fenómenos físico-geográficos como la distribución de la lluvia, la mineralización del agua subterránea y la dirección del flujo subterráneo principal. De igual manera se han localizado algunos hechos físico-geográficos como la litología y los tipos de suelo. ¿Pero como pueden interactuar unos con otros en el ambiente o medio geográfico para producir enfermedades?. Con las características de los hechos y fenómenos que se han mencionado y algunos más que se indican a continuación se hace posible el establecimiento de algunas correlaciones espaciales y de esta manera poder ver causas y efectos -respectivamente riego con agua residual y enfermedades gastrointestinales por consumo de agua subterránea - en la presente investigación.

En este sentido, la figura 6.12 muestra la correlación entre la distribución de la lluvia, la litología, el flujo subterráneo, la mineralización en los pozos monitoreados, la concentración de sustancias contaminantes como nitratos y cloruros en el agua subterránea y las poblaciones con pozos en las que se ha detectado el mayor número de enfermedades gastrointestinales dentro de esta subcuenca. De esta figura se puede resumir que:

La planicie aluvial y lacustre en conjunto constituyen el área de descarga de agua subterránea. Esto significa que las áreas montañosas, que son unidades litológicas de alta permeabilidad -Qb, Tpp y Tmra- transmiten el agua meteórica hacia el agua subterránea. El agua de lluvia como se ha mencionado, ya está mineralizada desde antes de caer sobre el suelo y rocas, de manera que al infiltrarse en ellos adquiere por su insaturación más minerales disueltos. Además de esta mineralización paulatina, el agua subterránea obtiene sustancias iónicas que se infiltran con el agua residual de riego. El agua subterránea va incrementando así su contenido mineral, pues al fluir por la planicie aluvial y lacustre va integrando sustancias iónicas contaminantes como nitratos y cloruros. Por supuesto, la baja permeabilidad de la unidad lacustre retarda y minimiza la infiltración de estas sustancias, pero esto no ocurre con las unidades aluvial y cuaternaria volcánica basáltica de alta permeabilidad, por lo que existe mayor infiltración de nitratos y cloruros hacia el agua subterránea. Esto se debe a que en el suelo localizado sobre estas unidades litológicas se practica el uso agrícola de fertilizantes a base de nitrógeno que pueden aportar nitratos y estos migrar hacia el agua subterránea, incrementando su concentración en áreas urbanas con pozos de extracción continua, tal como se observa en los pozos 14, 15 y 19 de la población de Zumpango, en los cuales el contenido de nitrato y cloruro es alto en comparación con los pozos 8 y 9 del la región central. Esto es evidencia de que el flujo subterráneo favorece a incrementar el contenido de dichas sustancias en los pozos de extracción de agua subterránea. El resultado negativo que se obtiene al relacionar estos hechos y fenómenos es el concerniente a la presencia de enfermedades gastrointestinales que podrían estar siendo originadas por nitratos y cloruros en las áreas urbanas con pozos de extracción como Zumpango, Coacalco y Ecatepec. En estas poblaciones el agua subterránea contiene más de 1000 mg/l de sustancias disueltas y es ahí donde coincide el mayor número de enfermedades en esta subcuenca.

Un segundo ejemplo que muestra causas y efectos se presenta en la figura 6.13, ahí la correlación se ha establecido entre la distribución de la lluvia, las unidades de suelo, los tipos de irrigación, el flujo subterráneo, la mineralización en los pozos de monitoreo y las poblaciones con pozos en los que se

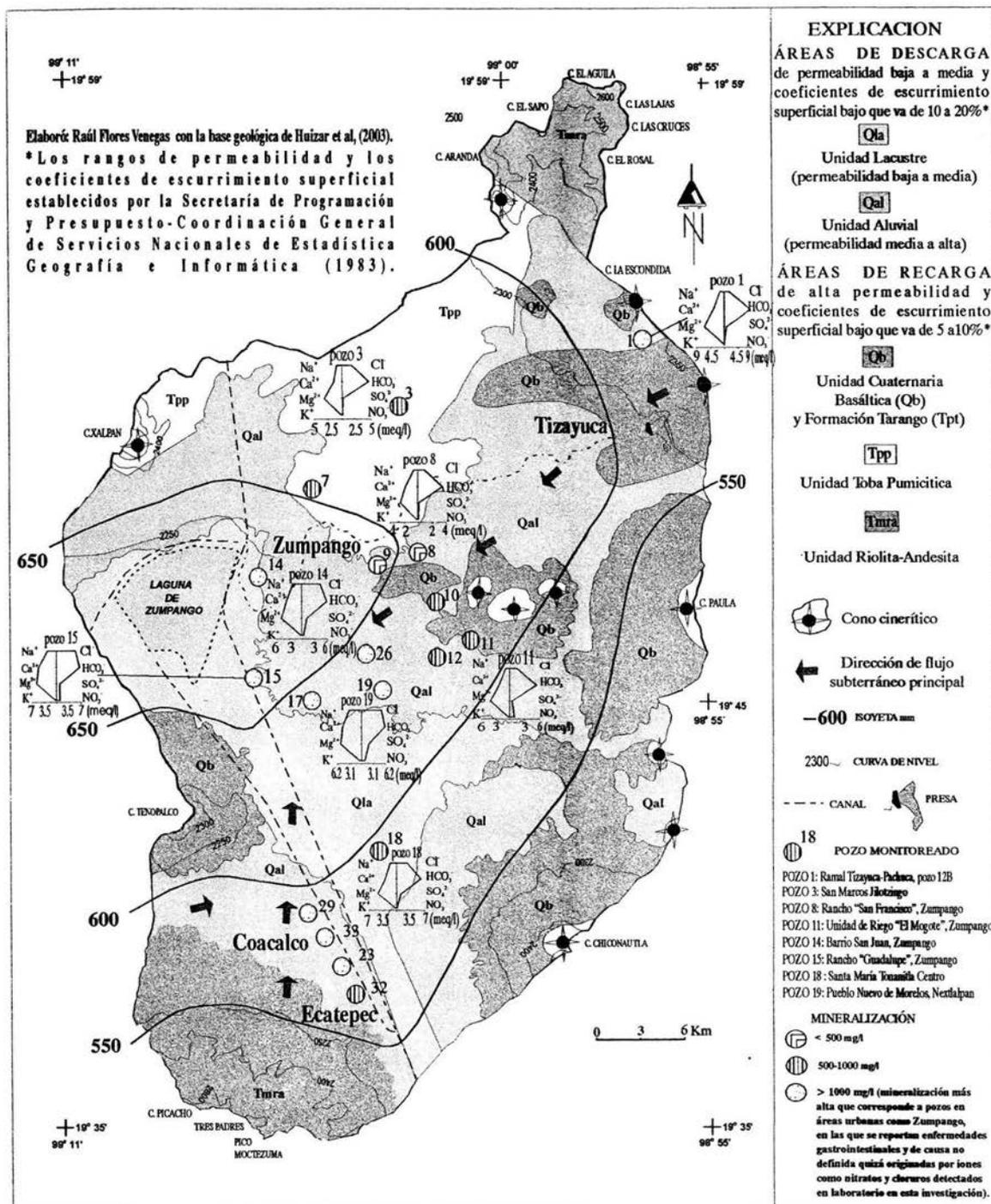


Figura 6.12 Correlación espacial entre la distribución de la lluvia, litología, flujo subterráneo, mineralización en los pozos de monitoreo, concentración de nitratos y cloruros en el agua subterránea y poblaciones con pozos en las que se reporta el mayor número de enfermedades dentro de la Subcuenca de Zumpango.

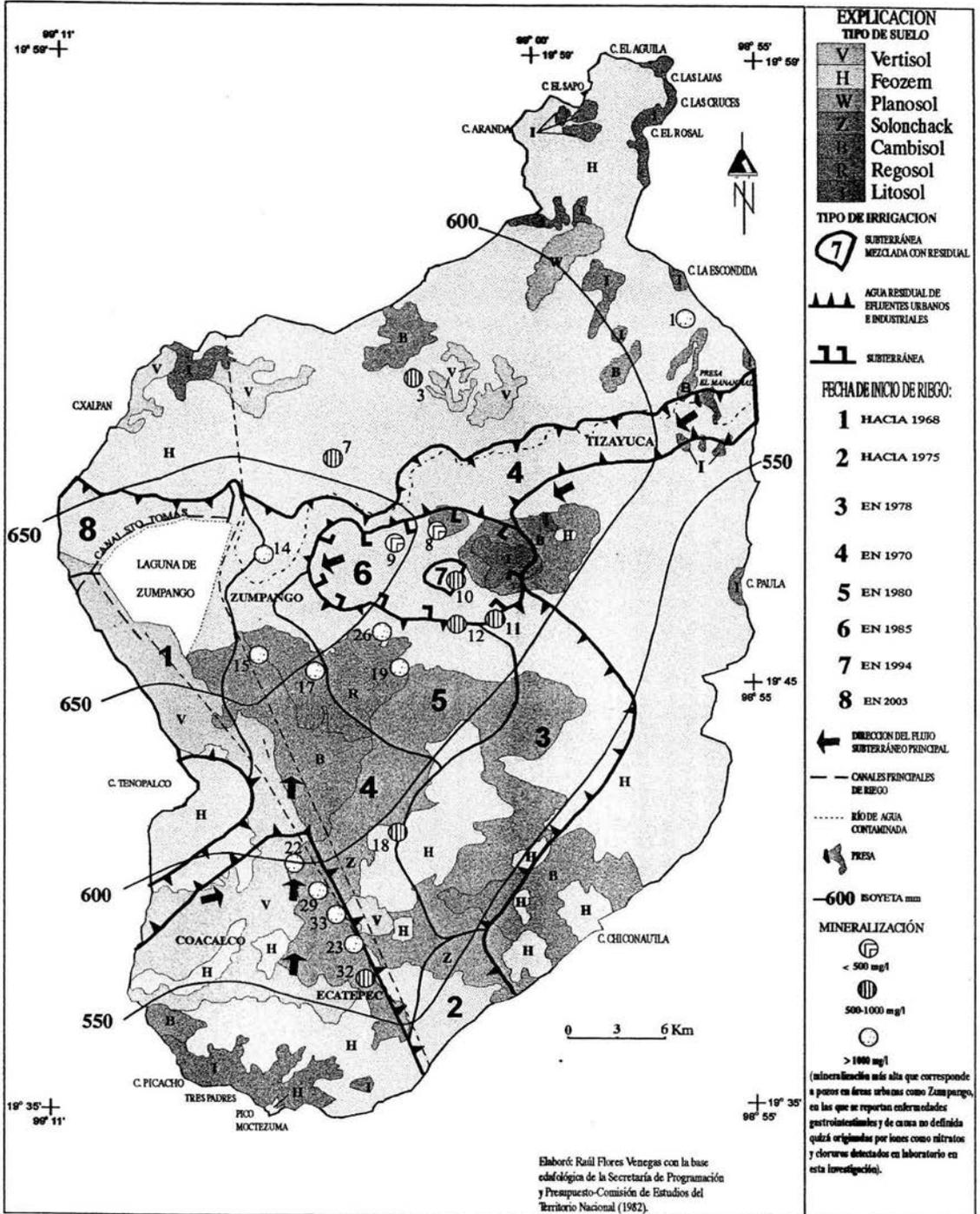


Figura 6.13 Correlación espacial entre la distribución de la lluvia, tipos de suelo, áreas de riego, flujo subterráneo, mineralización en los pozos de monitoreo y poblaciones con pozos en las que se reporta el mayor número de enfermedades dentro de la Subcuenca de Zumpango.

reporta el mayor número de enfermedades en esta subcuenca. Como se ha mencionado, el suelo se forma de las rocas, por esta razón el suelo Feozem de textura principalmente arenosa en las áreas montañosas y de piedemonte es más poroso que los de textura arcillosa: Vertisol, Solonchak y Cambisol de la planicie. Esta última característica origina que en los tres suelos arcillosos las sustancias contaminantes sean en gran medida retenidas sobre y en su interior, a causa de que son los suelos agrícolas a los que se les aplica el mayor volumen de agua residual durante el año y son además los de mayor antigüedad en cuanto a riego con agua residual, de manera que algunos pozos de extracción como el 15 y 17, localizados bajo estos suelos muestran baja concentración mineral causada por el retardo de la infiltración de contaminantes en temporada seca, sin embargo la llegada de las lluvias puede acelerarla, sobretodo por que ahí se presentan los lugares más lluviosos de esta subcuenca con 650 mm anuales. Por esta razón los pozos 14, 15, 17 y 19 tienen la mayor mineralización, que es favorecida por otra posibilidad, se trata del incremento gradual de la infiltración de sustancias contaminantes en regiones cercanas a esta subcuenca donde también se practica riego con agua residual. Por lo anterior los contaminantes pueden ingresar a esta subcuenca con el flujo subterráneo. Sin embargo, algunos pozos de la región central como el 8 y 9 presentan a su alrededor riego con agua subterránea, lo que les confiere baja mineralización. Esto indica que el riego con agua residual es quien incrementa notablemente el contenido de sustancias disueltas y aporta contaminantes como los que se han mencionado, además de originar enfermedades gastrointestinales en poblaciones como Zumpango, donde se aprovecha agua con elevado contenido mineral.

En resumen, con la información descrita hasta ahora, se pueden establecer dos maneras en que puede afectarse la salud de la población en ésta subcuenca:

- 1.-Por el efecto directo en las personas que usan agua residual en la actividad agrícola y
- 2.- Por la posibilidad de que el agua residual de riego, en parte, favorece a afectar la potabilidad del agua subterránea, alterando su calidad química. Dicha afectación causada por la infiltración de sustancias iónicas contenidas en la primera.

CAPÍTULO 7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

7.1.-DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Aún cuando, por las razones antes descritas, no ha sido posible el análisis químico del agua de muchos pozos en ésta subcuenca, la información de los que sí se muestrearon y analizaron, permite visualizar de forma generalizada, la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea. A la vez que se logró elaborar un mapa del flujo subterráneo general, también se identificó, según su calidad, a los principales tipos de agua subterránea. En ambos casos, gracias al conocimiento de la composición química de la misma. La importancia de elaborar dicho mapa e identificar los tipos de agua subterránea es, que con ellos se intenta evidenciar el área o las áreas con mayor posibilidad de alteración en la calidad química del agua subterránea. En otras palabras, con lo anterior, se puede empezar a tener idea de los lugares por donde fluye un determinado contenido mineral y posteriormente demostrar si éste incluye sustancias iónicas tóxicas. Lo anterior revela que:

Con base en los resultados obtenidos de las determinaciones físico-químicas del agua subterránea en ésta subcuenca, se puede interpretar que adquiere su composición química a partir de dos fuentes principales:

1.-Las rocas volcánicas: basalto, andesita, riolita, y toba pumicítica.

y 2.- Agua residual. A pesar de que se riegan con altos volúmenes de agua residual a los suelos agrícolas de ésta subcuenca, se debe mencionar que la degradación química del agua subterránea ya es evidente y no obstante que la capacidad de intercambio del suelo es grande, el agua residual de riego y los fertilizantes en temporada seca, están aportando iones que se depositan en el suelo agrícola, frecuentemente asociados en forma de sales como NaCl y posteriormente con la llegada de la lluvia, el agua meteórica los disocia y los transporta con alta posibilidad de que lleguen a la zona saturada.

De estas dos fuentes parece probable, que la primera es de donde el agua subterránea obtiene su composición química y es en consecuencia la más importante. La segunda, representa una posibilidad de alteración en la calidad química de la misma, cuyo fundamento es el contenido de nitrato, nitrito, amonio, cloruros y boro pues como se ha establecido, la literatura documentada los refiere como contaminantes; principalmente de origen antrópico.

Por otra parte, en ésta subcuenca la temporada de lluvias es relativamente corta, de julio a octubre, (tabla 2.2), pero se caracteriza por aportar lluvias intensas, lo cual implica que se capta mucha agua en poco tiempo.

Retomando lo anterior y considerando los siguientes factores:

1.-Lluvias intensas en temporada húmeda

2.-Grietas en Vertisol y Cambisol y suelos Feozem, Regosol y Litosol de textura arenosa con una superficie conjunta que ocupa la mayor parte de ésta subcuenca, es decir, 540.4 Km² de 763 Km².

Entonces se puede opinar, que en casi toda la Subcuenca de Zumpango, la infiltración es relativamente rápida, lo cual lleva a la pregunta acerca de que, si la infiltración efectivamente ocurre con rapidez, ¿entonces, en los análisis de agua subterránea se podría esperar mayor cantidad de sustancias iónicas que puedan alterar la calidad química de la misma?. La respuesta es negativa, pues como quedo establecido, los suelos regados con agua residual, tienen una importante capacidad de intercambio catiónico y debido a ello, aún cuando el agua infiltrada llega con relativa rapidez a la zona saturada, el complejo arcillo-húmico retiene a la mayoría de los iones que contiene, permitiendo el paso sólo a una cantidad de los mismos. Cabe resaltar, que esa cantidad representada entre otros por los iones nitrato y cloruro, generados en el agua superficial y meteórica, hace evidente una alteración en la calidad química del agua subterránea, confirmando en parte, la hipótesis planteada en ésta investigación.

Otro aspecto a tratar, es el concerniente a la clasificación del agua subterránea. Aquí cabe plantearse dos preguntas:

1.-¿Qué tan bueno o malo es calificar y clasificar al agua? y 2 ¿Por qué hacerlo?. Como respuestas que integren a ambas preguntas se debe indicar que la calificación del agua subterránea y/o superficial se basa principalmente en los posibles usos a que se pueda destinar, y esto es sin duda lo más importante.

Por lo anterior, más allá de discutir si es bueno o malo, es importante hacerlo sobretodo cuando un valor promedio que sería un límite permisible o norma, avalado por investigaciones previas y modificadas con el tiempo podrían indicar que ya hay riesgo de alteración sobre un recurso natural como el agua subterránea. En otras palabras, a pesar de ser relativa una clasificación, es conveniente tener un lineamiento a seguir cuando se cree que pudieran presentarse factores que estén alterando la calidad físico-química de ese mismo recurso.

Para clasificar a las aguas subterráneas existen normas como las que se han mencionado, complementadas con diagramas. De éstos, se optó por los diagramas triangulares de Piper (1944), Durov (1948) y Stiff (1951), pues tienen las siguientes ventajas:

- 1.-Se pueden representar en promedio, hasta 50 análisis de agua en un mismo diagrama, de forma relativamente clara y sin lugar a confusiones.
- 2.-Debido a su claridad en la representación, se pueden conocer las mezclas de agua predominantes (figura 6.7).
- 3.-También dan una idea general de la composición química de las rocas del subsuelo en contacto con el agua, pues se considera en ambos diagramas, a los iones mayores Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- y Cl^- que como se estableció, son los predominantes en las rocas de la corteza terrestre, evidenciando así a los iones predominantes en una o varias muestras de agua subterránea (figura 6.7).

Entre otros autores: Moore y Ramamothy (1984) y Ryan (1989), han utilizado el de Durov. Comisión Nacional del Agua y British Geological Survey (1995) y Huizar (1997), han venido utilizando el de Piper, posiblemente por las ventajas antes descritas. Esto indica que son de uso común en trabajos de hidrogeoquímica, lo cual motivo a usarlos también en ésta investigación.

Clasificar agua subterránea en estos diagramas, como en cualquier otro es únicamente una aproximación a la realidad, y, por significar sólo eso, es importante mostrarla con la mayor claridad posible.

Un tercer tema a discutir es respecto a la información documentada, referente al tema de la calidad química del agua. De ésta se puede opinar, que la mayor parte de la investigación sobre el impacto a la salud por exposición a sustancias químicas, se ha centrado en el estudio de unas cuantas de ellas, como el plomo y los nitratos. Esto se deriva de que existe todavía mucha escasez de información acerca del efecto en la salud de muchas de las mismas.

En cuanto a las posibles enfermedades causadas por ingerir agua, se puede decir que la relación causa y efecto no es tan lineal como parece, es decir, no por tomar agua de inmediato una persona se enferma, ya que puede contener sustancias químicas consideradas tóxicas, pero también pueden estar involucrados otros factores que favorezcan la enfermedad, por ejemplo, alimentos contaminados como verduras y hortalizas, regados con agua residual, a los que con frecuencia no se les da la limpieza adecuada antes de consumirlos generando iones como los mencionados anteriormente. Esto pudiera provocar enfermedad gastrointestinal como diarreas. Además puede ser un reflejo de que las instituciones de salud reportan enfermedades gastrointestinales por causas diversas, sin que se detalle una en particular.

Por lo antes expuesto, se puede decir que es difícil dar resultados concluyentes de enfermedades causadas por el consumo de agua, excepto en casos muy puntuales, como el que se menciona en la página 85. Extrañamente, la literatura médica mexicana no reporta ningún caso semejante en donde se involucren sustancias químicas tóxicas. Por esta razón las enfermedades por microorganismos son más relevantes en la salud de la población. Al menos así se reporta en ésta subcuenca.

También es importante discutir respecto al error en los datos hidrogeoquímicos, ya que cuando se elaboran los análisis químicos de una o varias muestras de agua, se debe comprobar que no haya errores en las determinaciones. Por esto es importante y necesario aplicar el balance iónico, en el cual la suma de cationes, debe coincidir aproximadamente con la de los aniones, cuando ambos se expresen en meq/l. Esto también se conoce como balance de cargas (Canovas, 1990, Custodio y Llamas, 1983, Armienta et al, 1987). Como se ve en las tablas anexas de datos físico-químicos del primero al séptimo muestreo de agua subterránea, la suma de cationes es semejante a la de aniones.

Con la explicación anterior se puede resumir, que los datos obtenidos de las determinaciones físico-químicas del agua subterránea, sólo nos dan una idea de lo que está sucediendo en el ambiente subterráneo de ésta subcuenca y en consecuencia sólo se puede tener una aproximación a la realidad con este tipo de investigaciones hidrogeoquímicas.

7.2.-CONCLUSIONES

1.-A pesar de que el uso agrícola del agua residual dentro de la Subcuenca de Zumpango es una práctica relativamente reciente, ya han aparecido sustancias iónicas, tales como NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , Cl^- , PO_4^- y B^- ; en el agua subterránea. Esto es evidencia de que ya existe contaminación, debido a que dichas sustancias provienen de fuentes externas al ambiente subterráneo. En términos generales, con las concentraciones obtenidas de estas sustancias se le podía asignar un rango bajo a medio de contaminación, pues a excepción de los cloruros, que se detectan con una concentración importante, las otras sustancias presentan bajas concentraciones; las cuales manifiestan que existen fuentes antrópicas que originan la mineralización del agua subterránea.

2.-En los suelos regados con agua residual, la presencia de horizontes arcillosos favorece a un alto intercambio catiónico que aminora y retarda la migración de sustancias contaminantes hacia el agua subterránea.

3.-La composición química del agua subterránea muestra cambios entre las temporadas seca y de lluvias. En los meses secos -enero a mayo- los valores de los iones determinados son constantes y se incrementan en los meses húmedos -junio a octubre-, revelando que el agua meteórica es el medio de transporte de los iones que ingresan y llegan al agua subterránea.

4.-Los pozos en los que se obtienen aguas subterráneas con los mayores contenidos minerales, coinciden espacialmente con los lugares en donde se efectúa riego con agua residual, mientras la menor mineralización coincide con los lugares en donde el riego es con agua subterránea. Esto es una evidencia de que el agua superficial altera químicamente la calidad del agua subterránea.

5.-Con base en la interpretación de los análisis químicos concernientes a la mineralización en los pozos monitoreados y su distribución espacial, se pudieron inferir e identificar dos direcciones principales del flujo subterráneo general en esta subcuenca; i) de noreste a oeste, entre estas direcciones el flujo proviene del límite NE de esta subcuenca y se dirige hacia la población de Zumpango de Ocampo, recorriendo una distancia aproximada de 36.6 Km. ii) de suroeste a oeste, el flujo también proviene del límite SW de esta subcuenca y fluye entre las laderas de la serranía de Guadalupe y el cerro Tenopalco dirigiéndose hacia las poblaciones de Coacalco y Ecatepec, recorre aquí una distancia aproximada de 22 Km. Esto pone en evidencia que la contaminación avanza hacia las zonas de mayor extracción de agua subterránea.

6.-Los resultados de análisis físico-químico del agua subterránea de esta subcuenca, indican que en términos generales, es apta para uso doméstico, no obstante que las enfermedades reportadas en el área de estudio pudieran tener otro origen, como alimentos contaminados, es evidente que existen bacterias en el agua subterránea y sustancias químicas que están originando enfermedades entre la población del área de estudio. Esto se manifiesta por la recurrencia de enfermedades gastrointestinales y por los efectos directos en la salud como diarreas que coinciden con los que se han señalado en el capítulo seis.

7.3.-SUGERENCIAS

Las siguientes sugerencias, están dirigidas principalmente a las autoridades encargadas del manejo del agua como son: Comisión Nacional del Agua (CNA), Organismo Descentralizado de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (ODAPAS), Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y gobiernos municipales dentro de ésta subcuenca, quienes con su autoridad ejecutiva, pueden regularizar, minimizar o resolver situaciones que puedan afectar tanto al uso y conservación del agua como al hombre, que es su principal utilitario.

1.- Que el agua residual que se emplea para riego sea sometida a un tratamiento primario por lo menos, pues la agricultura de riego es una de las principales actividades económicas de esta zona. Asimismo, se sugiere que se de asesoría técnica a los agricultores para que se asignen láminas de agua más acordes con el tipo de suelo y con el tipo de cultivo. Con ésta práctica, quizá, también se minimizaría el problema de salinización y sodificación del suelo, que, como se ha visto, es el agua residual el factor principal que los origina.

2.-Como el agua subterránea es escasa en ésta subcuenca, se podría diseñar un proyecto de recarga artificial donde se evalúen previamente las ventajas y desventajas de éste. Los beneficios podrían ser la recuperación del nivel de los mantos subterráneos y con esto equilibrar los problemas de subsidencia del suelo, que se presenta por perder el volumen de agua que contiene. A la par con dicho hundimiento, se presentan grietas en el suelo. En ésta subcuenca ya se observan grietas en tramos carreteros sobre los ramales Ecatepec y Reyes-Ferrocarril de los municipios de Ecatepec y Nextlalpan respectivamente (figura 5.2). Lo que indica, que dicha subsidencia ya se está presentando.

Sin embargo existen algunas desventajas que podrían originar contaminación del agua subterránea, las cuales se pueden prevenir de la siguiente manera i) si se inyecta agua en el pozo, se debe primero evaluar su calidad físico-química, considerando también los microorganismos patógenos. Si el agua lleva muchos sólidos suspendidos totales, puede originar la disminución de la permeabilidad del acuífero, debido a la obstrucción de poros y con ello se pierde la capacidad de conducir el agua en cantidades significativas ii) si lleva muchos sólidos totales disueltos, integrados por sustancias químicas tóxicas en estado iónico, se puede presentar la posible contaminación a otros acuíferos o pozos de abastecimiento doméstico, industrial y agrícola cercanos al proyecto.

3.-Es pertinente que las autoridades encargadas del recurso agua en ésta subcuenca permitan el acceso a la información hidrológica como es la obtención de muestras de agua de los pozos, datos de volúmenes de extracción de agua subterránea, composición química entre otras más, con la finalidad de generar información y darla a conocer. La que publican las dependencias del gobierno concernientes a la hidrología, es escasa. Si se pudiera hacer más investigación y publicarse, quizá se podrían prevenir problemas como la alteración química de fuentes de agua subterránea, cuando éste fuera el caso.

4.-En realidad, hacer buen uso del recurso agua y minimizar su alteración química es necesario para ésta zona, donde de por sí es difícil obtenerla. Por esta razón a toda la población le corresponde cuidarla, pero es a las autoridades a quienes principalmente se sugiere no dejar de informar a la misma. El Ejecutivo Federal ha establecido la *Ley de Aguas Nacionales*, de la que cabe resaltar al capítulo V BIS referente a la cultura del agua y en la que se indica que es responsabilidad de la Secretaría del Medio Ambiente y la Comisión Nacional del Agua a través de los Organismos de Cuenca hidrológica, quienes deben promover, prevenir y controlar la contaminación de las aguas subterráneas por medio de anuncios de televisión y radio y con ello dar un buen uso al agua. Esto puede favorecer a que un usuario pueda cuidarla y tratar de no contaminarla, pero, si los gobiernos y dependencias permiten la apertura de nuevas áreas de riego con agua residual sin un tratamiento previo, el problema puede ser persistente o incluso incrementarse.

5.-A pesar de que se aplican técnicas como la cloración para eliminar bacterias en el agua subterránea, se sugiere un monitoreo más frecuente -bien sea mensual, bimestral o semestral- de parámetros bacteriológicos y químicos en todos los pozos de extracción de propiedad municipal y particulares, ya que se están presentando enfermedades gastrointestinales, seguramente causadas por bacterias y compuestos de nitrógeno como nitratos, entre otros más. Con esto se podría empezar a tener certeza del origen de dichas enfermedades y saber si efectivamente es el agua subterránea el medio de transmisión de las mismas. El monitoreo frecuente revelaría si el nivel de contaminación en el agua subterránea aumenta con el tiempo y de ser así adaptar técnicas de prevención y protección al agua como uso de filtros para retener sustancias químicas antes de que pasen a las redes de distribución doméstica y causen enfermedades.

Finalmente al hacer este tipo de investigaciones, se sugiere recopilar y analizar la mayor cantidad de información nacional e internacional referente a normatividad del agua, a fin de establecer el mejor conjunto posible de parámetros y sus respectivos límites máximos permisibles vigentes. Con esto se podría estimar el nivel de protección que se les está dando a las fuentes de abastecimiento de agua potable en nuestro país; principalmente a las de uso doméstico. Esta acción estaría indicando si las concentraciones están variando con el tiempo y así determinar el grado de contaminación del agua subterránea en alguna cuenca o subcuenca.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, Carlos, Marín, Salvador y Sánchez Francisco. (1990). *Origen y evolución de los rasgos morfotectónicos postcretácicos de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo XLVIII, No.2 páginas 15-39.
- Allen, Herbert, Jackson, Earl y Stephenson, Louis. (1993). *Metal in groundwater*. Lewis Publishers, 473 pp.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation (APHA, AWWA, WPCF) (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos S. A. España, 954 pp.
- Armienta, Miguel, Zamora, Vicente y Juárez, Francisco. (1987). *Manual para el análisis químico de aguas naturales en el campo y en el laboratorio*. Serie Docencia y divulgación, No. 4, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 86 p.
- Armstead, Christopher. (1989). *Energía geotérmica*. Limusa-Noriega editores, México, 504 pp.
- Athala Molano, Jorge (1998). *Beneficios, riesgos y catástrofes de la recarga artificial de acuíferos con aguas residuales*. En: revista de Ingeniería Civil, número 347, Marzo 1998, México, páginas 7-14.
- Bloom, Albert L. (1974). *La superficie de la Tierra*. Omega, Barcelona, 151 pp.
- Brownlow, Jack. (1996). *Aguas subterráneas, prospección y alumbramiento para riego y uso doméstico*. Manuales técnicos serie 1, núm 16, 3ª edición. Omega, Barcelona, 156 pp.
- Buzzi, Ruth. (1992). *Chemical hazards at water and wastewater treatment plants*. Lewis publishers. 140 p.
- Canovas Cuenca, Juan. (1990). *Calidad agronómica de las aguas de riego*. Mundi-Prensa, 4a. ed, Madrid España. 55 pp.
- Cepéda Dovala, Juan. (1991). *Química de suelos*. Trillas, México, 167 pp.
- Cienfuentes, Enrique y Siebe, Christina. (1995). *Environmental impact of wastewater irrigation in central México: An overview*. In: Journal Environmental. Research. Número 5, páginas 161-173.
- Cienfuentes, Enrique, Blumenthal, Ulrich y Ruiz, Gerardo. (1993). *Problemas de salud asociados al riego agrícola con agua residual en México*. En: revista Salud Pública, Número 35, año 6, páginas 614-619.
- Comisión Nacional del Agua (CNA) (1990). *Características de los distritos de riego, Año agrícola 1990*. México D.F., 77 pp.
- Comisión Nacional del Agua y British Geological Survey (1995). *Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital valley, Hidalgo estate, México*. Phase 1, report february 1995, 80 pp.
- Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México (2000). *Estudios de prospección del uso del agua*. En: revista Ingeniería Civil, numero 355, Noviembre 1998, México, páginas 7-11.
- Compton, Charles (1986). *Introducción a la química*. UTEHA, México, 617 pp.
- Cordero Castañeda, Carlos.(1986). *Desarrollo de un programa de Ovinicultura y propuesta para instalar un complejo agropecuario industrial en Zumpango, Edo. de México*. Tesis profesional. Facultad Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 109 p.
- Cortés Delgado, Francisco.(1982). *Investigación económica del municipio de Zumpango, situación actual y perspectivas de desarrollo*. Tesis profesional Facultad Economía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Custodio, Emilio y Llamas, Manuel. (1983). *Hidrología subterránea*. Tomos I y II. Omega, Barcelona.
- Chamizo, José Antonio y Garritz, Andoni (1991) *Química terrestre*. Fondo de Cultura Económica, Colección la Ciencia desde México, Número 97, 161 pp.
- Chang, Raymond (1992). *Química*. McGraw-Hill, Madrid, España, 1064 pp.
- Davis, Bryan (1987). *Manejo del suelo*. Ateneo, Buenos Aires, 142 pp.
- De Dios, Homero.J. (1977). *Producción de Maíz forrajero regado con aguas negras en el distrito de riego 88, Chiconauhtla, México*, Tesis-profesional Universidad Nacional Autónoma de México, México, 93 pp.
- De Fernícola, Nilda. (1994). *Aspecto toxicológico de las sustancias peligrosas*. Ponencia 6 En: Memoria del seminario sobre desastres industriales tecnológicos asociados con agentes químicos. Vol I Secretaría de Salud y Organización Mundial de la Salud, páginas 48-67.
- De la Torre Borbón, Edmundo. (1980). *Estudio geológico integral de las cuencas de Tula y Zumpango orientado al almacenamiento de aguas negras y pluviales*. Tesis profesional. Facultad Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Demant, Anthony. y Robin, Charles. (1975). *Las fases del vulcanismo en México: Una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico*. Revista Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 75, páginas 813-860.

- Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (1972). *Principios de avenamiento o drenaje*. Colección ingeniería de suelos, número 8, Diana, México, 47 pp.
- Dissanayake, Cobe y Weerasooriya, Sover. (1990). *Medical Geochemistry of nitrates and human cancer in Sri Lanka. In: Environmental health, the impact of pollutants*. Vol 1, Jhon Lester (ed). OPA, Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers 455 pp.
- Doméxico, Pratick y Schwartz, Franklin (1990). *Physical and chemical hydrogeology*. Jhon Wiley & Sons, New York, 230 pp.
- Drinking Water Health Effects Task Force-U.S.A. (DWHE Task Force, USA) (1990). *Health effects of drinking water treatment technologies*. Lewis Publishers, Chelsea, USA, 146 pp.
- Durov, Vladimir A. (1948). *Molecular motions in water and its solutions* in: Chemistry and Technology of water 1980, Vol 1, número 6, páginas 485-491.
- Elimder, Charles. (1984). *Metabolism and Toxicity of metals*. in: Changing metal cycles and human health. J. O. Nriagu (ed) páginas 86-98.
- Erickson, Jon. (1991). *Las tormentas: De las antiguas creencias a la moderna meteorología*. McGraw-Hill, México, 305 pp.
- Favela Espinoza, Roberto. (1986). *Levantamiento de suelos de la región de Zumpango de Ocampo, Edo. de México*. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 120 pp.
- Fourhcr, Frank. (1975). *Conservación del suelo*. Mundi-Prensa, Madrid, 189 pp.
- Fries, Christopher. (1960). *Geología del Edo. De Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero: Región central meridional de México*, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. Bol. 60 página 236.
- Früich, Patrick y Saint Blanquant, Gerald. (1985). *La contaminación por nitratos*. En: revista Mundo Científico, Volumen 5, número 11, páginas 17-18.
- García de Miranda, Enriqueta (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, México.
- García Fernandez, José y García de Caz, Rafael (1982). *Edafología y fertilización agrícola*. AEDOS, Barcelona, 154 pp.
- Girón Ríos, Yolanda (2002). *Genesis, degradación y dinámica de suelos salino-sódicos en Nextlalpan Estado de México*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, 128 pp.
- Gobierno del Estado de México (2003). En: <http://www.edomexico.gob.mx>.
- Gómez Lucas, Enrique y Enriquez, Tomás. (1992) *Aguas de riego: Análisis e interpretación*. Universidad de Alicante, España. Caja de Ahorros del Mediterráneo, 63 pp.
- Griffin, Roger. (1988). *Principles of hazardous material management*. Lewis Publishers, 207 pp.
- Huang, Walter. (1981). *Petrología*. UTEHA, México, 546 pp.
- Huizar Alvarez, R., Hernández, G., Carrillo Martínez, M., Carrillo Rivera, J.J., Hergt, T. y Angéles, G. (2003). *Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, central México*. In: Environmental Geology 43:385-399.
- Huizar Alvarez, Rafael (1997). *Hydrochemistry of the acuífers in the Rio de las Avenidas basin, Pachuca, Hidalgo, Mexico*. En: Water, Air and Soil pollution 96, pag 185-201. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- Instituto Nacional de Ecología (INE), Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. *Limites máximos permisibles de sustancias contaminantes en el agua residual para uso agrícola*. En: Diario Oficial de la Federación, 6 de Enero de 1997, páginas 16-22. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2000). *Censo general de población y vivienda, Estado de Hidalgo Integración territorial*. México 354 pp.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2000). *Censo general de población y vivienda, Estado de México Integración territorial*. México, 375 pp.
- Kemmer, Frank y McCallion, Jhon (1996). *Manual del agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*, Tomo 1, McGraw-Hill, México, 210 pp.
- León Arteta, Régulo (1984). *Nueva edafología: regiones tropicales y áreas templadas de México*. Gaceta, México 340 pp.
- Lester, Jhon. (editor) (1987). *Heavy metals in wastewater and sludge and treatment processes*. Volumen 1, CRC Press, Florida United States of America, 183 pp.
- Lewis, Richard. (1993). *Hazardous Chemicals: Desk reference*, 3ª. Edición, Van Nostrand Reinhold, New York, United States of America, 1742 pp.
- Ley de Aguas Nacionales, Cultura y Prevención de la Contaminación del Agua en México. En: <http://www.semarnat.gob.mx>
- Lippman, Morton (1992). *Environmental toxicants, human exposures and their health effects*. Van Nostrand Reinhold, New York, United States of America, 697 pp.
- Lu, Frank. (1992). *Toxicología básica: riesgos por exposición a sustancias tóxicas*. Harla, México, 269 pp.
- Lugo Hubp, José y Cordova, Carlos. (1991). *Regionalización geomorfológica de la República Mexicana*. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 23 pp.
- Lugo Hubp, José. (1990). *El relieve de la República Mexicana*. En: revista del Instituto de Geología Volumen 9, Número 1 pag 82-111, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Maidment, David. (1993). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill. New York, United States of America. 585 pp.
- Martínez Luna, Victor Manuel. (1999). *Los lagos y lagunas en México: "un enfoque hidrogeográfico general."* En: Revista Notas del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, número 7, páginas 46-58, México.
- Méndez García, Teodoro. (1982). *Estudio sobre contaminación de suelos agrícolas del valle del mezquital, Hidalgo por ABS, boro y metales pesados, por uso de aguas negras de la ciudad de México*. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México, México 134 pp.
- Moncada Maya, Omar. (1982). *El abastecimiento de agua a la ciudad de México ¿un problema irresoluble?*. En: Anuario de Geografía, año XXV 1985-1989, páginas 43-56.
- Moore, Joseph y Ramamoorthy, Steven. (1984). *Organic chemicals in natural waters*. Springer-Verlay Editions. New York, United States of America, 128 pp.
- Mooser, Federico. (1972). *The Mexican Volcanic Belt. Structure and Tectonics*. En: revista del instituto de Geofísica, Volumen 12, páginas 55-70.
- Mooser, Federico. (1975). *Historia geológica de la Cuenca de México*, Departamento del Distrito Federal. En: Memoria de las obras del drenaje profundo del Distrito Federal, Tomo I. páginas 7-38.
- Nogawa, Kowashira. (1984). *Cadmium*. En: Changing metal cycles and human health. J. O. Nriagu (ed) páginas 63-78.
- Oláiz, G., Rico, B. y Del Río, A. (2003) *Encuesta nacional sobre enfermedades gastrointestinales: la ciudad de México y su área metropolitana*. En: Cifras mayo-agosto 2003; año1, número 2, páginas 16-22, Instituto Nacional de Salud Pública. México.
- OMS (1998) *Guidelines for drinking water quality: health criteria and other supporting information 2^d edition*, Vol. 2, pag 281-283. Geneva, World Health Organization.
- Pacheco Cortés, Tito. (1960). *Abastecimiento de agua y alcantarillado en Zumpango*. Tesis Profesional, Facultad Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 77 pp.
- Palmer, Christopher (1992). *Principles of contaminant hydrogeology*. Lewis Publishers, 180 pp.
- Pérez Cruz, Gustavo. (1988). *Estudio sísmológico de reflexión del subsuelo de la ciudad de México*. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 83 pp.
- Peris Mora, Eduardo (1992). *Contaminación química: cuatro criterios de evaluación en agua*. SPUPV. Universidad Politécnica de Valencia, España. 160 pp.
- Piper, A. M. (1944). *The interpretation of chemical water analysis by means and patterns*. Trans American Geophysics Union, Número 25, páginas 194-199.
- Plan de Desarrollo Municipal 1997-2002, del Estado de Hidalgo. En: <http://www.edohidalgo.gob.mx>.
- Plan de Desarrollo Municipal 1997-2002, del Estado de México. En: <http://www.edomexico.gob.mx>.
- Plunkett, Ernest. (1978). *Manual de toxicología industrial*. Tomo 12, URMO, España, 558 pp.
- Porras, Martín y Thauvin John. (1978) *Aguas subterráneas: Problemas generales de contaminación*, cuaderno No. 7, CIFCA. 89 pp.
- Price, Michael. (2003). *Agua subterránea*. Limusa, México 330 pp.
- Prol Ledezma, R.M. y Juárez, M.G. (1986). *Geotherm. Research* In: Journal of Vocanology. Elsevier-Sc. Pub. B.V. Amsterdam, 28, pag 251-362.
- Raiswell, R., Brimblecombe, P., Dent, D.L. y Liss, P. S. (1983). *Química ambiental*. Omega, Barcelona, 209pp.
- Rangél, Antonio Eduardo. (1966). *Estudio en un terraplén de prueba para sobre elevar los bordos de la laguna de Zumpango*. Tesis Profesional. Facultad Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 123 pp.
- Rodgers, Glen E. (1995). *Química inorgánica*. McGraw-Hill, Madrid España, 663 pp.
- Rodríguez Suppo, Florencio (1982). *Fertilizantes: Nutrición vegetal*. AGT editor, México, 157 pp.
- Ruiz Zavala, Graciela (1996). *Estudio sobre la influencia de la calidad del agua potable en la salud de la población del municipio de Tepotzotlán, Edo de México*. Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México. México 92 pp.
- Ryan, M.C. (1989). *An investigation of organic nitrogen compounds in the groundwater in the valley of México*. En: Revista Geofísica internacional, Volumen 28-2, pag 417-433.
- Salcedo Loredo, José María. (1991). *Sobreelevación del bordo perimetral de la laguna de Zumpango y construcción del canal Santo Tomás*. Tesis Profesional. Facultad Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 58 pp.
- Sánchez Jimenez, Manuel. (1960). *Lagunas de Oxidación en Zumpango, Edo. de México*. Tesis Profesional. Facultad Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 112 pp.

- Schaechter, Moselio, Medoff, Gerald, Eisenstein, Barry y Guerra, Humberto (1994). *Microbiología. Mecanismos de las enfermedades infecciosas*. Ed. Médica Panamericana, 2ª ed. 1000 pp.
- Schaeffler, C. J. (1968). *Resumen de la Geología de las hojas: México, Distrito Federal, Estado de México y Morelos. Carta geológica de México*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Schneider, H.J.M. (1980). *The nickel status of human beings*. En: Symposium about nickel, Leipzig, E. ed. Karl Marx Universität and and Fredrich-Schiller Universität, Berlin, páginas 56-59.
- Schoeller, H. (1962). *Methodes pour obtenir le bilan des eaux subterranes: methodes appliques en France, Grande-bretagne, Hollande et Espagne*. Int. Assoc Scientific Hydrology Asamblea general de Berna 1968 Pub. 77, páginas 87-107.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) (2001). *Manual de sustancias químicas contaminantes en México*. México, D.F. 89 pp.
- Secretaría de Salud (SS), Sistema Único de Información Epidemiológica (2000). *Estadísticas para enfermedades gastrointestinales*. En: <http://www.ssa.gob.mx>.
- Seoanez Calvo, Mariano (1992). *Aguas residuales urbanas*. Colección ingeniería medio ambiental. Mundi-Prensa. Madrid, España, 368 pp.
- Snoeyink, Vernon y Jenkins, David (1987). *Química del agua*. Limusa, México; 508 pp.
- Stryer, Lubert. (1995) *Bioquímica*. 4ª edición. Reverte, México, 549 pp.
- Téllez López José. (1985). *Determinación del tipo de suelo y formulación de un programa de rehabilitación de suelos con problemas de salinidad, en la unidad de riego Santiago Atocan del municipio de Santa Ana Nexlalpan, Estado de México*. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, 139 pp.
- Turc, L. (1954). *Le bilan d' eau des sols: relations entre laprecipitation, l' evaporation et l' ecoulement*. La Hoville Blanche 3, Journées de l' Hydraulique de la société Hydrotechnique, France, páginas 36-44.
- United States of America-Environmental Protection Agency (USA-EPA) (2000). *Normative EPA 815-F-00-008 as May 2000*. En: <http://www.epa.gov>.
- United States of America-Environmental Protection Agency (USA-EPA) (1974). *Methods for the chemical analysis of water and wastewater*. EPA-600/4-79-020.
- United States Soil Salinity Laboratory Staff (USSSLS) (1973). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Departamento de agricultura de los Estados Unidos. Louis. A. Richards (ed). Limusa, México, 172 pp.
- Vásquez Sánchez, Enrique. y Jaimes Palomera, Luis. R. (1990). *Geología de la cuenca de México*. En: Simposio sobre tópicos geológicos de la cuenca del valle de México. Sociedad Mexicana de mecánica de suelos. México, páginas 1-25.
- Velasco Molina, Hugo (1983). *Uso y manejo del suelo*. Limusa, México, 191 pp.
- Velde, Brooke. (1995). *Origin and mineralogy of clays: clays and environment*. Springer-Verlang, New york, 333 pp.

CARTOGRAFÍA

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (1996). *Cartas Topográficas, Geológicas y edafológicas en escala 1: 50 000*:

Clave:	Nombre:
E14 A19	Zumpango de Ocampo
E14 B11	Tizayuca

Secretaría de Programación y Presupuesto-Comisión de Estudios del Territorio Nacional (SPP-CETENAL) (1982). *Cartas Topográficas, Geológicas y Edafológicas en escala 1: 50 000*:

Clave:	Nombre:
E14A29	Cuautitlán
E14 B21	Texcoco

Secretaría de Programación y Presupuesto-Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e informática-Dirección General de Geografía (SPP-CGSNEGI) (1983). *Carta hidrológica de aguas superficiales en escala 1: 250 000, 1ª. edición*.

Clave:	Nombre:
E14-2	Ciudad de México

GLOSARIO

§ *Diccionario ilustrado de Geología* (1992) Compilador Jurgen Stoltz. Traducido por Angel Gutierrez Almazán. EVEREST, México 460 pp.

© *Diccionario de Química* (1986) Versión y adaptación por Andrés Llamas. EDIPLESA. México 241 pp

© Zimmerman Bell, Matthew (1998) *Diccionario de terminología médica*. Ed. Médica Panamericana. 789 pp

Acuífero Confinado Acuífero en el que el agua está confinada o limitada hacia la superficie por una capa superior impermeable o semipermeable. También se llama acuífero cautivo §

Acuífero Fisurado Nombre designado a los acuíferos que están formados por rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas en las que se presentan una gran densidad de fracturas que pueden llegar a ser de algunos cm e incluso metros §

Acuífero Libre Tipo de acuífero en el que las rocas no están confinadas por una capa superior impermeable o semipermeable. También se llama manto acuífero no cautivo §

Acuífero Mixto Tipo de acuífero que se caracteriza por presentar una combinación de fracturas y poros que le da excelentes condiciones de transmitir agua §

Aterosclerosis Trastorno en que se depositan sustancias grasas como colesterol y triglicéridos en las arterias medianas y grandes, a causa de ciertos estímulos como hipertensión, colesterol o sustancias químicas como monóxido de carbono. Esto da como resultado la formación de una capa grasa que rodea el interior de las arterias. Es una causa frecuente de infarto al miocardio o corazón. ©

Cardiomiopatía Cualquier enfermedad en y sobre el miocardio o corazón. Por ejemplo, insuficiencia cardíaca, que es un trastorno caracterizado por una descompensación o desequilibrio en el flujo sanguíneo, en el cual, el corazón bombea un volumen bajo de sangre a las arterias, a causa de algunos factores como la aterosclerosis ©

Degradación Termal En fisicoquímica muchos compuestos orgánicos e inorgánicos, se degradan bajo calor, este es el proceso conocido como degradación termal. En el subsuelo, la degradación termal es lenta, pero es también un proceso constante que afecta a muchos iones y compuestos. Con temperatura alta, los compuestos son más vulnerables y sus enlaces iónicos pueden separarse en presencia de un solvente como el agua. ®

Disolución/Precipitación Proceso que relaciona a un solvente como el agua cuando entra en contacto con minerales y otros sólidos. La solubilidad de un mineral o sólido, está definido como la cantidad de material que se disolverá en una unidad de volumen de agua bajo condiciones específicas. En otras palabras, si la solución está saturada con respecto a algunas especies, un sólido puede precipitarse y de no presentarse estas condiciones será cada vez más soluble. Con éste concepto podemos comprender que algunos iones tienen mayor capacidad para alcanzar el agua subterránea. ®

Elemento Traza Es cualquier elemento que se encuentra normalmente en agua o en la solución de suelo, en concentraciones menores a 100 µg/l. ®

Encefalopatía enfermedad causada por sustancias orgánicas o inorgánicas en la masa encefálica, (cerebro cerebelo y bulbo raquídeo), por ejemplo cefaleas, que son dolores causados por dilatación de vasos sanguíneos cerebrales o disminución del aporte sanguíneo al cerebro. Otra es la esclerosis que se caracteriza por una destrucción progresiva de la mielina en las neuronas cerebrales, esto provoca interferencia en la transmisión de impulsos nerviosos de una neurona a otra, originando visión borrosa y problemas con la percepción de luz y color, incoordinación y vértigo entre otras más. ©

Especiación En una solución es necesario saber que formas iónicas de un elemento o sustancia pueden presentarse para saber que reacciones pueden llevarse a cabo con otros que están presentes en la solución y sobre todo que formas pueden resultar de tales reacciones, pues en muchas ocasiones, la forma iónica puede ser más peligrosa que la cantidad del contaminante. ®

Facie Hidrogeoquímica Las soluciones acuosas están representadas por una mezcla iónica, en donde predominan dos o más iones. Un catión y un anión frecuentemente forman la mezcla predominante, logrando establecer con ello, una clasificación dada para un tipo de agua. Este término se aplica principalmente en

hidrogeología para establecer el tipo de agua subterránea que ha obtenido iones de rocas que han sido drenadas por la misma. §

Laxación Efecto causado por una sustancia orgánica o inorgánica que actúa como purgante, en el cual la sustancia afloja o ablanda al sistema digestivo, generando heces fluidas. ©

Metal Pesado Son aquellos elementos que se presentan en bajas concentraciones, que tienen una densidad superior a 5 g/cm^3 -cinco veces la densidad del agua- y número atómico de 22. ©

Quelación Es un proceso en el que iones metálicos y moléculas orgánicas y otras no metálicas se agregan y combinan formando complejos estables. Un complejo consiste de un átomo central rodeado por un número de otros átomos o moléculas llamadas ligamentos. Muchos metales forman libremente complejos o quelatos que son extremadamente solubles en solución acuosa. Una vez complejado el metal esta generalmente prevenido de sufrir otras reacciones o interacciones que el catión metálico pudiera sufrir. Con esta definición se puede opinar que a mayor quelación mayor solubilidad originando que las sustancias iónicas puedan alcanzar el agua subterránea mucho más rápidamente que otros contaminantes. ©

Reacciones Ácido/Base Reacción en la que se produce un ácido débil y una base débil a partir de un ácido fuerte y un base fuerte. El ácido es una sustancia que libera iones hidrógeno y otra los acepta cuando ambas entran en solución. ©

Tensoactivo Sustancia capaz de reducir la tensión superficial de un líquido. La tensión superficial es la cantidad de energía requerida para estirar o aumentar la superficie del líquido por unidad de área. El agua al ser un solvente común, tiende a ser afectado directamente por los tensoactivos. Debido a los enlaces de hidrógeno, la molécula de agua tiene una tensión superficial mayor que gran parte de los líquidos comunes como el alcohol. Los detergentes de uso común son tensoactivos y estos actúan sobre los enlaces de hidrógeno del agua. Esto es un factor que origina en parte la liberación de iones hidrógeno, reduciendo con ello la tensión superficial. ©

Teratogénico Se designa así, a una influencia o agente químico que provoca defectos físicos en un embrión en desarrollo. ©

ANEXOS

Tabla A-1 Datos fisico-químicos del primer muestreo (enero 1997) en ppm, excepto cuando se indique otra unidad.

Balance de cargas en meq/l

Pozo monitoreado	T °C	C.E. µS/cm	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	suma	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	suma	RAS	NO ₂	NO ₃ ⁻	P ⁻	B	SD T	SST	Zn	Pb	Cu	Fe	Ni	Mn	Cd	Cr	Co	
1	25	1200	7.1	11.4	3.4	76.0	71.4	37.7	609.8	1.2	0.5	0.1	3.8	5.9	10.3	1.1	10.0	0.0	11.1	0.225	0.35	0.22	0.3	0.82	760	1.57	0.006	0.001	0.001	0.001	0.004	0.007	0.001	0.001	0.001	0.001
2	21	560	7.8	7.3	2.4	40.0	33.9	24.7	322.8	1.1	0.3	0.1	2.0	2.8	5.2	0.7	5.3	0.0	6.0	0.205	0.65	2	0.1	0.67	358	1.5	0.011	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
3	24	500	8	8.2	2.4	36.0	30.3	14.5	310.9	1.2	0.4	0.1	1.8	2.5	4.7	0.4	5.1	0.0	5.5	0.243	0.55	2.7	0.2	0.08	320	1.43	0.006	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
4*	16	3200	8	501	138	208	194	679	1037	67	21.8	3.5	5.2	8.1	38.6	19.4	17.0	1.4	37.8	8.5	9.2	1.32	51.5	0.37	2048	3.92	0.003	0.001	0.007	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
5	19	380	7.8	5.8	1.5	28.0	20.6	14.5	215.2	0.8	0.3	0.0	1.4	1.7	3.4	0.4	3.5	0.0	4.0	0.203	1.4	2.74	0.3	0.12	243	1.27	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
6*	15	3800	7.3	535	93	280	240	633	1342	76	23.3	2.4	7.0	10.0	42.7	18.1	22	1.6	41.7	8.0	2.6	0.54	1.85	0.37	3145	7.6	1.395	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
7	25	560	7.7	14.8	2.6	52.0	35.1	60.9	263.0	1.2	0.6	0.1	2.6	2.9	6.2	1.7	4.3	0.0	6.1	0.388	0.7	0.8	0.7	0.44	358	1.42	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	23	450	7.8	6.2	1.9	36.0	23.0	17.4	263.0	0.6	0.3	0.0	1.8	1.9	4.0	0.5	4.3	0.0	4.8	0.198	0.7	3.75	0.5	0.14	288	1.46	0.007	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
9	24	340	8	7.4	1.5	30.0	15.7	10.2	203.3	1.2	0.3	0.0	1.5	1.3	3.2	0.3	3.3	0.0	3.6	0.271	0.85	1.32	0.2	0.04	217	1.62	0.011	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
10	23	710	7.8	9.8	1.9	40.0	41.1	104.5	227.2	0.8	0.4	0.0	2.0	3.4	5.9	3.0	3.7	0.0	6.7	0.259	0.7	1.5	0.1	0.27	454	1.36	0.009	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
11	24	630	7.8	8.2	2.4	36.0	37.5	30.5	298.9	1.3	0.4	0.1	1.8	3.1	5.3	0.9	4.9	0.0	5.8	0.228	0.7	2.78	0.2	0.34	403	1.57	0.009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
12	23	960	8	20.0	1.9	74.0	37.5	103.0	334.8	1.2	0.9	0.0	3.7	3.1	7.7	2.9	5.5	0.0	8.4	0.472	0.75	1.14	0.95	0.4	614	1.65	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
14	28	1050	7.6	20.6	2.4	66.0	62.9	126.2	406.7	1.1	0.9	0.1	3.3	5.2	9.5	3.6	6.7	0.0	10.3	0.434	0.35	0.1	0.4	0.6	672	1.69	0.011	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
15	21	1300	7.4	24.7	2.9	82.0	70.2	177.0	382.6	0.9	1.1	0.1	4.1	5.8	11.0	5.0	6.3	0.0	11.3	0.483	0.3	0.1	1.5	0.15	832	1.45	0.004	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
16*	17	4900	6.8	577	89	400	165	945	915	86	25.1	2.3	10.0	6.9	44.3	27	15	1.8	43.8	8.7	3.45	0.82	0.1	0.2	3136	2.18	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
17	22	340	7.8	17.4	2.6	62.0	46.0	118.6	310.9	1.1	0.8	0.1	3.1	3.8	7.7	3.3	5.1	0.0	8.5	0.407	0.3	0.14	0.1	0.54	217	1.66	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
18	26	830	8	20.0	2.4	70.0	56.9	82.7	454.3	8.4	0.9	0.1	3.5	4.7	9.1	2.3	7.4	0.2	10.0	0.429	0.35	0.86	0.1	0.32	531	1.51	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
19	23	1350	8.1	30.6	3.9	72.0	64.1	188.6	358.7	1.1	1.3	0.1	3.6	5.3	10.3	5.3	5.9	0.0	11.2	0.631	0.9	0.28	1.5	0.14	864	1.56	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
20*	16	1550	7.5	759	81	336	40	1120	854	432	33	2.1	8.4	10.0	53.5	32	14	9.0	55	11.0	5.65	0.06	57	0.78	992	2.4	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
21	22	940	7.8	13.1	2.2	58.0	65.3	134.9	334.8	1.2	0.6	0.1	2.9	5.4	8.9	3.8	5.5	0.0	9.3	0.28	1.05	0.1	0.7	0.32	601	1.59	0.004	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
22	23	980	7.5	15.7	2.4	82.0	89.5	255.3	322.8	19.3	0.7	0.1	4.1	7.4	12.2	7.2	5.3	0.4	12.9	0.285	0.7	0.1	0.1	6.9	627	1.6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
23	22	1350	7.3	12.6	2.4	74.0	59.3	158.1	346.7	0.9	0.5	0.1	3.7	4.9	9.2	4.5	5.7	0.0	10.2	0.264	1.25	0.08	0.1	1.03	864	1.61	0.004	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

* Canales monitoreados

RAS= como coeficiente en meq/l de la ecuación $Na^+/\sqrt{1/2}(Ca^{2+}+Mg^{2+})$

T= temperatura

C.E.=conductividad eléctrica

SDT=sólidos totales disueltos

SST=Sólidos suspendidos totales

La localización de los pozos y canales monitoreados puede verse en la figura 5.2

Tabla A-2 Datos físico-químicos del segundo muestreo (febrero 1997) en ppm, excepto cuando se indique otra unidad.

← Balance de cargas en meq/l →

Pozo monitoreado	T °C	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	suma	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	suma	RAS	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	P ⁻	B	SDT	SST	Zn	Pb	Cu	Fe	Ni	Mn	Cd	Cr	Co	
1	26	930	7.1	9.3	2.8	60	73.81	33.37	597.8	1.185	0.404	0.072	3	6.1	9.576	0.943	9.8	0.025	10.77	0.19	0.5	0.71	0.4	0.87	1359	4.17	0.004	0.001	0.001	0.002	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
2	22	580	7.8	7.6	2.3	34	48.4	29.02	358.7	1.21	0.33	0.059	1.7	4	6.089	0.82	5.88	0.025	6.725	0.196	0.85	1.36	0.3	1.22	371	2.76	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
3	23	510	7.9	8.28	2.3	48	35.09	15.96	334.8	1.152	0.36	0.059	2.4	2.9	5.719	0.451	5.488	0.024	5.963	0.221	0.55	1.46	0.4	0.51	326	2.97	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
4*	17	3100	7.9	423	105	212	189	581	799	163	18.4	2.7	5.3	7.9	34.3	16.6	13.1	3.4	33.1	7.2	5.8	0.58	66	0.54	1984	4.64	0.101	0.001	0.017	13.79	0.011	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001
6*	16	3300	4	490	120	244	288	805	976	201	21.3	3.1	6.1	12	42.5	232	16	4.2	43.2	7.1	1.65	0.26	0.9	0.8	2112	6.74	0.002	0.002	0.002	0.013	0.007	13.54	0.008	0.002	0.001	0.001
7	25	810	7.4	15.5	2.6	56	59.29	75.44	418.5	0.897	0.674	0.067	2.8	4.9	8.441	2.131	6.86	0.019	9.01	0.343	0.55	0.52	0.2	0.67	594	3.23	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
8	24	430	7.6	6.4	1.8	22	37.51	20.31	275	1.177	0.278	0.046	1.1	3.1	4.524	0.574	4.508	0.025	5.106	0.192	1.2	3.26	0.5	0.41	275	4.05	0.002	0.001	0.001	0.002	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
9	26	350	7.8	5.5	1.3	20	33.88	18.86	227.2	0.543	0.239	0.033	1	2.8	4.072	0.533	3.724	0.011	4.268	0.173	0.65	0.96	0.1	0.51	224	3.87	0.002	0.001	0.001	0.002	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
10	25	740	7.5	10.3	1.8	52	52.03	146.5	239.1	1.259	0.448	0.046	2.6	4.3	7.394	4.139	3.92	0.026	8.086	0.241	0.45	0.86	0.2	0.34	573	4.72	0.004	0.002	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
11	24	620	7.6	8.3	2.3	38	55.66	21.76	406.5	0.881	0.361	0.059	1.9	4.6	6.92	0.615	6.664	0.018	7.297	0.2	0.3	2.08	0.1	0.46	396	4.61	0.014	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
12	21	910	7.7	19.5	1.8	72	54.45	111.7	382.6	1.309	0.848	0.046	3.6	4.5	8.994	3.156	6.272	0.027	9.455	0.421	0.45	1.23	0.7	1.05	728	3.09	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001
14	27	1100	7.5	20	2.6	82	56.87	145.1	370.6	1.177	0.87	0.067	4.1	4.7	9.736	4.098	6.076	0.025	10.5	0.415	0.25	0.1	0.8	0.92	799	4.32	0.004	0.001	0.001	0.001	0.004	0.013	0.001	0.001	0.001	0.001
15	25	1450	7.2	24.9	2.8	104	73.81	235	406.5	1.078	1.083	0.072	5.2	6.1	12.45	6.639	6.664	0.022	13.33	0.455	0.65	0.03	0.4	0.78	1018	4.08	0.006	0.001	0.002	0.001	0.004	0.014	0.001	0.001	0.001	0.001
16*	18	4600	6.6	444	160	316	273	910	793	100	19.3	4.1	7.9	11.4	42.7	26	13.0	2.1	41.1	6.2	1.8	0.1	0.6	0.69	3000	6.76	0.009	0.002	0.002	13.37	0.009	10.01	0.002	0.001	0.001	0.004
17	26	1050	7.5	17.5	2.3	92	59.29	233.6	263	0.798	0.761	0.059	4.6	4.9	10.32	6.598	4.312	0.017	10.93	0.349	0.35	0.1	0.1	0.87	785	3.92	0.006	0.001	0.001	0.002	0.004	0.013	0.001	0.001	0.001	0.001
18	26	810	7.7	19.5	2.3	66	54.45	89.95	430.4	1.062	0.848	0.059	3.3	4.5	8.707	2.541	7.056	0.022	9.619	0.429	0.7	0.86	0.4	0.63	605	3.81	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
19	20	1450	8	28.4	3.8	100	59.29	85.6	585.8	8.329	1.235	0.097	5	4.9	11.23	2.418	9.604	0.173	12.2	0.555	1.15	0.06	1.25	0.49	1021	4.02	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
20*	18	1800	7.4	531	120	144	115	686	854	76	23.1	3.1	3.6	4.8	34.6	19.6	14	1.6	35.2	11.3	2.2	0.12	52.5	1.38	1346	3.13	0.002	0.001	0.002	0.006	0.009	0.013	0.002	0.002	0.001	0.001
21	20	1000	7.7	12.8	1.8	74	68.97	121.9	466.3	1.169	0.557	0.046	3.7	5.7	10	3.443	7.644	0.024	11.11	0.257	0.5	0.1	0.6	0.46	640	4.14	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001
23	25	1100	7.5	11.6	2.3	88	50.82	182.8	286.9	1.111	0.504	0.059	4.4	4.2	9.163	5.164	4.704	0.023	9.891	0.243	0.85	0.08	0.1	5.8	704	2.74	0.004	0.001	0.001	0.002	0.002	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001
24	25	430	7.9	6.6	2.1	58	26.62	26.11	310.9	19.24	0.287	0.054	2.9	2.2	5.441	0.738	5.096	0.401	6.234	0.18	0.3	0.66	0.4	0.37	275	2.81	0.004	0.001	0.001	0.001	0.004	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
25	23	530	7.6	6.2	1.8	30	33.88	26.11	298.9	0.798	0.27	0.046	1.5	2.8	4.616	0.738	4.9	0.017	5.654	0.184	0.45	1.7	0.2	0.35	340	3.25	0.019	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
26	22	910	7.9	19.5	1.3	86	58.08	94.3	466.3	0.864	0.848	0.033	4.3	4.8	9.981	2.664	7.644	0.018	10.33	0.397	0.3	0.1	0.95	0.58	582	3.74	0.018	0.002	0.001	0.018	0.004	0.008	0.001	0.001	0.001	0.001
27*	19	1950	7.4	28.4	5.7	250	102.9	269.8	932.6	1.16	1.235	0.146	12.5	8.5	22.38	7.623	15.29	0.024	22.93	0.381	1.8	0.06	32	1.12	1353	4.60	0.002	0.002	0.002	0.009	0.002	0.013	0.002	0.001	0.001	0.001
28	24	1800	7.3	9.5	2.3	72	47.19	84.15	382.6	0.519	0.413	0.059	3.6	3.9	7.972	2.377	6.272	0.011	8.66	0.213	1.25	0.08	35	0.44	1021	2.95	0.002	0.001	0.001	0.006	0.014	0.001	0.001	0.001	0.001	
29	25	970	7.2	15.5	2.6	62	75.02	169.7	346.7	1.235	0.674	0.067	3.1	6.2	10.04	4.795	5.684	0.026	10.5	0.313	1.2	0.14	0.1	2.2	620	3.03	0.004	0.001	0.001	0.004	0.007	0.008	0.002	0.001	0.001	0.001

* Canales monitoreados

ΣAS= como coeficiente en meq/l de la ecuación $\text{Na}^+/\sqrt{1/2(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})}$

T= temperatura

Σ.E.=conductividad eléctrica

SDT=Sólidos totales disueltos

ST=Sólidos suspendidos totales

La localización de los pozos y canales monitoreados puede verse en la figura 5.2

Tabla A-3 Datos físico-químicos del tercer muestreo (marzo 1997) en ppm, excepto cuando se indique otra unidad.

Balace de cargas en meq/l



Pozo monitoreado	T °C	C.E. μS/cm	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	suma	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	suma	RAS	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	P ⁻	B	SDT	SST	Zn	Pb	Cu	Fe	Ni	Mn	Cd	Cr	Co			
1	26	880	7.3	9.5	2.6	64	77.44	34.82	585.8	1.144	0.413	0.067	3.2	6.4	10.08	0.984	9.604	0.024	10.61	0.189	0.5	1.21	0.7	0.73	713	4.19	1.80	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
3	23	510	7.9	8.1	2.1	28	55.66	14.51	346.7	1.169	0.352	0.054	1.4	4.6	6.406	0.41	5.684	0.024	6.118	0.203	0.3	2.62	0.6	0.32	466	9.90	1.80	0.003	0.001	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
4*	19	2700	7.6	508	175	288	355	980	1342	48	22.1	4.5	7.2	14.8	48.6	28	22	1.0	51	6.7	5.5	0.42	75	0.46	2247	154.1	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
6*	20	24000	3.8	416	234	280	312	910	854	316	18.1	6.0	7.0	13.0	44.1	26.0	14.0	6.6	46.6	5.8	4	0.1	11	0.67	2494	6.81	1.80	0.001	0.001	36.00	0.007	11.30	0.009	0.001	0.001	0.001	0.001	
7	25	760	7.6	14.3	2.3	40	70.18	68.19	430.4	0.84	0.622	0.059	2	5.8	8.481	1.926	7.056	0.017	9	0.315	0.15	0.94	1.15	0.46	608	4.56	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
8	23	440	7.9	5.7	1.5	28	31.46	10.16	286.9	0.807	0.248	0.038	1.4	2.6	4.286	0.287	4.704	0.017	5.008	0.175	0.1	3.8	0.8	0.25	405	3.97	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
9	22	340	7.7	5.2	1.3	20	33.88	7.254	227.2	1.086	0.226	0.033	1	2.8	4.059	0.205	3.724	0.023	3.952	0.164	0.1	1.46	0.2	0.22	320	3.47	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
10	21	480	7.6	5.2	1.8	28	65.34	29.02	358.7	0.535	0.226	0.046	1.4	5.4	7.072	0.82	5.88	0.011	6.711	0.123	0.2	1.23	0.5	0.27	404	3.48	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
11	22	610	7.7	6.2	2.1	52	58.08	39.17	442.4	1.226	0.27	0.054	2.6	4.8	7.723	1.107	7.252	0.026	8.384	0.14	0.05	1.15	0.2	0.32	476	4.02	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
12	22	920	7.7	16.8	1.5	80	55.66	124.8	406.5	0.724	0.73	0.038	4	4.6	9.369	3.525	6.664	0.015	10.2	0.352	0.25	1.7	0.9	0.69	695	3.95	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
14	27	1050	7.6	19.39	2.1	56	75.02	132	430.4	1.276	0.843	0.054	2.8	6.2	9.897	3.729	7.056	0.027	10.81	0.397	0.3	0.22	0.5	0.57	853	3.66	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
15	25	1250	7.4	24.9	5.399	100	70.18	169.7	502.2	1.136	1.083	0.138	5	5.8	12.02	4.795	8.232	0.024	13.05	0.466	0.9	0.1	1.85	0.54	967	3.66	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
16*	19	3000	6.3	473	163	332	326	840	1281	148	20.6	4.2	8.3	13.6	46.7	24.0	21.0	3.1	48.1	6.3	6.85	0.22	1	0.65	1920	0.87	1.80	0.001	0.001	15.80	0.004	4.60	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
17	25	1080	7.6	19.1	2.3	72	70.18	136.4	406.5	0.823	0.83	0.059	3.6	5.8	10.29	3.852	6.664	0.017	10.53	0.383	0.1	0.1	0.1	0.44	850	3.54	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
18	23	830	7.8	11.2	2.1	64	67.76	113.2	430.4	0.691	0.487	0.054	3.2	5.6	9.341	3.197	7.056	0.014	10.27	0.232	0.1	1.36	0.6	0.34	637	3.79	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
19	22	1450	8	26.5	3.4	92	79.86	230.7	394.5	1.045	1.152	0.087	4.6	6.6	12.44	6.516	6.468	0.022	13.01	0.487	0.1	0.08	1.5	0.42	1142	3.14	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
20*	18	1700	7.3	531	117	48	50	595	793	91	23.1	3.0	1.2	2.1	29.4	17.0	13.0	1.9	31.9	18.0	3.25	0.06	45	1	1288	4.59	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
21	21	990	7.8	12	1.8	88	64.13	137.8	418.5	1.177	0.522	0.046	4.4	5.3	10.27	3.893	6.86	0.025	10.78	0.237	0.1	0.1	0.9	0.4	774	3.34	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
26	22	870	8	23.5	1	76	43.56	89.93	418.5	1.21	1.022	0.026	3.8	3.6	8.447	2.54	6.86	0.025	9.426	0.531	0.9	0.1	0.9	0.54	744	3.31	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
28*	20	1850	7	8.5	2.1	96	72.6	111.7	442.4	1.21	0.37	0.054	4.8	6	11.22	3.156	7.252	0.025	10.43	0.159	2	0.06	42.5	0.4	1184	4.68	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
29	22	1030	7.1	8.8	2.3	76	72.6	161	382.6	19.3	0.383	0.059	3.8	6	10.24	4.549	6.272	0.402	11.22	0.173	0.1	0.1	0.3	1.35	757	3.85	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
30	21	1110	7.8	17.2	2.3	92	67.76	177	418.5	0.872	0.748	0.059	4.6	5.6	11.01	5	6.86	0.018	11.88	0.331	0.8	0.32	0.8	0.46	889	3.51	1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	

* Canales monitoreados

RAS= como coeficiente en meq/l de la ecuación $Na^+/\sqrt{1/2}(Ca^{2+}+Mg^{2+})$

T= temperatura

C.E.=conductividad eléctrica

SDT=Sólidos totales disueltos

SST=Sólidos suspendidos totales

La localización de los pozos y canales monitoreados puede verse en la figura 5.2

Tabla A-4 Datos físico-químicos del cuarto muestreo (abril 1997) en ppm, excepto cuando se indique otra unidad.

Balance de cargas en meq/l



Pozo monitoreado	T °C	C.E. µS/cm	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	suma	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	suma	RAS	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	P ⁻	B	SDT	SST	Zn	Pb	Cu	Fe	Ni	Mn	Cd	Cr	Co	
1	25	990	6.9	9.3	2.8	64	104.1	33.37	645.6	10	0.404	0.072	3.2	8.6	12.28	0.943	10.58	0.208	11.73	0.166	0.2	1.55	0.9	0.39	612	2.75	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002	0.002	0.000	0.002	
3	22	560	7.2	8.3	2.4	40	43.56	30.47	346.7	20	0.361	0.062	2	3.6	6.022	0.861	5.684	0.416	6.961	0.216	0.1	3.6	0.7	0.25	408	4.67	0.000	0.002	0.002	0.001	0.000	0.004	0.002	0.000	0.002	
4*	16	1300	7.4	466	136	440	312	959	793	177	20.3	3.5	11.0	13.0	47.8	27.4	13.0	3.7	44.1	6.0	7.45	0.52	50	4.26	1032	9.13	0.107	0.002	0.000	0.000	0.010	0.000	0.002	0.002	0.004	
6*	20	3000	3.8	609	202	240	40	241	536	1488	26.5	5.2	6.0	10.0	47.7	6.9	8.8	31.0	46.6	9.4	7.6	0.14	21.3	0.67	1920	122.2	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.001	0.001	0.001
7	22	830	7.3	14.8	2.6	44	55.66	71.09	334.8	42.5	0.643	0.067	2.2	4.6	7.51	2.008	5.488	0.885	8.381	0.349	2.15	2	0.9	0.6	606	4.78	0.012	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.002	
8	21	450	7.5	6.4	1.8	40	48.4	14.51	298.9	20	0.278	0.046	2	4	6.324	0.41	4.9	0.416	5.726	0.161	0.1	6.52	1.4	0.27	347	4.44	0.011	0.001	0.001	0.001	0.004	0.002	0.001	0.004	0.002	
9	24	360	7.5	5.2	1.5	36	38.72	8.705	263	7.5	0.226	0.038	1.8	3.2	5.265	0.246	4.312	0.156	4.714	0.143	0.45	2.53	0.1	0.12	276	0.26	0.000	0.001	0.001	0.001	0.004	0.002	0.001	0.004	0.002	
9'	23	350	7.2	5.2	1.5	40	36.3	7.254	275	7.5	0.226	0.038	2	3	5.265	0.205	4.508	0.156	4.869	0.143	0.35	2.5	0.2	0.16	285	3.19	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004	0.002	0.002	0.004	0.002	
10	24	600	7.4	10.8	2.1	56	65.34	114.6	298.9	5	0.47	0.054	2.8	5.4	8.723	3.238	4.9	0.104	8.242	0.232	0.2	2.56	0.3	0.42	514	3.06	0.024	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.000	0.002	
11	23	650	7.4	8.3	2.4	60	65.34	20.31	430.4	30	0.361	0.062	3	5.4	8.822	0.574	7.056	0.625	8.254	0.176	0.1	3.75	0.3	0.6	462	3.60	0.000	0.002	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.002	
12	21	970	7.5	19.1	1.8	68	53.24	81.24	388	55	0.83	0.046	3.4	4.4	8.677	2.295	6.36	1.145	9.8	0.421	0.1	2.88	1	0.8	620	2.30	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.007	0.002	0.000	0.002	
14	28	720	7.2	23.5	2.6	44	67.76	103	322.8	55	1.022	0.067	2.2	5.6	8.888	2.91	5.292	1.145	9.347	0.517	0.1	0.06	0.7	0.78	773	2.19	0.012	0.001	0.001	0.001	0.002	0.010	0.002	0.000	0.002	
15	25	1400	7	26.5	2.8	92	84.7	171.2	454.3	65	1.152	0.072	4.6	7	12.82	4.836	7.448	1.353	13.64	0.478	0.8	0.24	0.95	0.71	1009	3.35	0.070	0.001	0.002	0.002	0.003	0.047	0.002	0.000	0.004	
16*	17	2100	7.5	648	93	320	264	1116	976	63	28.2	2.4	8.0	11.0	49.6	31.9	16.0	1.3	49.2	9.2	2.25	0.26	9	0.37	1524	3.83	0.004	0.002	0.000	0.000	0.004	0.007	0.003	0.001	0.004	
17	25	1000	7.2	18.8	2.6	76	82.28	145.1	418.5	55	0.817	0.067	3.8	6.8	11.48	4.098	6.86	1.145	12.1	0.355	0.1	0.06	0.4	0.32	730	3.36	0.100	0.001	0.001	0.000	0.002	0.010	0.002	0.001	0.002	
18	23	830	7.7	12.8	2.4	52	65.34	73.99	346.7	60	0.557	0.062	2.6	5.4	8.618	2.09	5.684	1.249	9.023	0.278	0.1	1.5	0.5	0.3	577	2.36	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002	
19	22	1300	7.9	30	3.6	96	79.86	181.3	346.7	130	1.304	0.092	4.8	6.6	12.8	5.123	5.684	2.707	13.51	0.546	0.57	0.24	2.35	0.3	961	3.60	0.000	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.002	
20*	20	1800	7.7	713	120	440	312	1274	915	96	31.1	3.1	11.0	13.0	58.2	36.4	15.0	2.0	53.4	9.4	3.45	0.08	45	0.98	1152	5.28	0.070	0.001	0.001	0.010	0.007	0.011	0.000	0.000	0.002	
26	22	910	7.5	23.5	1.8	80	50.82	142.2	358.7	10	1.022	0.046	4	4.2	9.268	4.016	5.88	0.208	10.1	0.505	0.5	0.12	1.15	0.51	789	0.36	0.002	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.002	0.001	0.002	
28*	20	1700	7.2	14.8	2.8	108	55.66	97.2	430.4	80	0.643	0.072	5.4	4.6	10.72	2.746	7.056	1.666	11.47	0.288	0.25	0.12	50	0.3	1088	3.75	0.100	0.001	0.002	0.012	0.004	0.000	0.002	0.002	0.002	
30	16	1000	8	20	2.8	60	67.76	140.7	382.6	10	0.87	0.072	3	5.6	9.541	3.975	6.272	0.208	10.46	0.419	0.9	0.37	0.7	0.34	735	3.59	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.010	0.002	0.001	0.004	
31	20	1600	7.4	14.4	2.8	176	174.2	111.7	609.8	560	0.626	0.072	8.8	14.4	23.9	3.156	9.996	11.66	24.81	0.184	0.57	0.14	0.2	0.8	1247	3.55	0.000	0.001	0.002	0.000	0.004	0.004	0.001	0.001	0.004	

Canales monitoreados

AS= como coeficiente en meq/l de la ecuación $Na^+ / \sqrt{1/2(Ca^{2+} + Mg^{2+})}$

= temperatura

.E.=conductividad eléctrica

DT=Sólidos totales disueltos

ST=Sólidos suspendidos totales

a localización de los pozos y canales monitoreados puede verse en la figura 5.2

Tabla A-6 Datos físico-químicos del sexto muestreo (julio 1997) en ppm, excepto cuando se indique otra unidad.

← Balance de cargas en meq/l →

Pozo monitorado	T °C	C.E. μS/cm	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	suma	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	suma	RAS	NO ₂	NO ₃	P	B	SDT	SST	Zn	Pb	Cu	Fe	Ni	Mn	Cd	Cr	Co
1	27	980	6.9	11	3.3	56	79.86	54.87	394.5	67.5	0.478	0.085	2.8	6.6	9.963	1.55	6.468	1.405	9.423	0.221	0.1	0.8	0.8	0.22	1220	1.94	0.003	0.001	0.001	0.004	0.003	0.01	0.002	0.000	0.002
3	23	550	7.1	9.2	2.8	28	24.2	14.16	203.3	2.5	0.4	0.072	1.4	2	3.872	0.4	3.332	0.052	3.784	0.307	0.25	0.36	0.1	0.02	945	2.52	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.000	0.002
4*	18	2950	7.7	496	140	88	139	637	854	201	21.6	3.6	2.2	5.8	33.2	18.2	14.0	4.2	36.4	11.0	0.15	0.56	60	0.26	1888	2.82	0.009	0.002	0.004	0.008	0.004	0.04	0.002	0.013	0.003
6*	19	2750	7.3	558	140	96	134	647	915	144	24.3	3.6	2.4	5.6	35.9	18.5	15.0	31.0	36.5	12.2	0.15	0.4	92.5	0.22	1760	3.68	1.118	0.002	0.009	14.04	0.008	0.009	0.002	0.003	0.004
7	23	840	7.4	17	3	44	33.88	77.88	203.3	30	0.739	0.077	2.2	2.8	5.816	2.2	3.332	0.625	6.157	0.467	0.3	0.64	0.8	0.12	537	3.29	0.003	0.001	0.001	0.004	0.003	0.002	0.000	0.001	
8	23	500	7.7	7.3	2.1	36	12.1	21.24	143.5	2.5	0.317	0.054	1.8	1	3.171	0.6	2.352	0.052	3.004	0.268	0.15	2.88	0.7	0.02	320	2.18	0.003	0.001	0.001	0.000	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001
9	23	390	7.5	5.8	1.9	32	21.78	21.24	143.5	2.5	0.252	0.049	1.6	1.8	3.701	0.6	2.352	0.052	3.004	0.193	0.35	0.48	0.3	0.02	254	2.54	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.001	
10	22	550	7.6	9.4	2.4	28	24.2	26.55	179.3	12	0.409	0.062	1.4	2	3.87	0.75	2.94	0.25	3.94	0.313	0.35	1.6	0.95	0.02	352	3.33	0.002	0.001	0.001	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002
11	23	730	7.5	17	2.8	52	36.3	90.27	215.2	42	0.739	0.072	2.6	3	6.411	2.55	3.528	0.874	6.952	0.442	0.15	1.2	0.5	0.02	468	2.48	0.004	0.002	0.002	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	0.002
12	21	910	7.8	19.6	2.1	24	29.04	10.62	239.1	35	0.852	0.054	1.2	2.4	4.506	0.3	3.92	0.729	4.949	0.635	0.55	0.18	1.7	0.36	582	2.69	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.007	0.002	0.001	0.002
14	29	1130	7.5	26.6	2.8	66	43.56	122.1	275	48	1.157	0.072	3.3	3.6	8.128	3.45	4.508	0.999	8.957	0.623	0.15	0.15	1	0.34	723	3.53	0.004	0.001	0.001	0.002	0.003	0.010	0.001	0.001	0.001
15	25	1260	7.1	24.2	3	100	70.18	184.1	286.9	58	1.052	0.077	5	5.8	11.93	5.2	4.704	1.208	11.11	0.453	0.25	0.06	1.15	0.1	806	2.96	0.009	0.002	0.004	0.004	0.003	0.040	0.002	0.001	0.003
16*	21	3500	7.4	501	97	80	124	259	671	720	21.8	2.5	2.0	5.2	31.45	7.4	11.0	15.0	33.4	11.5	0.25	0.48	6.25	0.12	2240	3.32	0.010	0.003	0.003	0.040	0.011	0.118	0.002	0.001	0.004
17	25	1150	7.5	23.8	2.8	72	41.14	139.8	251.1	42	1.035	0.072	3.6	3.4	8.107	3.95	4.116	0.874	8.94	0.553	0.25	0.08	0.9	0.04	736	2.22	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002
17*	27	1100	7.5	22.9	2.8	56	58.08	164.6	227.2	26	0.996	0.072	2.8	4.8	8.667	4.65	3.724	0.541	8.915	0.511	0.3	0.04	0.7	0.04	704	3.65	0.004	0.001	0.001	0.002	0.004	0.007	0.001	0.001	0.001
19	22	1580	8	34	4.4	80	50.82	185.9	215.2	75	1.478	0.113	4	4.2	9.791	5.25	3.528	1.562	10.34	0.73	0.25	0.36	2.2	0.64	992	1.98	0.004	0.001	0.001	0.002	0.004	0.003	0.001	0.002	0.002
20*	23	1600	7.5	648	117	80	124	931	359	115	28.2	3.0	2.0	5.2	38.4	26.6	5.9	2.4	34.9	15.0	1.6	0.15	39.3	0.4	1024	3.28	0.041	0.002	0.002	0.002	0.009	0.003	0.002	0.001	0.004
26	22	1000	7.9	23.8	1.6	56	38.72	118.6	251.1	38	1.035	0.041	2.8	3.2	7.076	3.35	4.116	0.791	8.257	0.597	0.45	0.22	1.4	0.66	640	3.78	0.004	0.002	0.001	0.004	0.003	0.011	0.001	0.001	0.002
33	24	1050	8	15.8	2.8	76	53.24	207.1	203.3	34	0.687	0.072	3.8	4.4	8.959	5.85	3.332	0.708	9.89	0.339	0.57	0.18	3.45	2.03	672	3.32	0.009	0.002	0.001	0.003	0.004	0.01	0.001	0.001	0.002

* Canales monitoreados

RAS= como coeficiente en meq/l de la ecuación $Na^+/\sqrt{1/2}(Ca^{2+}+Mg^{2+})$

T= temperatura

C.E.=conductividad eléctrica

SDT=Sólidos totales disueltos

SST=Sólidos suspendidos totales

La localización de los pozos y canales monitoreados puede verse en la figura 5.2

Tabla A-7 Datos físico-químicos del séptimo muestreo (octubre 1997) en ppm, excepto cuando se indique otra unidad.

Balance de cargas en meq/l

Pozo monitoreado	T °C	C.E. µS/cm	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	suma	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	suma	SO ₄ ²⁻	RAS	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	P ⁻	B	SDT	SST	Zn	Pb	Cu	Fe	Ni	Mn	Cd	Cr	Co	
1	20	1100	7.8	171	23.4	100	62.92	182.8	621.7	7.435	0.6	5	5.2	18.23	5.164	10.19	2.207	17.36	106	3.292	0.45	1.7	0.8	0.69	917	2.85	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
3	23	590	7.9	75.9	17.8	40	29.04	132	346.7	3.3	0.456	2	2.4	8.156	3.729	5.684	0.13	9.5	6.5	2.225	0.65	3.18	0.9	0.46	592	3.63	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
4*	18	3000	7.9	552	312	72	108	385	1586	24.0	8.0	1.8	4.5	38.3	11.0	26.0	4.16	41.2	201	14.0	0.9	0.86	124	0.71	2151	5.12	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
5	25	450	8	42	10	40	26.62	117.5	239.1	1.826	0.256	2	2.2	6.282	3.32	3.92	0.208	7.448	10	1.26	0.65	2.8	0.6	0.63	520	1.91	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
6*	20	530	7.5	798	351	344	189	189	585	34.7	9.0	8.6	7.9	60.2	5.36	9.60	52.0	67.0	2496	12.0	1	1.28	2.5	1.18	4076	7.36	1.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
7	24	900	7.3	116	19.4	52	24.2	204.6	227.2	5.043	0.497	2.6	2	10.14	5.779	3.724	1.041	10.54	50	3.326	0.5	1.66	1	0.78	778	3.56	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	22	500	7.8	41.9	33	36	33.88	140.3	154.2	1.821	0.846	1.8	2.8	7.267	3.964	2.528	0.208	6.701	10	1.201	0.57	4.12	1.1	0.38	523	2.81	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
9	25	400	7.8	37.5	10.4	32	14.52	103	119.6	1.63	0.267	1.6	1.2	4.697	2.91	1.96	0.791	5.661	38	1.378	0.57	2	0.5	0.34	512	0.34	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
10	24	900	8	80	14.6	48	75.02	306.1	227.2	3.478	0.374	2.4	6.2	12.45	8.647	3.724	0.666	13.04	32	1.677	0.45	1.7	1.1	0.58	770	1.92	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
11	22	770	7.9	69	18.2	28	43.56	132	310.9	3	0.467	1.4	3.6	8.467	3.729	5.096	0.895	9.721	43	1.897	0.35	3.26	0.2	0.56	719	1.81	0.01	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
12	22	1050	8.2	168	13.8	36	24.2	269.8	292.8	7.304	0.354	1.8	2	11.46	7.623	4.8	1.228	13.65	59	5.299	0.7	2.12	1.6	0.65	860	1.94	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
14	28	1200	7.8	210	18.6	48	48.4	306.1	454.3	9.13	0.477	2.4	4	16.01	8.647	7.448	1.312	17.41	63	5.104	0.3	0.16	0.4	0.67	993	2.67	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
15	25	1450	7.5	228	21	92	41.14	210.4	561.9	9.913	0.538	4.6	3.4	18.45	5.943	9.212	1.936	17.09	93	4.957	0.65	0.26	0.9	0.25	1161	256	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
16*	20	6250	7.6	740	292	360	302	273	359	32.2	7.5	9.0	12.6	61.3	7.8	5.9	48.0	61.7	2304	10.0	0.57	1.1	1.1	0.34	5548	4.91	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
17	27	1150	7.2	168	19	40	55.66	145.1	466.3	7.304	0.487	2	4.6	14.39	4.098	7.644	1.228	12.97	59	4.021	0.5	0.14	0.95	0.4	1012	0.67	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
18	27	1150	7.8	122.5	18.6	44	38.72	101.6	406.5	5.326	0.477	2.2	3.2	11.2	2.869	6.664	1.041	10.57	50	3.988	0.57	0.14	0.3	0.69	1126	0.24	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
19	22	920	7.9	290	30	64	53.24	262.6	550.0	12.61	0.769	3.2	4.4	20.98	7.418	9.016	2.207	18.64	106	3.241	0.57	0.14	0.3	0.69	868	0.09	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
20*	20	1600	8.2	887	234	280	40	938	793	38.6	6.0	7.0	10.0	61.6	26.8	13.0	27.0	66.8	1296	14.0	0.45	1	1.0	0.58	1365	1.71	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
26	22	1700	7.9	264	14.6	32	50.82	222	478.2	11.48	0.374	1.6	4.2	17.65	6.27	7.84	1.499	15.61	72	4.437	0.5	0.26	2.6	0.37	1393	0.28	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
33	22	1450	8.2	118	19.4	72	50.82	187.2	346.7	5.13	0.497	3.6	4.2	13.43	5.287	5.684	1.749	12.72	84	6.74	1.95	0.28	32.5	1.94	1149	0.31	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
35	23	1150	8.1	42	9.7	30	13.31	29.02	215.2	1.826	0.249	1.5	1.1	4.675	0.82	3.528	0.229	4.577	11	2.598	0.57	0.14	0.8	0.58	966	4.39	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
36	22	400	7.8	111.5	10	28	14.52	33.37	358.7	4.848	0.256	1.4	1.2	7.704	0.943	5.88	0.458	7.281	22	1.602	0.57	0.28	0.9	2.35	499	2.39	0.01	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

* Canales monitoreados

RAS= como coeficiente en meq/l de la ecuación $Na^+/\sqrt{1/2}(Ca^{2+}+Mg^{2+})$

T= temperatura

C.E.=conductividad eléctrica

SDT=Sólidos totales disueltos

SST=Sólidos suspendidos totales

La localización de los pozos y canales monitoreados puede verse en la figura 5.2

Tabla A-8 Resultados de laboratorio en suelos analizados por Girón (2002)**Solonchak en temporada de lluvias**

PROFUNDIDAD cm	POROSIDAD (%)	Materia orgánica %	pH	SiO ₂	CE mS/cm	CATIONES SOLUBLES meq/l				ANIONES SOLUBLES meq/l					RAS
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
0-25	54.72	1.3	7.7	47.1	17.1	17.5	62.7	84.5	3.1	150.2	0.2	0	5.3	14.7	13.34
25-43	52.17	0.5	7.3	46.7	12.3	15.7	45.3	64.7	1.1	112.2	0.1	0	5.1	8.90	11.72
43-63	35.85	1.1	9.1	46.9	23.7	2.3	1.7	230.1	2.2	180.3	1.1	6.1	12.5	27.3	163.9
67-120	43.40	0.3	8.2	47.0	23.5	22.5	94	115	2.5	173.9	0.7	0.7	11.3	50.4	16.96
120-150	50.94	0.1	7.8	46.9	18.5	22.7	69.4	93.5	3	159.1	0.9	0	9	18.0	15.87

Solonchak en temporada de sequía

PROFUNDIDAD cm	POROSIDAD (%)	Materia orgánica %	pH	SiO ₂	CE mS/cm	CATIONES SOLUBLES meq/l				ANIONES SOLUBLES meq/l					RAS
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
0-25	50.94	0.9	7.9	48.1	20.5	19.5	65.9	85.9	3.7	165.7	0.3	2.1	9.1	25	13.7
25-43	48.93	0.3	7.9	47.2	17.0	17.3	60.5	78.9	2.9	147.5	0.2	0	5.5	15.2	12.66
43-63	35.84	0.8	9.3	47.3	26.1	3.3	1.5	285	2.1	195.7	1.2	6.7	13.7	30.1	185
67-120	37.73	0.1	8.5	48.1	24.3	24.7	100.1	129	2.2	180.3	0.5	0.5	12.7	55.1	16.34
120-150	47.16	0.1	8.1	47.3	17.4	21.7	70.3	87.9	2.5	165.2	0.7	0	10.3	19.7	12.96

Solonetz en temporada de lluvias

PROFUNDIDAD cm	POROSIDAD (%)	Materia orgánica %	pH	SiO ₂	CE mS/cm	CATIONES SOLUBLES meq/l				ANIONES SOLUBLES meq/l					RAS
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
0-10	58.49	4.3	7.3	48.0	0.75	1.0	1.4	6.0	0.2	12.0	0	0	3.0	15.6	4.2
0-33	39.62	1.1	7.7	49.1	1.25	1.1	2.7	8.5	0.2	25.3	0	0	5.2	30.5	6.2
33-80	39.62	1.0	8.1	49.2	3.0	8.3	10.2	17.8	0.4	28.7	0	0	7.8	36.5	5.85
80-150	50.94	0.7	8.2	53.1	2.5	3.1	4.1	16.1	0.3	12.8	0	0	9.9	23.4	8.51
150-200	50.94	0.3	8.0	53.2	6.3	11.4	19.6	37.5	0.7	60.7	0	0	7.3	70.2	9.6

Solonetz en temporada de sequía

PROFUNDIDAD cm	POROSIDAD (%)	Materia orgánica %	pH	SiO ₂	CE mS/cm	CATIONES SOLUBLES meq/l				ANIONES SOLUBLES meq/l					RAS
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
0-10	50	3.9	7.5	48.5	3.2	8.4	10.3	19.1	0.2	27.8	0	0	7.5	1.1	13.5
0-33	39.62	1.0	7.9	50.5	4.5	8.7	11.2	21.5	0.3	37.3	0	0	8.7	1.7	6.8
33-80	39.62	0.9	8.3	50.0	4.35	7.9	10.3	18.3	0.4	42.1	1.1	0	8.9	1.5	6.1
80-150	47.16	0.8	8.4	51.0	3.0	5.2	5.2	16.8	0.4	22.3	0.7	0	6.3	1.1	7.36
150-200	47.16	0.4	8.3	52.0	7.6	12.5	18.7	43.2	0.4	49	0.9	0	9.8	2.5	10.9

Vertisol en temporada de lluvias

PROFUNDIDAD cm	POROSIDAD (%)	Materia orgánica %	pH	SiO ₂	CE mS/cm	CATIONES SOLUBLES meq/l				ANIONES SOLUBLES meq					RAS
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
0-10	54.72	5.1	6.7	51.5	19.1	17.5	62.7	84.5	3.1	150.2	0.2	0	5.3	14.7	13.34
0-30	52.17	2.4	6.8	53.9	12.3	15.7	45.3	64.7	1.1	112.2	0.1	0	5.1	8.90	11.72
30-90	35.85	2.2	6.9	57.2	28.7	2.3	1.7	230.1	2.2	180.3	1.1	6.1	12.5	27.3	163.9
90-160	43.40	0.6	7.2	37.9	22.5	22.5	94	115	2.5	173.9	0.7	0.7	11.3	50.4	16.96
160-220	50.94	0.1	7.5	42.3	20.5	22.7	69.4	93.5	3	159.1	0.9	0	9	18.0	15.87

Vertisol en temporada de sequía

PROFUNDIDAD cm	POROSIDAD (%)	Materia orgánica %	pH	SiO ₂	CE mS/cm	CATIONES SOLUBLES meq/l				ANIONES SOLUBLES meq/l					RAS
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
0-10	51.72	4.3	6.9	48.3	20.1	19.5	65.9	85.9	3.7	165.7	0.3	2.1	9.1	25	13.7
0-30	44	1.7	7.3	47.0	15	17.3	60.5	78.9	2.9	147.5	0.2	0	5.5	15.2	12.66
30-90	33	1.7	7.5	48.2	26.2	3.3	1.5	285	2.1	195.7	1.2	6.7	13.7	30.1	185
90-160	39	0.4	8.0	46.2	29.1	24.7	100.1	129	2.2	180.3	0.5	0.5	12.7	55.1	16.34
160-220	46.4	0	8.2	48.0	21.8	21.7	70.3	87.9	2.5	165.2	0.7	0	10.3	19.7	12.96

Cambisol en temporada de sequía

PROFUNDIDAD cm	POROSIDAD (%)	Materia orgánica %	pH	SiO ₂	CE mS/cm	CATIONES SOLUBLES meq/l				ANIONES SOLUBLES meq/l					RAS
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
0-33	36.2	3.1	8.5	46.0	4.5	2.4	2	52	5.5	11.5	0	0.9	2.1	3.7	35.1
33-56	43	1.9	8.6	47.0	5.1	2.9	1.8	50	3.7	12	0	0.9	2.2	3.7	33
56-93	43	1.0	8.6	47.0	5.7	2.5	2	50	3.1	8.9	0	0.8	1.8	4.4	33.3
93-151	54	0.7	8.1	53.0	6.3	7.2	3.1	65	2.3	7	0	0.7	1.8	4.6	28.8

Cambisol en temporada de lluvias

PROFUNDIDAD cm	POROSIDAD (%)	Materia orgánica %	pH	SiO ₂	CE mS/cm	CATIONES SOLUBLES meq/l				ANIONES SOLUBLES meq/l					RAS
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
0-33	54.1	3.9	8.2	45.1	1.5	2	1.9	41.1	4	10.2	0	0.8	1.7	3.2	29.56
33-56	37	2.2	8.4	47.0	1.7	2.3	1.4	40	3.2	10.4	0	0.8	1.7	3.1	29.41
56-93	45	1.4	8.4	46.9	1.4	2.3	1.7	39.7	3	6.4	0	0.7	1.5	3.3	28.15
93-151	56	0.9	7.9	54.0	2.1	5.5	2.7	43.5	1.7	5.2	0	0.6	1.4	3.4	25.3

A)		
Km 27 Gran Canal	Km 47 Gran Canal	Tizayuca
<p>Temperatura media anual=15.1°C Precipitación anual=563.6 mm Mes más seco=Febrero (1.9 mm) Mes más húmedo=Julio (112.8 mm) Mes más caliente= Junio (17.6°C) Mes más frío= Enero (11.9°C)</p> <p>1.-Precipitación anual en cm=56.3, inferior al valor de la fórmula $r_t=2t + 28=58.2$ cm, es un clima seco=B 2.-P/T=37.3, superior a 22.9 se asigna: S, El % de precipitación invernal respecto a la anual es 2.8, menor a 5, se asigna: w (w) 3.La temperatura anual está entre 12 y 18°C, la del mes más frío (11.9) entre -3 y 18 y la del más caliente (17.6) bajo 18, se asigna: k' 4.-Diferencia de temperatura entre el mes más frío y el más caliente del año es 5.7°C, se asigna: (i') 5.-Mes más caliente, después del solsticio de verano (21 de Junio), se asigna: g'</p> <p>El tipo de clima es BS,w(w)k'(i')g'= Seco semiárido, régimen de lluvias en verano, con verano fresco largo, con poca oscilación térmica anual</p>	<p>Temperatura media anual=15.2°C Precipitación anual=688.4.6 mm Mes más seco=Enero (8.2 mm) Mes más húmedo=Agosto (136.8 mm) Mes más caliente= Junio (17.5°C) Mes más frío= Enero (11.0°C)</p> <p>1.-Precipitación anual en cm= 68.8, superior al valor de la fórmula $r_t=2t + 28=58.4$ cm, es un clima templado=C 2.-P/T=45.3, menor a 55, pero superior a 43.2 y el % de precipitación invernal respecto a la anual es 4.9, menor a 5, se asigna: w_i(w) 3.La temperatura anual está entre 12 y 18°C, la del mes más frío (11) entre -3 y 18 y la del más caliente (17.5), bajo 18, se asigna: c 4.-Diferencia de temperatura entre el mes más frío y el más caliente del año es 6.5°C, se designa: (i') 5.-Mes más caliente, después del solsticio de verano (21 de Junio), se asigna: g'</p> <p>El tipo de clima es C(w_i)(w)c(i')g'= Templado subhúmedo, con lluvia de verano, con verano fresco largo con poca oscilación térmica anual</p>	<p>Temperatura media anual=14.9°C Precipitación anual=599.5 mm Mes más seco=Enero con 7.7 mm Mes más húmedo=Agosto (113.8 mm) Mes más caliente= Mayo (18°C) Mes más frío= Enero (10.3°C)</p> <p>1.-Precipitación anual en cm es 59.9, superior al valor de la fórmula $r_t=2t + 28=57.8$ cm, es un clima templado=C 2.-P/T=40.2, menor a 43.2 y el % de precipitación invernal respecto a la anual es 5.8, está entre 5 y 10.2, se asigna: (w_i) 3.La temperatura anual está entre 12 y 18°C, la del mes más frío (11.3) entre -3 y 18 y la del más caliente (18), bajo 22, se asigna: b 4.-Diferencia de temperatura entre el mes más frío y el más caliente del año es 7.7°C, se asigna: (e) 5.-Mes más caliente, antes del solsticio de verano (21 de Junio), se asigna: g</p> <p>El tipo de clima es C(w_i)b(e)g= Templado subhúmedo con lluvias en verano, verano fresco largo, oscilación térmica extrema y marcha de temperatura tipo Ganges</p>
<p>B)</p> $Evt = \frac{P}{(0.9 + (p/L)^2)} - 0.5$ <p>donde:</p> <p>Evt=evapotranspiración real media anual en mm p=precipitación media anual en mm L= constante de radiación global incidente media anual expresada por $300 + 25t + 0.05 t^3$ t= temperatura media anual en °C</p>		

Tabla A-9 En A) tipos de clima, obtenidos a partir del sistema modificado de García (1981), en las estaciones meteorológicas de la subcuenca de Zumpango. En B) fórmula empírica de Turc (1954) para calcular evapotranspiración real anual.

