

# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

## **“PROCESO DE RECARGA-DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS RECEPTORAS DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO, SIERRAS NEVADA Y LAS CRUCES-MÉXICO”**

### **T E S I S**

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS  
(GEOLOGÍA AMBIENTAL)

P R E S E N T A

**LILIANA A PEÑUELA ARÉVALO**

Asesor de tesis: Dr. J Joel Carrillo Rivera



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**

A mi familia, que llevo eternamente en corazón y pensamientos, porque a pesar de la distancia, siempre siento su confianza y apoyo incondicional, motivándome a seguir adelante y cuyos valores inculcados en mi infancia han sido y seguirán siendo de gran utilidad en mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad de realizar estudios que me permiten aprender cada día más y crecer como persona. Especialmente, al Instituto de Geofísica, por ser la que me permitió la vivencia de esta maravillosa experiencia. Agradezco la ayuda brindada por las secretarías Araceli y Mónica, quienes hacen un excelente trabajo, con amor y dedicación.

Asimismo, el personal del Instituto de Geografía me ofreció una cálida hospitalidad a lo largo de mi investigación, ofreciéndome sus instalaciones y colaboración, principalmente, los laboratorios de SIG y LAFQA, en cuanto a información geográfica y química. Agradezco en especial a René, del SIG, por siempre estar dispuesto a ayudar y por tenerme tanta paciencia.

A mi asesor de tesis, el Dr. Joel Carrillo Rivera, por su gran desempeño como tutor, por su interés en transmitir su conocimiento para beneficio de la población y la gran confianza depositada.

A los sinodales, Doctores Luis Miguel Mitre, Lorenzo Vásquez, Rafael Huizar y Antonio Cardona, por sus valiosas observaciones y comentarios, que contribuyeron con la mejora de la presente investigación. Asimismo, agradezco las orientaciones realizadas por Margarita Alconada en la parte de suelos.

A la Dirección General de Estudios de Posgrado DGEP, por la beca otorgada durante la maestría y al proyecto de investigación No. 10205 del Instituto Nacional de Ecología A.C.(INECOL), en convenio con el Instituto de Geografía de la UNAM, denominado “Efectos del uso del suelo sobre la provisión de servicios ambientales hidrológicos: monitoreo del impacto del PSAH”, sin el cual no habría sido posible la culminación del presente documento.

Quiero agradecer a Juanjo, por su paciencia, amor y agradable compañía.

Agradezco la colaboración en trabajo de campo de mis amigos Ana Godoy, Julio Carbajal y Gabriel Parada, así como, a María Perevochtchikova y Gabriela Ángeles, por su amistad y ejemplo de trabajo.

Por último, GRACIAS a mis amigos en Colombia y a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron con la elaboración de este estudio.

# PROCESO DE RECARGA-DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS RECEPTORAS DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO, SIERRAS NEVADA Y LAS CRUCES - MÉXICO

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
RESUMEN .....	ii
ÍNDICE .....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABLAS .....	vii
LISTA DE FOTOGRAFÍAS.....	viii
ANEXOS .....	viii
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1-1</b>
1.1. ANTECEDENTES .....	1-4
1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	1-10
1.3. OBJETIVOS.....	1-11
1.4. METODOLOGÍA.....	1-11
1.4.1. Fase de Recopilación de Información.....	1-12
1.4.2. Fase de Trabajo de Campo .....	1-12
1.4.3. Fase Final.....	1-15
1.5. REFERENTE TEÓRICO .....	1-16
1.5.1. Servicios Ambientales .....	1-16
1.5.2. Agua Subterránea.....	1-29
<b>2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TERRITORIO DE ESTUDIO.....</b>	<b>2-1</b>
2.1. UBICACIÓN .....	2-1
2.2. CLIMA .....	2-2
2.3. DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA .....	2-6
2.3.1. Cuenca de México.....	2-6
2.3.2. Cuenca del Río Balsas .....	2-7
2.4. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL .....	2-8
2.4.1. Corrientes Superficiales .....	2-9
2.4.2. Sistema Lacustre .....	2-10
2.5. SUELO Y VEGETACIÓN .....	2-15
2.5.1. Tipos de suelo.....	2-15
2.5.2. Uso de suelo y vegetación .....	2-22
<b>3. CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>3-1</b>
3.1. ESTRATIGRAFÍA GENERAL .....	3-6
3.2. ASPECTO GEOLÓGICO LOCAL.....	3-7
3.2.1. Área 1. Volcanes Ajusco y Pelado .....	3-9
3.2.2. Área 2. Sierra de Río frío y Cerro La Trampa .....	3-11
<b>4. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO .....</b>	<b>4-1</b>
4.1. ANTECEDENTES DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO .....	4-1

4.2.	UNIDADES HIDROGEOLOGICAS .....	4-2
4.3.	ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO .....	4-7
4.3.1.	Características Químicas .....	4-7
4.3.2.	Isótopos Ambientales Estables .....	4-26
4.4.	SISTEMAS DE FLUJO.....	4-33
<b>5.</b>	<b>PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL E IMPACTO AL AMBIENTE ..</b>	<b>5-1</b>
5.1.	PROBLEMÁTICA DEL PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL .....	5-1
5.1.1.	Relación Bosque - Agua .....	5-1
5.1.2.	Efectividad del programa .....	5-2
5.1.3.	Intereses económicos ligados .....	5-5
5.2.	IMPACTO AL AGUA Y AMBIENTE .....	5-7
5.2.1.	Zona de recarga.....	5-8
5.2.2.	Zona de descarga.....	5-9
<b>6.</b>	<b>DISCUSION Y RESULTADOS.....</b>	<b>6-1</b>
6.1.	¿RELACIÓN BOSQUE-SUELO-AGUA?.....	6-1
6.2.	TIPOS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUS ZONAS DE RECARGA.....	6-4
6.3.	PROBLEMÁTICA AMBIENTAL GENERAL.....	6-7
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>7-1</b>

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## **ANEXOS**

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura No. 1.1.	Esquema del mecanismo de pago por servicio ambiental.....	1-19
Figura No. 1.2.	Sistemas de flujo. Efectos y manifestaciones del flujo gobernado por gravedad en una cuenca regional .....	1-33
Figura No. 2.1.	Localización del territorio de estudio .....	2-3
Figura No. 2.2.	Tipo de clima en el territorio de estudio.....	2-4
Figura No. 2.3.	Principales sierras y cerros de las cuencas de México y Río Balsas .....	2-6
Figura No. 2.4.	Regiones hidrológicas en el territorio de estudio. ....	2-11
Figura No. 2.5.	Principales corrientes superficiales de las áreas de estudio ..	2-12
Figura No. 2.6.	Comparativo de los niveles de agua en el lago de la Cuenca de México .....	2-13
Figura No. 2.7.	Tipo de suelo en el territorio de estudio.....	2-16
Figura No. 2.8.	Zonas potenciales de recarga al agua subterránea por topografía.....	2-21
Figura No. 2.9.	Uso del suelo y vegetación en el territorio de estudio .....	2-23
Figura No. 2.10.	Comparación de la cobertura boscosa para los años 1976 y 2000. ....	2-27
Figura No. 2.11.	Cambio en la cobertura urbana 1976-2000. ....	2-29
Figura No. 3.1.	Localización de la Cuenca de México y zonas de estudio con respecto al Cinturón Volcánico Trans-Mexicano .....	3-1
Figura No. 3.2.	Localización del área de estudio 1 en la sección geológica de las cuencas de Toluca y México .....	3-2
Figura No. 3.3.	Localización del área de estudio 2 en la sección geológica de las cuencas de México y Puebla .....	3-3
Figura No. 3.4.	Litología aflorante en el territorio de estudio .....	3-8
Figura No. 3.5.	Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca de México y áreas adyacentes .....	3-7
Figura No. 4.1.	Unidades hidrogeológicas en la parte meridional de la Cuenca de México .....	4-3
Figura No. 4.2.	Modelo conceptual hidrogeológico de la parte meridional de la Cuenca de México.....	4-4
Figura No. 4.3.	Sección hidrogeológica de la parte oeste de la Cuenca de México.....	4-5
Figura No. 4.4.	Ubicación sitios de muestreo .....	4-9
Figura No. 4.5.	a) Relación temperatura (°C) y conductividad (µS) b) Relación temperatura (°C) y STD (mg/l); a) Relación temperatura (°C) y sodio; b) Relación temperatura (°C) y cloruro; c) Relación sodio y cloruro; d) Relación calcio y sodio;.....	4-13
Figura No. 4.6.	a) Relación (Cl+SO <sub>4</sub> ) y (Na+K); b) Relación (Na+K) y (Ca+Mg)	4-14
Figura No. 4.7.	Diagramas Schoeller .....	4-14
Figura No. 4.8.	Diagrama Piper.....	4-15
Figura No. 4.9.	Relación temperatura y estroncio.....	4-15
Figura No. 4.10.	a) Relación fluoruro y temperatura (°C); b) Relación litio y temperatura (°C); c) Relación cloruro y fluoruro; d) Relación cloruro y litio; e) Relación fluoruro y litio.....	4-16

Figura No. 4.11. Índice de saturación de la fluorita en relación con la concentración de litio (mg/l) .....	4-19
Figura No. 4.12. Comparación entre muestras de agua de la Cuenca de México, Puebla y Cuenca Alta del Lerma.....	4-21
Figura No. 4.13. Comparación entre muestras de agua de la Cuenca de México, Aguascalientes, San Luis Potosí, Puebla y Cuenca Alta del Lerma .....	4-23
Figura No. 4.14. Clasificación de tipo de flujo según Huizar <i>et al</i> (2004).....	4-24
Figura No. 4.15. Clasificación de flujos propuesta en el presente estudio .....	4-24
Figura No. 4.16. Relación de NO <sub>3</sub> con Cl <sup>-</sup> en las muestras colectadas .....	4-25
Figura No. 4.17. Distribución isotópica de las muestras del presente estudio y datos promedio, máximo y mínimo de Cortés (1989).....	4-28
Figura No. 4.18. Ejemplificación para el cálculo de altitud de la precipitación, según metodología de Durazo (2007).....	4-30
Figura No. 4.19. Concentraciones isotópicas para la Cuenca de México y diversos territorios cercanos.....	4-32
Figura No. 4.20. Altitud de precipitación y posibles zonas de recarga; flujo para muestras con poco a nulo efecto de evaporación .....	4-35
Figura No. 4.21. Altitud de precipitación y posibles zonas de recarga; flujo para muestras del presente estudio y de Edmunds <i>et al</i> (2002) con poco a nulo efecto de evaporación.....	4-36
Figura No. 4.22. Altitud de precipitación y posible dirección de flujo para muestras del presente estudio y de Edmunds <i>et al</i> (2002) afectadas por evaporación .....	4-37
Figura No. 4.23. Sección hidrogeológica esquemática regional A-A' .....	4-38
Figura No. 4.24. Sección hidrogeológica esquemática B-B', parte norte área de estudio 1 .....	4-39
Figura No. 4.25. Sección hidrogeológica esquemática C-C', parte sur área de estudio 1 .....	4-40
Figura No. 4.26. Sección hidrogeológica esquemática D-D', parte norte área de estudio 2 .....	4-41
Figura No. 4.27. Sección hidrogeológica esquemática E-E', parte media área de estudio 2 .....	4-42
Figura No. 5.1. Ciclo del CO <sub>2</sub> con energía solar, al no haber esta fuente el ciclo se invierte, las plantas absorben O <sub>2</sub> y exhalan CO <sub>2</sub> .....	5-2
Figura No. 6.1. Sección hidrogeológica esquemática regional, incluye vegetación e intervalos de altitud de precipitación (posibles zonas de recarga) de flujos local e intermedio .....	6-9

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla No. 1.1.	Apoyos por Servicios Ambientales .....	1-27
Tabla No. 1.2.	Apoyos por Servicios Ambientales Hidrológicos .....	1-28
Tabla No. 1.3.	Principales características comparativas entre zonas de recarga y descarga.....	1-35
Tabla No. 2.1.	Predios localizados en las áreas de estudio.....	2-1
Tabla No. 2.2.	Tipos de clima en el territorio de estudio .....	2-5
Tabla No. 2.3.	Regiones hidrológicas y cuencas en el territorio de estudio .....	2-9
Tabla No. 2.4.	Principales grupos y subgrupos de suelo presentes en el territorio de estudio .....	2-17
Tabla No. 2.5.	Grupos de suelo presentes en las áreas de estudio.....	2-21
Tabla No. 2.6.	Vegetación y especies importantes en las áreas de estudio y alrededores.....	2-24
Tabla No. 2.7.	Comparación de cobertura boscosa entre 1976 y 2000 con respecto al territorio de estudio.....	2-26
Tabla No. 2.8.	Comparación de cobertura boscosa entre 1976 y 2000, con respecto a la superficie de bosque en sí, tomando como referencia la superficie de bosque de 1976 .....	2-26
Tabla No. 2.9.	Comparación de cobertura boscosa entre 1976 y 2000, a) con respecto al territorio de estudio y b) con respecto a la cobertura de bosque en sí.....	2-26
Tabla No. 4.1.	Características hidráulicas de diferentes unidades hidrogeológicas.....	4-5
Tabla No. 4.2.	Tabla resumen de los principales resultados analíticos fisicoquímicos.....	4-8
Tabla No. 4.3.	Comparación de valores de alcalinidad total (mg/l CaCO <sub>3</sub> ) y bicarbonatos (mg/l) de mediciones de campo y laboratorio .....	4-8
Tabla No. 4.4.	Control de calidad por parte del laboratorio, datos de muestras duplicadas .....	4-11
Tabla No. 4.5.	Tipo de agua para cada muestra colectada en campo .....	4-12
Tabla No. 4.6.	Índice de madurez calculado para cada muestra .....	4-17
Tabla No. 4.7.	Resultados de temperatura de equilibrio y profundidad.....	4-18
Tabla No. 4.8.	Muestras que superan el límite permisible de calidad para agua potable.....	4-25
Tabla No. 4.9.	Valores de isótopos ambientales para las muestras tomadas en campo .....	4-27
Tabla No. 4.10.	Resultados del cálculo de la altitud de la precipitación, zonas de recarga de agua subterránea .....	4-29
Tabla No. 4.11.	Resultados del cálculo de elevación topográfica de la precipitación .....	4-31
Tabla No. 5.1.	Valor comercial de los tipos de bosque existentes en las áreas de estudio .....	5-4
Tabla No. 6.1.	Altitud asociada con comunidad de vegetación.....	6-1
Tabla No. 6.2.	Posible vegetación asociada a zonas de recarga según su elevación topográfica .....	6-2



Tabla No. 6.3.	Principales características por grupo de agua.....	6-6
Tabla No. 7.1.	Intervalo de altitud de las áreas de estudio .....	7-2

### ***LISTA DE FOTOGRAFÍAS***

Foto No. 1.1.	Pozo de abastecimiento, San Mateo Ayecac, Edo. de Puebla .....	1-15
Foto No. 1.2.	Pozo en Guadalupe Victoria .....	1-15
Foto No. 1.3.	Pozo en San Damian Texoloc .....	1-15

### ***ANEXOS***

1. Cálculo de bicarbonatos a partir del método de Gran
2. Descripción estratigráfica general
3. Resultados analíticos físico-químicos
4. Hojas de campo

## **RESUMEN**

El Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) inició en México en el año 2003 con el objetivo específico, de mantener la recarga potencial de agua al subsuelo. El programa se basa en la hipótesis que impulsa que la presencia de bosque contribuye a regular el ciclo hidrológico aumentando la recarga de agua de lluvia, por lo que el mecanismo del PSAH consiste en estimular a propietarios de terreno boscoso en montañas a que lo preserve por medio de un pago anual, pago que finalmente será responsabilidad de los usuarios beneficiados del agua recargada. Se estima que dicho pago permitirá conservar aquellas propiedades seleccionadas como prestadoras del servicio. Sin embargo, dicha hipótesis no ha sido aún probada científicamente, de tal manera que el PSAH ha sido implementado sin realizar estudios hidrogeológicos que hubiesen permitido una previa definición de zonas de recarga, de sistemas de flujo y de su jerarquización, e identificar posibles impactos al agua subterránea o a otro componente del ambiente.

El presente trabajo intenta resaltar la importancia de aplicar metodologías hidrogeológica (geológica, hidrogeoquímica e isotópica) y ambiental (fisonomía vegetal y suelo) en este tipo de programa de PSAH para obtener un mayor entendimiento del funcionamiento del agua subterránea y de su relación con los demás elementos de la naturaleza. Así, se contribuye al conocimiento de la dinámica del flujo de agua subterránea, logrando una primera localización de zonas de recarga, dirección de flujo, profundidad mínima de recorrido del agua y jerarquización de sistemas de flujo asociados con las sierras Nevada y Las Cruces, factores determinantes para localizar el sitio potencial que debe estar sujeto a PSAH. Esto permite reducir la incertidumbre sobre la localización del sitio que realmente proporciona un beneficio al ambiente y que se debe proteger por su posición como prestador de servicio ambiental hidrológico.

## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento mundial de la población e industria, aunado al cambio general en las actividades productivas, ha generado un incremento en sus necesidades básicas y recreativas que llevan a su vez, al uso de los elementos naturales (agua y suelo, entre otros) sin considerar el grado de tolerancia que tienen éstos para la conservación de los diversos ecosistemas y de los mismos elementos. Esto se debe tal vez a la falta de interés en la conservación de la naturaleza asociada posiblemente con la falsa creencia que la misma es inagotable, y que amortigua cualquier actividad humana (Peñuela *et al*, 2006). Adicionalmente, el escaso conocimiento que se tiene sobre la dinámica, comportamiento e interacción de los diversos elementos que componen el ambiente, así como la actitud de cierta parte de la población que en muchas ocasiones sólo busca su propio beneficio, conducen al deterioro ambiental.

No obstante, existe otro grupo de personas interesadas en la conservación del ambiente que han fomentado el interés en acciones para su cuidado, llevando a la creación de instituciones que buscan este objetivo. A pesar de la implementación de diversos programas para tal fin, se aprecia que en realidad no existe un entendimiento del funcionamiento físico de la naturaleza y la interacción de sus diferentes componentes (incluyendo la actividad humana) que permita proponer estrategias y metodologías para así lograr realmente un manejo adecuado de los elementos naturales que la componen y además, establecer con mayor exactitud las áreas para protección ambiental con bases científicas. Otro inconveniente ligado a esta problemática es que los estudios ambientales realizados, a diferente escala en todo el mundo, no han sido valorados ni considerados en la planeación de los proyectos realizados, principalmente en las instituciones del gobierno, debido probablemente a la falta de interés particular y/o desconocimiento de su utilidad en tal acción.

A pesar de la existencia de estudios ambientales desde la década de los 1970's, aproximadamente, que señalan las dificultades asociadas con el entorno natural, no se ha originado en México un cambio significativo en leyes, política y acciones por parte del Gobierno Federal. Un ejemplo es el trabajo relativamente reciente de González-Morán (1992), el cual señala desde ese entonces como alarmante *las expectativas de crecimiento de la ciudad de México para el año 2000, ya que cerca de 30 millones de personas vivirán en la cuenca de México, que ocupa únicamente el 0.03% de la superficie del país y no se vislumbra que exista un cambio fundamental en el crecimiento industrial. Se requerirán cada vez más de insumos provenientes de otros lugares del país. Las fuentes de abastecimiento de agua para esta población no están bien definidas. Es fundamental una readecuación en las prioridades de uso del agua, reforzando la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales para utilizarlas en procesos industriales, riego de áreas verdes y agricultura. Además deben de ponerse en práctica, de manera estricta, controles en la generación, almacenamiento y disposición final de residuos sólidos y aguas residuales contaminantes.*

Asimismo, González-Morán (1992) indica que la tendencia de urbanización de la Ciudad de México es la formación de megalópolis, al igual que en otros países en vías de desarrollo, que conlleva a un consumo irracional de elementos y a la

degradación del ambiente. Consecuencias que se pueden ver actualmente, como es el caso del agua, la cual debido al (manejo) uso que se le da, se hace creer a la población necesario el traslado del agua de lugares vecinos a la cuenca para satisfacer las necesidades de la gran ciudad sin importar los efectos ambientales asociados, un ejemplo claro es la Cuenca de Lerma que se encuentra altamente degradada.

Así, el acelerado deterioro ambiental observado hace evidente la importancia y urgencia para la creación de mecanismos que permitan la protección de los elementos naturales. Con este enfoque, Costa Rica inició el programa de Pago por Servicio Ambiental Hidrológico (PSAH) en el año 2002, con el objetivo de proteger los bosques localizados en zonas con presas hidroeléctricas; México, siguiendo la idea del programa de Costa Rica, implementó el PSAH en busca de la conservación de zonas forestales consideradas como áreas de recarga de agua subterránea, para conservar la calidad y cantidad del agua subterránea. Esto es importante para México, teniendo en cuenta que más del 70% del agua para el abastecimiento de industrias y ciudades proviene del subsuelo, debido a las condiciones áridas y semiáridas propias del país.

Sin embargo, la urgencia por realizar acciones en beneficio del ambiente ha conducido muchas veces a implementar las medidas menos adecuadas para el cuidado del entorno, esto debido a la falta de conocimiento de la dinámica de la naturaleza. Es el caso del PSAH, que a pesar de ser un programa que busca garantizar la provisión de servicios ambientales, presenta altibajos en su estructura puesto que se ha determinado en el estudio de Carrillo-Rivera *et al*, 2004, que al parecer, su objetivo inicial de proteger zonas de recarga de agua subterránea no se está cumpliendo cabalmente. Adicionalmente, el esquema de PSAH se basa en que el usuario beneficiado por el cuidado de una zona prestadora de servicio ambiental retribuya por el mismo, sin embargo, aún no está definida esta red de cobro al usuario - pago al proveedor, por lo que en este sentido el objetivo del programa no se está logrando.

A partir de una evaluación interdisciplinaria de algunos componentes del sistema ambiente (suelo, vegetación, geomorfología, geología) en la aplicación de metodologías como la teoría de sistemas de flujo (Tóth, 2000), análisis hidrogeoquímico e isotópico, el presente estudio es una contribución al conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de parte de las cuencas de México y Río Balsas (Puebla-Tlaxcala), el cual pretende definir procesos que son de beneficio para la conservación del agua (recarga y descarga).

En este documento se evita el uso de palabras como recurso (hídrico o forestal), disponibilidad, escasez, sobre-explotación, debido a que son términos que generan confusión, imprecisión e interpretaciones erróneas; sólo se incluyen cuando son referenciadas por otras fuentes. A continuación se señalan algunas definiciones de estas palabras:

Recurso: recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un periodo de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable (Glosario Hidrológico Internacional de la

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization-UNESCO y la Organización de las Naciones Unidas-ONU).

Disponible: Dicho de una cosa: Que se puede disponer libremente de ella o que está lista para usarse o utilizarse. (Diccionario de la lengua española, Real Academia Española)

Sobreexplotar: Utilizar en exceso los “recursos” naturales (Diccionario de la lengua española, Real Academia Española). Extraer agua de un embalse subterráneo a un ritmo mayor que el de recarga media del mismo (Glosario Hidrológico Internacional, UNESO y ONU)

Escasez: Según la enciclopedia libre Wikipedia, la escasez es un concepto central en economía. De hecho, la economía neoclásica, la escuela dominante hoy en día, se define involucrando la escasez. La definición incorpora la expresión de Lionel de Robbins “economía es una ciencia que estudia el comportamiento humano como relación entre los fines y los medios escasos que tienen aplicaciones alternativas”. La escasez implica que no pueden conseguirse suficientes “recursos” para producir lo suficiente como para cubrir todas las necesidades. De igual modo, el diccionario de economía y finanzas de la Universidad de Málaga, menciona que la escasez, en economía no designa la falta absoluta de un bien, sino la relativa insuficiencia del mismo con respecto a las necesidades, deseos o requerimientos de los consumidores, por lo que un bien escaso, por lo tanto, es aquel cuya abundancia o disponibilidad es limitada.

Teniendo en cuenta estas definiciones y que este estudio pretende realizar una contribución al conocimiento del funcionamiento del agua en general y no sólo a las necesidades de la población mexicana, se considera inapropiado el uso de dichas palabras. Adicionalmente, se presenta otro tipo de problema asociado con el uso de estas palabras ya que no existen cálculos reales ni investigaciones que permitan afirmar la existencia de sobreexplotación, escasez y disponibilidad de agua para el territorio nacional considerando lo que se menciona en el presente capítulo, apartado 1.5.2 referente a agua subterránea (balance hídrico).

La realización de cualquier estudio hidrogeológico requiere un análisis regional para entender el comportamiento local, y así obtener una mejor interpretación de la dinámica del agua subterránea, es por esto, que el presente estudio incorpora diferentes términos espaciales asociados con una escala, de menor a mayor se tiene: 1) territorio de estudio, en el cual básicamente se realiza el análisis regional; 2) área de estudio, áreas seleccionadas que agrupan diversos ejidos que reciben pago por servicio ambiental hidrológico; 3) zona, usado para referirse a zonas de menor superficie y aquellas donde ocurre recarga de agua subterránea; 4) ejido, propiedades comunitarias beneficiadas por el programa de PSAH; 5) sitio, término más puntual, usado específicamente para referirse a la ubicación de pozos y manantiales muestreados en el presente estudio.

### **CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN**

Algunos resultados significativos de la presente investigación corresponden con la obtención de una primera aproximación del funcionamiento del agua subterránea

y definición de jerarquías de sistemas de flujo, a partir de: 1) la obtención de la elevación topográfica de la precipitación donde se recargan aquellos manantiales que no se ven afectados por evaporación, 2) profundidad mínima que alcanza el agua en el subsuelo y 3) localización de zonas de descarga de agua subterránea asociadas con su respectiva zona potencial de recarga. Por tal razón, se considera que la metodología empleada en el presente estudio es una contribución al programa de PSAH, así como, para análisis hidrogeológicos y estudios ambientales.

## **ORGANIZACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO**

El cuerpo principal del presente estudio consiste de seis capítulos, en los cuales se describe; i) la historia de creación e implementación del programa de Pago por Servicios Ambientales en México, así como, el objetivo y metodología usada en la presente investigación (Capítulo 1); ii) características geográficas del territorio de estudio, incluyendo aspectos climático, geomorfológico, hidrológico, de vegetación, tipo y uso de suelo (Capítulo 2); iii) características geológicas generales del territorio de estudio y específicas de las áreas de estudio (Capítulo 3); iv) los antecedentes del funcionamiento hidrogeológico de la Cuenca de México y unidades hidrogeológicas establecidas por diversos autores, asimismo, se muestran los resultados del análisis hidrogeoquímico para las muestras de agua tomadas en la presente investigación, junto con la definición de diversos sistemas de flujo (Capítulo 4); v) diferentes puntos de vista relacionados con la problemática del pago por servicio ambiental y una evaluación del posible impacto al agua subterránea asociado a zonas de recarga y descarga (Capítulo 5); vi) la interpretación del análisis de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores (Capítulo 6).

Existe un capítulo adicional, correspondiente a conclusiones, señalando los resultados definitivos de la investigación desarrollada, incluyendo la importancia de la metodología empleada para su posterior aplicación en diversos proyectos hidrológicos y ambientales. Finalmente, se incluye un apartado con los anexos citados en el texto, que contiene información de cálculos, datos fisicoquímicos, hojas de campo y descripción estratigráfica del territorio de estudio, como herramienta útil de comprobación de los resultados presentados en este estudio.

### **1.1. ANTECEDENTES**

A medida que pasa el tiempo, se visualizan los problemas ambientales que conlleva el crecimiento demográfico e industrial (conocido como “desarrollo”, donde sólo se incorporan aspectos económicos, dejando a un lado el componente ambiental), generando invasión urbana y cambio de uso del suelo, destrucción de áreas verdes, creando problemas sanitarios y falta de servicios de agua potable, entre otros, esto aumenta la importancia del reconocimiento de los elementos naturales y ecosistemas sobre la vida humana y la dinámica misma del planeta.

En la reforma de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente publicada el 23 de mayo de 2006 se incluye y define el término ambiente, como el conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y

demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados. Entendiéndose así, que el ambiente es todo el entorno que nos rodea, incluyendo la interrelación entre cada elemento formador y los procesos involucrados en su dinámica. Cabe resaltar que en este trabajo, se emplea el término ambiente y no “medio ambiente” considerando que este último concepto es un error gramatical donde se genera una redundancia.

Al igual que los aspectos ambientales, crece el reconocimiento a nivel mundial del papel que juega el bosque como agente ambiental, paisajístico, de conservación de la biodiversidad y de recreación, así como de su influencia favorable en las condiciones micro-climáticas, en procesos de limpieza del aire con la mitigación de las emisiones de gases con efecto invernadero, protección de las fuentes de agua, mitigación de impactos de desastres asociados con fenómenos naturales y características contra-erosión. Todos estos beneficios que ofrece el bosque, ligados con el afán de reducir y evitar la invasión urbana y degradación de zonas ecológicas, hacen que se inicie el mercado de servicios ambientales (SA) en diferentes países, en los últimos 12 años principalmente, como un mecanismo para controlar la deforestación y proteger el ambiente. Algunos ejemplos en América Latina son El Salvador, Brasil y Colombia (Braña, 2005) y un caso más específico, Costa Rica donde se realiza el PSAH (Gutiérrez, 2005, Jiménez *et al.* 2003).

El mercado de SA consiste básicamente en el pago a los propietarios de un predio, cuyo terreno preste algún tipo de servicio ambiental y brinde beneficio a otros; el pago lo deben realizar los beneficiados, quienes dependen de la conservación del ambiente para garantizar los servicios (ambientales) prestados en una región determinada. Existen más de 300 esquemas de pago por servicios ambientales (PSA) en el mundo, los cuales se encuentran en etapa experimental y con operación relativamente reciente (Mayrand *et al.*, 2004) pero cuyas prácticas y resultados preliminares serán útiles para el perfeccionamiento de los programas de PSA y posteriores aplicaciones.

Un ejemplo a considerar es Costa Rica, país pionero en el pago por servicios ambientales en Centroamérica, quien implementó en 1996 el programa de servicios ambientales forestales y en el 2002 los servicios ambientales hidrológicos, estableciendo en este último, el pago por protección, reforestación y/o manejo de bosques a comunitarios particulares de territorios pequeños ubicados en parte-aguas de cuencas hidrográficas con presencia de presas hidroeléctricas.

Posteriormente, en el 2002, el Centro Internacional de Política Económica para el desarrollo sostenible (CINPE) y la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) elaboraron un primer estudio para establecer las normas para determinar la cantidad de pago por SAH y afirmar la necesidad del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO). En dicho trabajo, la valoración de servicios ambientales se realizó como un análisis socioeconómico de cuatro cuencas hidrográficas, incluyendo el cálculo del rendimiento hídrico anual de un área, estimación de caudales para producción hidroeléctrica y consumo humano, sin embargo, el análisis detallado de esta investigación sugiere que se efectuó sin un planteamiento realista del modelo de funcionamiento del sistema hídrico.

En términos generales la definición se basa en información que incluye un balance hídrico que incorpora datos de precipitación, evapotranspiración y descarga de sedimentos. Existen ciertas limitaciones metodológicas para obtener las dos primeras variables; por un lado, la precipitación es para muchos investigadores supuesta como una variable conocida, teniendo en cuenta que la existencia de estaciones climatológicas permiten su obtención directa, sin embargo, es un error considerarla como única fuente de agua en el balance hídrico de una cuenca superficial. De este modo, se presentan problemas serios ya que por lo general no se cuenta con un arreglo de estaciones climatológicas suficiente, registro continuo de cada evento de precipitación con lo que se adiciona el error por manejo de datos (interpolación estadística pero no justificada físicamente); esto afecta la extrapolación de la información hidrológica de otras variables del ciclo hidrológico.

La evapotranspiración es un cálculo, cuyas fórmulas, en su mayoría, no incluyen aspectos como tipo, densidad de vegetación y estado de crecimiento, suelo, comportamiento detallado y duración de la lluvia, no obstante, aquellas ecuaciones que incorporan dichas variables, reciben muchas críticas debido a que los métodos usados fueron desarrollados para zonas templadas (SEDESOL, 2005) o condiciones específicas diferentes a las existentes en el territorio nacional. Asimismo, un error básico del balance es que no se considera importante el entendimiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, el cual permitiría visualizar de mejor manera las posibles diferentes fuentes de agua en una cuenca hidrográfica, más aún, el balance imposibilita conocer cabalmente cada variable.

Considerando los inconvenientes mencionados anteriormente, el esquema usado para definir servicios ambientales hidrológicos requiere de una formulación metodológica concreta que defina e incorpore los diferentes procesos ambientales (bióticos y abióticos) para el pago por servicios ambientales y su jerarquía de importancia, así como, un análisis de tarifas de los pagos correspondientes y la definición de indicadores que permitan evaluar la respuesta del sistema.

Por otro lado, a pesar de la reciente creación de este tipo de esquemas, se puede decir que es en la década de los cuarenta cuando comienza el interés mundial por la conservación ambiental, generándose en 1945 la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO, y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN) en 1948 (Batisse, 1981; citado en González, 2004), ya que la idea de proteger áreas naturales realmente es bastante antigua, remontándose al año 300 AC, cuando la cultura hindú aisló por primera vez zonas boscosas con el propósito de recreación pública y refugiar fauna valiosa bajo estrictas medidas de seguridad (Haro, 1986).

### **PROGRAMA DE SERVICIOS AMBIENTALES EN MÉXICO**

Al igual que en el resto del mundo, en México aumenta la conciencia del cuidado ambiental a medida que crecen las urbes y sus efectos negativos aumentan, y es hasta 1971, que el Gobierno Mexicano, dentro de la Secretaría de Salubridad, la Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente (SMA) (después, Secretaría de



Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) y actualmente, en la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)), establece las bases jurídicas y operativas para normar, coordinar y ejecutar programas específicos para prevenir y controlar la contaminación ambiental (González-Morán, 1992). Sin embargo, las situaciones producidas por falta de planeación y control en el desarrollo urbano e industrial han generado problemas de difícil solución.

Posteriormente, el 28 de junio de 1989 se publica en el Diario Oficial de la Federación un decreto de una zona sujeta a conservación ecológica, la cual abarca una superficie de 727 hectáreas en el Ajusco, una de las áreas de estudio en el presente trabajo y la cual es de interés ambiental debido a que, como se menciona en el diario, “*es una zona boscosa, generadora de oxígeno y de recarga acuífera*”; y que para ese entonces comenzaba a presentar grave deterioro, sobre todo en la parte que colinda con el suelo urbano, principalmente por la tala inmoderada, agricultura de subsistencia e invasiones. Por lo que, como se puede apreciar, desde antes de la implementación de los programas de pago por servicio ambiental, ya se había asignado un valor a la naturaleza (era evidente su importancia) y por lo tanto, a los procesos involucrados en el funcionamiento del ambiente.

En México, el programa de PSA se inicia aproximadamente en el año 2002; actualmente se presentan varias experiencias piloto de PSA, las que se pueden clasificar en cuatro estrategias (Burstein *et. al*, 2002), que anteriormente se podían llevar a cabo solas o en combinación de una o más de ellas, todo esto dentro de la idea que se trata de una compra-venta de un servicio, éstas son:

1. Captura de carbono: Consiste en la disminución de este nocivo gas por medio de su fijación a través de los bosques.
2. Desempeño hídrico: Servicios hídricos y el mejoramiento del desempeño en las cuencas, que incorporan servicios como el abastecimiento de agua, recarga de agua subterránea, además de la prolongación de la vida útil de la infraestructura hidráulica.
3. Conservación de la biodiversidad: incluye la conservación del hábitat, mediante la formación de corredores biológicos.
4. Belleza escénica: Es el componente más importante en la oferta de servicios de recreación.

El presente trabajo se enfoca en los servicios ambientales hidrológicos debido a que las áreas de estudio establecidas actualmente reciben apoyo económico a través de esta estrategia. La experiencia de México en el Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos PSAH y el Fondo Forestal Mexicano parte del concepto iniciado en Costa Rica y es gestionado por la Comisión Nacional Forestal CONAFOR en el 2003. La implementación del programa pretende conservar la cantidad y calidad de agua subterránea, teniendo en cuenta que más del 70% del agua en México para el abastecimiento proviene del subsuelo, por las condiciones áridas y semiáridas propias del país.

El principal objetivo del programa de PSAH es incentivar a la conservación de las zonas forestales (específicamente zonas de recarga de agua subterránea) ya que la hipótesis que éste sustenta es que la existencia de cubierta forestal contribuye a

regular el ciclo hidrológico, entre otros servicios ambientales (mitigación de emisión de gases con efecto invernadero, conservación de la biodiversidad, belleza escénica, etc), por lo que el pago por servicios ambientales involucraría una disminución en la deforestación (cambio de forma del uso de la foresta) e igualmente pretende reducir de cierta manera la pobreza, aunque esto es un concepto fuera del interés del presente trabajo.

Este programa espera enriquecerse con la definición de una metodología de valoración correspondiente. En este sentido cabe anotar que la mayoría de experimentos activos en pequeñas partes del territorio mexicano valoran sólo los cambios en la cobertura forestal por imágenes satelitales, los procesos tales como cambio en la precipitación y escorrentía superficial no se incorporan como tampoco las características reguladoras del bosque, asimismo no se incluye la interacción del agua subterránea en el ciclo hidrológico, ni tampoco cómo la cobertura afecta la escorrentía o a otros elementos como la recarga de agua subterránea y la calidad del agua; aspectos que requieren de estudio a largo plazo (Carrillo-Rivera *et. al*, 2004).

En el Diario Oficial del viernes 3 de octubre del 2003 se publicó el *Acuerdo que establece las reglas de operación para el otorgamiento de pagos del programa de servicios ambientales hidrológicos*, por la Secretaría de Medio Ambiente y “Recursos Naturales” SEMARNAT donde *“se reconoce la existencia y la importancia de todos los Servicios Ambientales que prestan los bosques y selvas a la realización de actividades productivas y de consumo, entre los que se encuentran la conservación de la biodiversidad, el mantenimiento de los acervos de recursos genéticos, la captura de carbono atmosférico para evitar el cambio climático, la atracción de turismo por paisaje y el ecoturismo, y la protección de cuencas hidrográficas, reducción de desastres hídricos y la recarga de acuíferos, y que existe la voluntad de promover su protección e incentivar el mantenimiento de su producción a través de una estrategia de generación de mercados de servicios ambientales”*.

La SEMARNAT a través de CONAFOR, elaboró estas reglas de operación donde se establecen las definiciones principales de Servicios Ambientales Hidrológicos en México, los lineamientos generales y beneficiarios del programa de pago, e incluye criterios técnicos de elegibilidad de las zonas para el pago, métodos y procesos de selección y obligaciones, y por último los derechos de los beneficiarios. Según los criterios propuestos, CONAFOR recibió 537 solicitudes en el año 2003, de todo el país, para participar en el programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) de los cuales escogió sólo 271 ejidos. Se firmaron convenios a 5 años para un territorio de 126.8 mil hectáreas del país aproximadamente con \$300 y \$400 (promedio por ha por año) para el pago por la conservación del bosque.

Después de aproximadamente un año de haber iniciado el programa de SAH, CONAFOR considera necesario caracterizar los efectos producidos por el desarrollo del mismo, por lo que se genera un convenio con el Instituto Nacional de Ecología (INE), cuyo objetivo es evaluar los resultados socioeconómicos y físicos que ha creado la implementación del programa. A su vez, en el 2004 se establece un convenio entre el Instituto de Geografía (IGg) de la Universidad

Nacional Autónoma de México (UNAM) y el INE para realizar en una primera etapa el estudio sobre el funcionamiento físico del programa, cuyo objetivo general es conocer los procesos naturales y no-naturales relacionados con el servicio ambiental y definir posibles indicadores de impacto al agua.

En el estudio del INE-IGg, titulado “*Definición de indicadores de impacto al recurso hídrico en las zonas receptoras de pago por Servicios Ambientales Hidrológicos 2003/2004*”(Carrillo-Rivera *et.al.*, 2004), se seleccionaron 20 ejidos para la Cuenca de México de las 271 solicitudes aprobadas en el 2003 en el país, con el fin de revisar que las zonas realmente se ajustaran a los criterios de elegibilidad del programa de PSAH. El trabajo de campo de este estudio, mostró que, en la mayoría de los casos, el PSAH cubre sólo una pequeña parte de la superficie de los ejidos involucrados, el porcentaje es en algunos casos de sólo un 5% del área de interés hidrológico potencial donde es factible que la recarga pueda darse; esto es bastante importante ya que existiría la necesidad de aumentar el área de interés a incorporar como PSAH y significa que el territorio real y sobre el cual no existe control o seguimiento, es de mayor extensión y con un uso de suelo diferente al que debería presentar.

Por otra parte, los manantiales se usan de forma intensa llevando el agua hacia otros poblados con un cobro por el servicio, por lo que, los lugareños han indicado preocupación que algunos manantiales se están secando o disminuyendo su caudal, como por ejemplo el manantial de la zona Santa Rita Tlahuapan, donde según comentarios de las entrevistas realizadas, los bosques han sido reforestados. Es necesario señalar que se carece de datos y mediciones de trabajos anteriores que permitan cuantificar las apreciaciones de los usuarios.

En relación con el abastecimiento de agua potable a los pueblos, la población de la zona de estudio depende predominantemente de la extracción de agua de pozo más que de manantial; es necesario recalcar que algunos pozos no cumplen la Ley de Aguas Nacionales, ya que no se cuenta con medidor de flujo ni dispositivo para medir los niveles de agua en el pozo, por lo que se hace difícil el estudio del agua subterránea.

Algunas recomendaciones del anterior estudio son incorporar además de las zonas de recarga de agua subterránea como zonas de pago por el servicio ambiental que ofrece a la población, las zonas de descarga como zonas de control de flujo, que permita el monitoreo de la calidad química y cantidad del agua; y realizar un programa de medición continua (en el tiempo) de algunos parámetros del clima, hidrología superficial y subterránea, suelo y vegetación.

Es importante resaltar, que muchos de los problemas señalados en el estudio de Carrillo-Rivera *et.al.* (2004), ya se habían mencionado, para el caso del Ajusco, en la tesis de licenciatura de Haro (1986) donde muestra cómo el bosque perdió extensión en superficie aproximadamente desde el año 1936; por otra parte, en 1947 se otorga la concesión a la fábrica de papel “Loreto y Peña Pobre” para la explotación del antiguo bosque. Adicionalmente, se distinguen los múltiples ataques antrópicos recibidos en el parque “Cumbres del Ajusco”, entre los cuales se destacan la tala, monocultivo, venta de terrenos, construcción de residencias privadas, contaminación, etc.

Se puede entonces apreciar, la falta de conciencia innegable hacia la protección ambiental, por parte del gobierno y la misma población, la cual ha permitido el avance incesante de la destrucción del medio natural, a pesar de existir anteriores investigaciones que señalan la problemática existente pero no son valoradas ni tomadas en cuenta.

A medida que pasa el tiempo, ha sido evidente el gran crecimiento de la población en el mundo y las consecuencias que éste y el mal manejo de la naturaleza ha generado; es lamentable ver que sólo cuando ya se tienen problemas casi insolubles, se empieza a comprender que el ambiente es un factor importante y determinante en la vida del ser humano, originando un creciente interés en la conservación y recuperación del entorno natural.

Sin embargo, muchas veces por el afán de “agilizar” la recuperación del ambiente, se han implementado labores que se creen beneficiosas para determinado propósito; sin embargo estas se realizan sin una elaboración previa de un estudio que permita visualizar el comportamiento de los diferentes componentes ambientales de un área, además de su interacción y funcionamiento en conjunto, produciendo muchas veces un daño peor que el inicial, un ejemplo es el caso de la deforestación, donde se plantan terrenos con vegetación exógena y por falta de un conocimiento previo del funcionamiento de éste nuevo miembro y de los procesos naturales, se generan problemas adicionales al inicial, como por ejemplo que la nueva vegetación requiere de más agua, afectando de esta manera niveles y cantidad de agua subterránea, problemas de desecación, erosión, entre otros.

## **1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO**

A pesar que la finalidad de los esquemas de PSA es garantizar la provisión de servicios ambientales, se observa que en muchas ocasiones se ha implementado el programa sin haber realizado algún estudio biofísico previo que permita conocer el funcionamiento del sistema natural y definir con mayor exactitud zonas de interés ambiental, conduciendo a la preservación de zonas no muy relevantes (Carrillo-Rivera *et al*, 2004). De acuerdo con lo anterior, la hipótesis de trabajo en este estudio señala que es preciso conocer el funcionamiento del flujo de agua subterránea para poder establecer áreas principales de PSAH con mayor claridad y sustento científico, y de este modo, tener la posibilidad de definir procesos benéficos para la conservación de la cantidad y calidad del agua subterránea.

Teniendo en cuenta que la composición química del agua subterránea es resultado de la profundidad, desplazamiento e interacción agua-roca, se considera que la aplicación de la Teoría de Tóth (2000), el análisis hidrogeoquímico y uso de isótopos ambientales, permitirá obtener con menor grado de incertidumbre zonas relacionadas con recarga de agua al subsuelo, así como, posibles trayectorias que relacionen la zona de recarga con su descarga asociada, factor relevante para el programa de pago por servicio ambiental hidrológico que considera que el pago debe ser realizado por aquellos individuos que se vean beneficiados por la protección de zonas que presten servicios ambientales.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Identificar, evaluar y analizar los procesos de recarga-descarga de agua subterránea en diversas zonas que actualmente están involucradas en el esquema de pago por servicio ambiental en la parte sur de la Cuenca de México y alrededores, a través del conocimiento del sistema de flujo y respuestas de los demás componentes del ambiente.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Realizar una interpretación climática, geomorfológica, geológica e hidrogeológica del área, con el fin de establecer posibles zonas de recarga, descarga o de tránsito y predecir de cierta manera el comportamiento del elemento hídrico
- Elaborar e interpretar pruebas de bombeo que permitan definir las propiedades hidráulicas de las unidades acuíferas
- Definir los límites físicos naturales del acuífero que permitan el análisis y un estudio más preciso del comportamiento del flujo de agua subterránea
- Conocer el funcionamiento del agua a través de análisis físicos, químicos e isotópicos de muestras de agua seleccionadas
- Reconocer el movimiento y funcionamiento del flujo subterráneo, y su relación con expresiones ambientales, que permita una definición más clara de las zonas de recarga, tránsito y descarga de agua subterránea
- Analizar cambios en la cubierta forestal y uso del suelo, teniendo en cuenta que cualquier cambio en la cobertura de uso de suelo y vegetación puede generar en la zona de recarga un impacto al agua en las zonas de tránsito y descarga

### **1.4. METODOLOGÍA**

Para definir el funcionamiento del flujo de agua subterránea e inferir la relación que guarda un área de interés con el régimen hidrológico particular, es necesario, conocer las dimensiones del sistema (profundidad de circulación y extensión lateral), sus características químicas (pH, concentración relativa de elementos mayores, traza, isótopos, relación agua-roca, Eh, OD), particularidades físicas (temperatura, conductividad eléctrica), parámetros hidráulicos del material geológico, manifestación superficial (tipo de suelo, vegetación, geomorfología). Todo esto es posible a través de tres fases:

#### **1) Fase de recopilación de información,**

Referente teórico (incluye análisis de la temática de los Servicios Ambientales y relación “recarga-descarga” de los sistemas de flujo de agua subterránea)

Compilación de información básica accesible sobre el territorio de estudio (climatología, geología, hidrología, edafología, uso del suelo y vegetación)

- 2) *Fase de trabajo de campo*, verificación de información recopilada; toma y análisis fisicoquímico de muestras de agua superficial y subterránea para la generación de una nueva base de información estadística
- 3) *Fase final*, manejo, análisis e interpretación interdisciplinaria de la información y resultados

#### **1.4.1. Fase de Recopilación de Información**

Consistió en la búsqueda de estudios e información de la temática a investigar, en este caso, servicios ambientales e interacción ambiente con el flujo de agua subterránea, para así, definir la metodología más conveniente según criterios propios pero basados en las diferentes teorías y técnicas investigadas.

Posteriormente, se recopiló información climatológica, geomorfológica, geológica, geofísica, de hidrología superficial y subterránea, calidad físico-química del agua (superficial y subterránea), cubierta vegetal, uso del suelo y toda aquella relacionada con las unidades territoriales de estudio, para así, tener una mayor visualización de los diferentes parámetros involucrados en el ambiente y posiblemente percibir de alguna manera su posible influencia o dependencia entre sí. Esta clase de información pudo ser consultada en:

- estudios previos de la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua (CNA) (Oficinas Centrales) y Gerencias Estatales
- investigaciones realizadas en universidades, como tesis, publicaciones en revistas científicas o participación en proyectos con otras entidades
- oficinas públicas y privadas en los estados involucrados, como son Organismos Operadores de Agua Potable, Comisión Estatal de Agua, Fideicomiso de Riesgo Compartido, Comisión Nacional de Biodiversidad, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Federal de Electricidad, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, entre otras
- búsqueda automática en bases de datos con información bibliográfica especializada
- búsqueda de imágenes satelitales y/o sensores remotos, las cuales a través de su interpretación permiten la identificación de estructuras geológicas que posiblemente controlen o influyan en el movimiento y aporte del agua subterránea.

#### **1.4.2. Fase de Trabajo de Campo**

##### TRABAJOS DE RECONOCIMIENTO

Se realizaron recorridos de campo para verificación de la información física recopilada anteriormente y observar características litológicas. El trabajo de campo permite identificar a su vez, condiciones que se relacionan con zonas de recarga y descarga, por ejemplo:

- humedad y tipo de suelo -desde el punto de vista cualitativo
- presencia de manantiales y caudal base
- tipo de vegetación natural existente
- topografía de la región
- salinidad y temperatura del agua subterránea

Esta información se complementa con un análisis multitemporal para definir cambios potenciales en las condiciones de recarga y descarga de los sistemas de flujo y cambios en el uso del suelo.

### TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS FÍSICO, QUÍMICO E ISOTÓPICO

Es necesario definir con claridad las mediciones de campo más apropiadas para realizarlas de acuerdo con los objetivos y alcances del estudio, en este caso en particular, se realizó la toma de muestras para análisis físico, químico e isotópico con el fin de identificar el lugar de origen del agua subterránea, el comportamiento del flujo en el subsuelo y su interacción e influencia con diferentes elementos superficiales.

La selección de los sitios a muestrear se basó principalmente en los resultados de un estudio previo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas del territorio de estudio, distribución de aprovechamientos existentes, análisis físico y químico asequibles (base INEGI), condiciones apropiadas de las instalaciones para la colecta de muestras, acceso y permiso de propietarios de ejidos y/o pozos. Cabe resaltar que en el presente estudio se sigue el protocolo y requerimientos existentes, por parte de los laboratorios a los que fueron enviadas las muestras, para evitar que la concentración química original del agua se modifique.

Para cualquier estudio hidrogeológico, que incluya análisis y muestreo de agua, el volumen que se requiere tomar de muestra de agua depende del equipo analítico del laboratorio al cual se enviarán las muestras, en este caso en particular, se trabaja con dos laboratorios; para metales y aniones se enviaron las muestras al Activation Laboratorios Ltd. de Canadá y para isótopos se enviaron al Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona, los cuales exigen 60 ml de muestra. Los laboratorios son seleccionados por su calidad analítica y por su bajo costo (respecto a los existentes en México). Los envases empleados son de polietileno, cada uno con tapa y contratapa, previamente lavados con ácido clorhídrico y agua destilada, los cuales son etiquetados con el fin de llevar un orden y un muestreo sistemático que permita la fácil localización de una muestra en un mapa y por ende, en espacio y tiempo.

Al llegar al sitio de muestreo, se lavó aproximadamente tres veces el envase con el agua del aprovechamiento para quitar cualquier residuo que pueda existir en el envase, controlando de esta manera la calidad del agua y que no se vea alterado el resultado del análisis. Posteriormente, se tomó la muestra para aniones (F, Cl, I, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>) e isótopos (estables  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ), evitando la presencia de burbujas de aire dentro del envase para limitar la modificación potencial de la calidad química original. Para las muestras de metales (Li, Na, K, Mg, Ca, Sr, Mn, Fe NH<sub>4</sub>, Ba, Zn, Cu, Zr), es necesario filtrar la muestra con una membrana de acetato de celulosa de 0.45  $\mu\text{m}$  y posteriormente acidificarlas hasta

aproximadamente un pH de 2, con ácido nítrico de alta pureza, al igual que las anteriores, requieren de eliminación total de burbujas en el recipiente. Adicionalmente, se toma una muestra extra, sin acidificar ni filtrar, en caso que se llegará a necesitar posteriormente por algún contratiempo inesperado que se presentase. Al finalizar, es necesario mantener las muestras tomadas a menos de 4°C hasta que lleguen al laboratorio debido a que se pueden generar reacciones y alterar la muestra de agua, dando valores no representativos.

Sin embargo, a pesar del intento de no generar ninguna modificación o alteración de los parámetros químicos se puede presentar cierta variación durante el tiempo entre la recolección y traslado al laboratorio de las muestras, por lo que se realizan mediciones en el campo de temperatura, pH, potencial óxido-reducción (Eh), oxígeno disuelto y conductividad eléctrica a través de aparatos previamente calibrados; en el caso del medidor de pH, es calibrado en campo utilizando tres soluciones con pH de 4, 7 y 10 y una celda de aislamiento para graduar el aparato a la misma temperatura del agua a muestrear, asimismo, el equipo de oxígeno disuelto es calibrado con respecto a la altitud del lugar.

Otro parámetro medido en campo es la alcalinidad, que consiste en la titulación de un volumen de muestra establecido (20 ml), agregando gradualmente ácido sulfúrico de normalidad conocida por medio del titulador digital Hach hasta alcanzar un pH aproximado de 3. El valor de este parámetro corresponde a un cálculo a través del método de Gran, donde a partir de una gráfica de los resultados de campo se determina un punto de equivalencia y finalmente se aplica una fórmula que permite obtener el valor de la alcalinidad total y bicarbonatos (*Ver cálculo en Anexo 1*).

### ENSAYOS PARA DETERMINAR PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Con el trabajo de campo se pretendía obtener la profundidad al nivel del agua considerando las redes de observación existentes dentro del territorio de estudio y medir la profundidad al nivel estático en pozos adicionales que no formaran parte de una red de observación, de tal modo que finalmente se obtuviera un panorama general de la profundidad al nivel del agua y su evolución con relación al espacio y a la profundidad total de los aprovechamientos.

De igual manera, se realizarían dos ensayos: 1) pruebas de bombeo y 2) registros verticales de temperatura y conductividad eléctrica en pozos. El primero permite definir características hidráulicas de las unidades acuíferas, corroborar el tipo de frontera hidrológica presente, realizar las correcciones del caso a las mediciones de niveles dinámico registrados y calcular la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento correspondientes. Por otro lado, debido a que frecuentemente las muestras de agua subterránea que se toman en los pozos corresponden a una mezcla de diferentes sistemas de flujo, el segundo ensayo permite identificar la variación vertical en la calidad del agua subterránea, así como, identificar diferentes sistemas de flujo en los pozos elegidos y algunas características como espesor, temperatura y conductividad eléctrica para cada sistema.



No obstante, a pesar de existir diversos pozos en el territorio de estudio, especialmente al este de la Cuenca de México, en el estado de Puebla, éstos no contaban con dispositivos de medición de flujo, ni permitían la introducción de sonda eléctrica, por lo que la realización de estas pruebas tuvo que ser cancelada (Ver Foto No. 1.1).



Foto No. 1.1. Pozo de abastecimiento, San Mateo Ayecac, Edo. de Puebla; se aprecia que no cuenta con medidores de flujo ni tubería de salida para tomar muestras de agua

Es más, en algunos pozos no se podían tomar muestras de agua debido a que no contaban con tubería de salida (Ver Foto No. 1.1), lo cual indica que no se cumple con la ley de aguas nacionales como también se hacía referencia en el estudio de Carrillo-Rivera *et. al* (2004).

Después de recorrer el territorio, se observaron sólo dos pozos, ubicados en el Estado de Puebla, en los que se podían realizar los ensayos (Ver Fotos No. 1.2 y 1.3), sin embargo, éstos no se efectuaron teniendo en cuenta que la baja cantidad de datos no permitirían realizar una comparación válida y los resultados no serían representativos; igualmente, considerando la extensión del territorio de estudio no se obtendría una investigación confiable, debería realizarse un mayor número de pruebas.



Foto No. 1.2. Pozo en Guadalupe Victoria



Foto No. 1.3. Pozo en San Damian Texoloc

### 1.4.3. Fase Final

Se busca compilar, analizar e interpretar la información adquirida durante las dos anteriores fases y realizar un estudio interdisciplinario que permita entender el funcionamiento del sistema.

## 1.5. REFERENTE TEÓRICO

El estudio de la geología ambiental ha aumentado considerablemente a partir de las últimas dos décadas debido principalmente al aumento de catástrofes naturales que han afectado el entorno humano, y en forma amplia al ambiente; el objetivo de la geología ambiental como tal, es el estudio de la interacción e influencia entre procesos geológicos y la actividad del ser humano (Woodcock, 1994). Así, por ejemplo, las amenazas naturales como deslizamientos, erupciones volcánicas e inundaciones, etc., a pesar de ser de origen natural, afectan a la sociedad; de la misma manera, las actividades humanas tales como agricultura, tala (de bosque) y minería, etc., pueden llegar a tener un impacto sobre el ambiente.

Se puede considerar que la Tierra y el ambiente forman parte o se encuentran en un sistema en equilibrio dinámico, donde cualquier modificación de algún elemento en el sistema o su manejo inadecuado, puede generar interacciones con los diversos elementos que componen el sistema y a su vez crear perturbaciones y cambios en la salida del mismo, conduciendo a modificaciones, conocidas como “*impactos ambientales*”, que conllevan a su vez al desequilibrio del sistema. Por esta razón, es importante considerar las transformaciones en el paisaje por el diverso uso que se le puede dar a los elementos naturales, componentes del sistema en equilibrio, ya que se pueden alterar los procesos de un sistema y por ende, su comportamiento final, donde adicionalmente se podrán generar cambios sociales y económicos. En el caso del agua por ejemplo, el impacto de las actividades humanas en el ciclo hidrológico puede generar modificaciones en su calidad y a su vez, una disminución en cantidad.

Teniendo en cuenta que los servicios ambientales involucran al ambiente natural e incluyen a la sociedad se pueden considerar, por lo tanto, a éstos como parte de la geología ambiental.

### 1.5.1. Servicios Ambientales

#### DEFINICIÓN CONCEPTUAL

Hoy día, es evidente la disminución del entorno natural, ecosistemas y hábitats naturales, lo cual genera a su vez el decrecimiento de los procesos involucrados en el sistema, llevando a un rompimiento en el equilibrio existente cuando no se presentaba modificación o alteración alguna en el sistema por actividad antrópica, por lo que los beneficios ofrecidos por la naturaleza disminuyen igualmente. A esto se refiere el concepto **Servicio Ambiental (SA)**, que a pesar de ser estudio de diversas investigaciones no cuenta con una definición establecida o acordada por algún ente internacional, por lo que en documentos del Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP en inglés) y la Organización Mundial del Comercio (WTO en inglés) se señala la necesidad de desarrollar criterios o una definición de bienes y servicios ambientales (UNEP, 2004; WTO, 2004).

Por tal razón, cada proyecto relacionado con servicios ambientales, cuenta con su propia definición, lo que conlleva a su vez, a la generación de más conceptos por parte de entidades, instituciones de educación y gobiernos de diferentes países,

los cuales necesitan igualmente el uso de este concepto para la aplicación de este tipo de programa de PSA y redacción de leyes.

No obstante, una buena definición se encuentra en el libro “*Nature's Services – Societal Dependence on Natural Ecosystems*” de Daily (1997), donde se señala que los servicios ecosistémicos (concepto con el que se conocen también los servicios ambientales) son las *condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los componen, sostienen y permiten la vida humana* (Tomado de Constanza y Jørgensen, 2002).

Existen adicionalmente, definiciones del término que se rigen más en aspectos políticos que científicos, es el caso de Costa Rica, donde los servicios ambientales son definidos en la *Ley de Valoración y Retribución por Servicios Ambientales*, como “*aquellos derivados directamente de elementos de la naturaleza, y cuyos valores y beneficios pueden ser económicos, ecológicos o socioculturales, y que inciden directamente en la protección y el mejoramiento del medio ambiente, propiciando una mejor calidad de vida de los habitantes*”.

Por su parte, el *Fondo Nacional del Ambiente* en Perú, considera que los SA “*Son el resultado de procesos ecológicos de ecosistemas que generan beneficios económicos, sociales y ambientales a la sociedad.*”

En estas dos últimas definiciones políticas se observa la importancia que tienen los SA en cuanto a los beneficios que traen a la sociedad sin importar mucho el aspecto ecológico y de especies ligadas al ambiente. No hay que olvidar que la fauna y flora dependen de la naturaleza para su supervivencia pero también su interacción con el ambiente permite el buen desempeño de este último, por lo que las especies y seres vivos son de suma importancia, los cuales deben ser incorporados y tomados en cuenta en cualquier estudio ambiental.

De acuerdo con la *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable* de México, los servicios ambientales son “los que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio del manejo sustentable de los “recursos forestales”, tales como: la provisión del agua en calidad y cantidad; la captura de carbono, de contaminantes y componentes naturales; la generación de oxígeno; el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales; la modulación o regulación climática; la protección de la biodiversidad, de los ecosistemas y formas de vida; la protección y recuperación de suelos; el paisaje y la recreación, entre otros”.

La anterior definición de SA considera que los servicios ambientales sólo son generados por los ecosistemas forestales, lo cual es un grave error teniendo en cuenta, como se señaló anteriormente, que el ambiente es un sistema y por lo tanto son importantes todos los elementos que lo componen, no sólo una parte. Adicionalmente, los ejemplos que se citan no están todavía científicamente comprobados; esta parte será discutida en el capítulo cinco referente al pago por servicios ambientales e impacto al ambiente.

Asimismo, en el acuerdo que establece las *reglas de operación para el otorgamiento de pagos del programa de servicios ambientales hidrológicos* (SAH)

del 3 de octubre del 2003, se definen los SAH como “los servicios que brindan los bosques y selvas y que inciden directamente en el mantenimiento de la capacidad de recarga de los mantos acuíferos, el mantenimiento de la calidad de agua, la reducción de la carga de sedimentos cuenca abajo, la reducción de las corrientes durante los eventos extremos de precipitación, la conservación de manantiales, el mayor volumen de agua superficial disponible en época de secas y reducción del riesgo de inundaciones”.

Como se observa, existe una creencia que las zonas de recarga están asociadas con zonas boscosas y selváticas, sin embargo, puede existir recarga de agua subterránea en zonas con diferentes características, de ahí la importancia de realizar primero una evaluación y definición de las zonas de recarga antes de implementar cualquier tipo de programa. Igual se aprecia el uso de palabras subjetivas (disponible) en la legislación y normatividad mexicana, que como se menciona previamente se presta para confusiones.

De esta manera, existen diversas definiciones de servicios ambientales en la literatura, sin embargo, éstas sólo reconocen la importancia elemental insuficiente de los elementos naturales como tal y en la mayoría, no se incorpora los procesos involucrados e interrelación entre todos los elementos formadores del ambiente, por lo que en este trabajo se define **Servicio Ambiental** como el beneficio tangible o intangible que los ecosistemas y sus procesos esenciales aportan como condición indispensable para la subsistencia humana y las actividades de desarrollo.

Burstein *et al* (2002) divide en tres grandes categorías los servicios ambientales

1. Los servicios derivados de la provisión de bienes; como alimentos, medicinas, fibras, leña, semillas, entre otros.
2. Los servicios ligados a la regulación del ambiente; la provisión de agua, calidad del aire, control de erosión, conservación de plantas y animales, y como soporte esencial en la mitigación de riesgos naturales.
3. Los servicios que tienen que ver con su valoración por razones culturales, religiosas y como espacios importantes para la recreación.

#### Pago por Servicio Ambiental

Otra definición que permite visualizar un poco los objetivos del Programa de PSA es aquella de Torres-Carral (2006), donde señala que el servicio ambiental es, *“una prestación en la forma de procesos y funciones biológicas y fisicoquímicos del ambiente (ecosistemas). El SA se realiza en espacios o propiedad de individuos o comunidades y que, por no regularse por el mercado, no le es retribuido por el capital, ya que se le consigue gratuitamente y no ha sido todavía objeto de la valoración económica.*

*De esta manera, anteriormente los servicios ambientales que proveían los bosques, desiertos, humedales, etc., eran ofrecidos de manera gratuita y no eran valorados económicamente, pero debido al alto grado de degradación, desaparición de varias especies y el cambio en la dinámica de la naturaleza conocida por el ser humano, su importancia fue creciendo al grado de crear mecanismos para su conservación y*

continua provisión en el futuro, convirtiéndolos a su vez en un sujeto potencial de comercialización”.

En general, la idea central del PSA es que los beneficiarios externos de los SA paguen de manera directa, contractual y condicionada a los propietarios y usuarios locales por adoptar prácticas que aseguren la conservación y restauración de ecosistemas. Asimismo, se ha considerado que la implementación de este tipo de programas contribuye con la reducción de la pobreza, deforestación y el desarrollo sostenible (Ver Figura No. 1.1); parámetros que serán discutidos con mayor detalle más adelante en el capítulo cinco, junto con la valoración económica, factor importante de revisar en el mercado de SA, donde el precio asignado para la protección de bosques y selvas debe ser representativo y equivalente al beneficio que ofrece el SA.

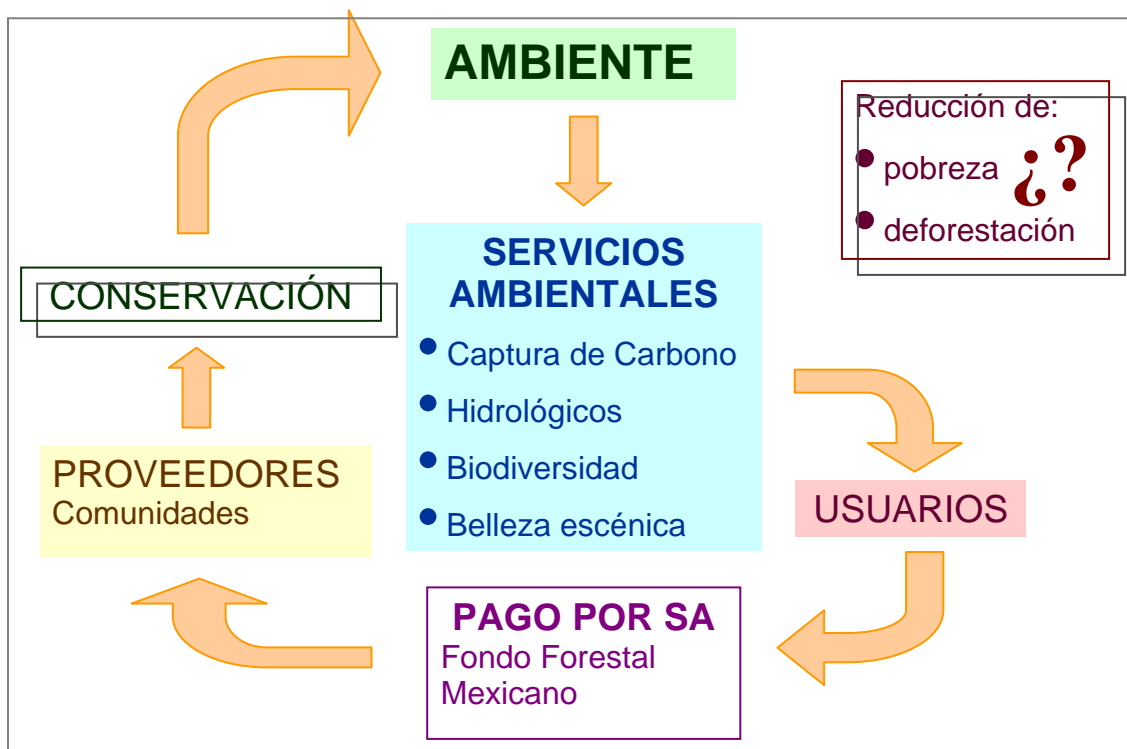


Figura No. 1.1. Esquema del mecanismo de pago por servicio ambiental

Cardoza (2005), por su parte y de manera más detallada, señala que el pago de servicios ambientales consiste en retribuirle a los propietarios o poseedores de los terrenos de donde derivan los servicios, que mediante acciones concretas efectuadas por ellos en esos lugares, aseguren la producción continua y sostenida de dichos servicios. Las acciones que podrán efectuar los propietarios pueden ser: conservar la vegetación de los predios, o aumentarla mediante trabajos de reforestación, efectuar obras de conservación y restauración de suelos, aprovechar el bosque de manera sustentable, protegerlo contra incendios, plagas y enfermedades, tan sólo por citar algunas.

El Centro Internacional de Investigación Forestal (CIFOR, 2005) usa cinco criterios relativamente simples para describir los principios del PSA. *Un sistema de PSA es...*

- *una transacción voluntaria, donde...*
- *un SA bien definido (o un uso de la tierra que aseguraría ese servicio)...*
- *es "comprado" por al menos un comprador de SA...*
- *a por lo menos un proveedor de SA...*
- *sólo si el proveedor asegura la provisión del SA transado (condicionamiento).*

El problema en esta definición es que es netamente económica, se maneja el SA como un mercado sin recalcar la importancia del beneficio que este ofrece y tampoco incluye la relación del pago con respecto al provecho que se obtiene.

### ANTECEDENTE NORMATIVO

#### Antecedentes Internacionales

Como se mencionó anteriormente, es aproximadamente en la década de los cuarentas que se inicia un interés ambiental con la creación de entidades internacionales cuyo objetivo es la conservación ambiental, seguido de conferencias y reuniones de índole mundial que buscan instaurar políticas ambientales, entre las cuales se destacan los siguientes documentos que pueden considerarse como base jurídica de los servicios ambientales:

✓ *Declaración de Estocolmo*, surge de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Humano, realizada en Estocolmo en 1972.

Se introdujo por primera vez a la agenda política mundial la dimensión ambiental como condicional y limitante del modelo tradicional de crecimiento económico y su relación con el ambiente. El mayor logro fue que se aceptara una visión de los ecosistemas del mundo, en la que se reconocía, entre otras cosas, que *"el hombre es a la vez obra y artífice del medio que lo rodea..., con una acción sobre el mismo que se ha acrecentado gracias a la rápida aceleración de la ciencia y de la tecnología..., hasta el punto que los dos aspectos del medio humano, el natural y el artificial, son esenciales para su bienestar"*.

Las recomendaciones acordadas en la Conferencia, fueron de carácter estrictamente de los ecosistemas, donde se destacan las siguientes: i) preservación de muestras representativas de los ecosistemas naturales en los denominados "bancos genéticos"; ii) protección de especies en peligro, especialmente los grandes cetáceos oceánicos; mantenimiento y mejora de la capacidad de la Tierra para producir "recursos" vitales renovables; iii) planificación de los asentamientos humanos, aplicando principios urbanísticos que respeten el entorno; iv) evitar la contaminación a todos los niveles, estableciendo las listas de los contaminantes más peligrosos, así como la de aquellos cuya influencia puede ser más irreversible a largo plazo; v) creación de un Programa mundial sobre el Medio Ambiente, patrocinado por las Naciones Unidas y destinado a asegurar, al nivel internacional, la protección del entorno.

✓ *El Informe Brundtland (1987)*, Elaborado por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, remitido a las Naciones Unidas, bajo el título de *Our Common Future (Nuestro Futuro Común)*. El informe conceptúa como sostenible el modelo de desarrollo que “atiende a las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de que las futuras generaciones atiendan a sus necesidades”. De aquí nace el concepto de “Desarrollo Sostenible” e inspiró la realización de las reuniones conocidas como “Cumbres para la Tierra”.

✓ *Declaración de Río*, surge de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo, llevada a cabo en Río de Janeiro en 1992. Los países participantes acordaron adoptar un enfoque de desarrollo que protegiera el ambiente, mientras se asegure el desarrollo económico y social. Dentro de la Declaración de Río, se contempla en el “Principio 1”, que los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible; tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza.

En el “Principio 10”, se considera que el mejor modo de tratar las cuestiones ambientales es con la participación de todos los ciudadanos interesados, en el nivel que corresponda. Los Estados deberán facilitar y fomentar la sensibilización y la participación de la población poniendo la información a disposición de todos. Deberá proporcionarse acceso efectivo a los procedimientos judiciales y administrativos, entre éstos el resarcimiento de daños y los recursos pertinentes.

Se señalan estos principios de la declaración porque son algo paradójicos, el primero considerando que se pretende un desarrollo sostenible, el cual de manera práctica se trabaja teniendo en cuenta que son más los intereses económicos y propios que el real interés en ayudar a los más necesitados y pobres tanto en el ámbito mundial como en el territorio nacional.

Por su parte, el principio 10 no aplica en México, ya que la adquisición de información es difícil, a pesar que hoy día muchas entidades gubernamentales han puesto a disposición de la población, a través del internet, diversa información; no obstante, existen casos o estudios que son guardados, ocultándose información valiosa para la investigación debido probablemente a intereses particulares y por lo tanto, esta limitada a cierto número de individuos que bajo la sombra del anterior principio (de desarrollo sostenible) obtienen beneficios para sí mismos, destruyendo el entorno natural la mayoría de veces y no cumpliéndose así, con el propósito de vivir en armonía con la naturaleza.

✓ *La Cumbre para la Tierra +5*, tuvo lugar en un período extraordinario de sesiones de la Asamblea General celebrada en 1997, su objetivo fue analizar la ejecución del Programa 21, aprobada en la Cumbre de 1992. En esta se pudo observar intensas deliberaciones de los Estados, acerca de cómo financiar el desarrollo sostenible, llegando a diversos acuerdos que son los siguientes:

- Adoptar objetivos jurídicamente vinculantes para reducir la emisión de los gases de efecto invernadero, los cuales son causantes del cambio climático
- Avanzar con más vigor hacia las modalidades sostenibles de producción, distribución y utilización de la energía

- Enfocarse en la erradicación de la pobreza como requisito previo del desarrollo sostenible.

✓ *Protocolo de Kyoto*, acordado en 1997 dentro de la Convención Marco sobre el Cambio Climático de la ONU (UNFCCC). Los gobiernos sabían que sus compromisos no serían suficientes para abordar en serio los problemas del cambio climático. En la primera Conferencia de las Partes (CP1, la cual corresponde con una asociación de todos los países que son Partes en la Convención), realizada en Berlín en 1995, las Partes pusieron en marcha una nueva ronda de conversaciones para decidir la adopción de compromisos más firmes y más detallados para los países industrializados, conocido como el Mandato de Berlín. Después de dos años y medio de negociaciones intensas, se adoptó el protocolo de Kyoto en la CP3 de Kyoto (Japón), el 11 de diciembre de 1997.

Los objetivos del Protocolo de Kyoto corresponden con aquellos de la Convención, sin embargo, su creación permitió un refuerzo significativo debido a que en él diversos países se comprometen a lograr objetivos individuales y jurídicamente vinculantes para limitar o reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo general del Protocolo de Kyoto es conseguir reducir un 5,2% las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012.

Este es el único mecanismo internacional para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos. Para ello contiene objetivos legalmente obligatorios para que los países industrializados reduzcan las emisiones de los 6 gases de efecto invernadero de origen humano como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre.

Es a partir de este protocolo que se inicia el mercado de captura de carbono, el cual consiste en el intercambio de bonos que validan que se esté realizando acciones de captura de emisiones de carbono en una zona determinada. Estos bonos son adquiridos por empresas de diferentes países que quieren demostrar que están compensando emisiones pasadas o adicionales. El respaldo de los bonos viene de alguna institución certificadora, privada o pública, que funciona como aval científico y administrativo de las toneladas de carbono almacenadas. Creándose de esta manera un primer mercado que sirvió de base para el inicio de diferentes programas de pago por servicio ambiental, entre ellos el hidrológico.

En el 2000 México ratifica el Protocolo de Kyoto y lo suscribe en el 2005.

✓ *Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible*, llevada a cabo en el 2002 en Johannesburgo. Se presentaron declaratorias sobre el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza, todo esto sobre la base de la protección y conservación de los “recursos naturales”.

### Antecedentes en México



En el territorio nacional, el marco legislativo que administra la gestión de los elementos naturales se encuentra disperso en varios instrumentos legales, los principales son:

✓ *Ley Ambiental*, aprobada en 1971. Esta ley responde a la acelerada industrialización y urbanización del país; estaba dedicada estrictamente al control de la contaminación del aire, agua y mar.

✓ *Ley Federal de Protección del Ambiente* de 1982, se incluyen provisiones para la protección y preservación de los ecosistemas, incorporando por primera vez un referente legal para la protección de la flora, fauna, tierra y agua. Esto dio origen a una nueva secretaría federal con responsabilidades ecológico-ambientales, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE).

✓ *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)* de 1988. Esta ley fue enmendada a finales de 1996, reflejando en ella el objetivo del equilibrio entre la sustentabilidad biofísica y la socioeconómica. La última reforma fue hecha el 23 de mayo de 2006.

✓ *Ley Forestal*, fue una de las leyes reglamentarias del artículo 27 constitucional. En ella se presenta un esquema de regulación al uso y disfrute de las tierras. Ha sido modificada varias veces desde su primera edición en 1984, su última modificación fue en el 2001, donde se regula y fomenta la conservación, protección, restauración, aprovechamiento, manejo, cultivo y producción de los “recursos forestales” del país, a fin de propiciar el desarrollo sustentable.

✓ *Ley Agraria*, es publicada en el Diario Oficial en 1992, en ella se reglamenta la reforma del artículo 27 constitucional. Sus principales características son, dotar de personalidad jurídica a los ejidos y comunidades agrarias y otorgarles la propiedad de sus tierras. Asimismo fortalece la figura de las Asambleas Generales de ejidatarios o comuneros como el órgano supremo del núcleo agrario y precisa la función del Comisariado ejidal o de bienes comunales como la de un representante.

A partir de la reforma del artículo 27 constitucional en 1992, se establece las condiciones para la incorporación de las tierras de propiedad social al mercado y de esta forma se promueve las inversiones en el campo. Esto originó la creación varias instituciones ambientales cuyo principal objetivo es normar y proteger los “recursos” del país. Y con ello se dio el primer paso para la implementación del Programa de Servicios Ambientales.

✓ *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*, publicada el 25 de febrero de 2003 con una última reforma del 26 de diciembre de 2005. Esta ley es reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución política de los estados Unidos Mexicanos y tiene por objeto regular y fomentar la conservación, protección, restauración, producción, ordenación, cultivo, manejo y aprovechamiento de los ecosistemas forestales del país y sus “recursos”, así como distribuir las competencias que en materia forestal correspondan a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, con el fin de propiciar el desarrollo forestal sustentable. Algunos de sus objetivos generales son:

- contribuir al desarrollo social, económico, ecológico y ambiental del país, mediante el manejo integral sustentable de los “recursos forestales”, así como de las cuencas y ecosistemas hidrológico-forestales, sin perjuicio de lo previsto en otros ordenamientos
- impulsar la silvicultura y el aprovechamiento de los “recursos forestales”, para que contribuyan con bienes y servicios que aseguren el mejoramiento del nivel de vida de los mexicanos, especialmente el de propietarios y pobladores forestales
- desarrollar los bienes y servicios ambientales y proteger, mantener y aumentar la biodiversidad que brindan los “recursos forestales”

En el artículo 30 de la misma ley, se estipula que la política nacional en materia forestal deberá promover el fomento y la adecuada planeación de un desarrollo forestal sustentable y deberá observar diversos principios, algunos como:

- Desarrollar mecanismos y procedimientos que reconozcan el valor de los bienes y servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas forestales, con el propósito de que la sociedad asuma el costo de su conservación<sup>1</sup>
- Crear mecanismos económicos para compensar, apoyar o estimular a los propietarios y poseedores de los “recursos forestales” por la generación de los bienes y servicios ambientales, considerando a éstos como bienes públicos, para garantizar la biodiversidad y la sustentabilidad de la vida humana<sup>2</sup>
- Consolidar una cultura forestal que garantice el cuidado, preservación y aprovechamiento sustentable de los “recursos forestales” y sus bienes y servicios ambientales, así como su valoración económica, social y de seguridad que se proyecte en actitudes, conductas y hábitos de consumo

✓ *Acuerdo que establece las reglas de operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos*, publicado por la Secretaría de Medio Ambiente y “Recursos Naturales” (SEMARNAT) el 3 de octubre de 2003, en el cual “se reconoce la existencia y la importancia de todos los Servicios Ambientales que prestan los bosques y selvas a la realización de actividades productivas y de consumo, entre los que se encuentran la conservación de la biodiversidad, el mantenimiento de los acervos de “recursos” genéticos, la captura de carbono atmosférico para evitar el cambio climático<sup>3</sup>, la atracción de turismo por paisaje y el ecoturismo, y la protección de cuencas hidrográficas, reducción de desastres hídricos y la recarga de acuíferos, y que existe la voluntad de promover su protección e incentivar el mantenimiento de su producción a través de una estrategia de generación de mercados de servicios ambientales”.

---

<sup>1</sup> Es importante que dentro de lo que denominan sociedad se encuentre incorporada la industria, ya que en el caso del agua, a pesar de ser de las mayores consumidoras el costo asociado es muy bajo, adicionalmente, la ley no exige mucho en aspectos ambientales, por lo que estos privilegios deben ser reevaluados y modificados

<sup>2</sup> El monto o actividad de retribución por conservación a los propietarios debe ser algo razonable, que permita a los mismos obtener mayores beneficios que si realizaran alguna otra actividad

<sup>3</sup> No ha sido comprobado aún que el cambio climático sea netamente por causas antrópicas, así como tampoco la influencia del bosque en la captura de carbono como se indica posteriormente en el capítulo 5

Los criterios de elegibilidad referidos en este acuerdo son:

- Porcentaje de la cubierta forestal mayor al 80% de su superficie total
- Localización en las zonas críticas para recarga de acuíferos o catalogadas como “sobrexplotadas” por la Comisión Nacional del Agua CNA, zonas con problemas de escasez, de calidad del agua o desastres hidrológicos
- Localización dentro de las montañas listadas por CONAFOR o vinculación con el abastecimiento de agua a centros poblacionales de más de 5,000 habitantes

✓ *Decreto por el que se modifica la Ley Federal de Derechos*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 30 de diciembre de 2003, en el que se establece el destino específico de una parte de lo recaudado por el uso, aprovechamiento y explotación de aguas nacionales al Fondo Forestal Mexicano para el desarrollo y operación de programas de pago por Servicios Ambientales.

✓ *Acuerdo por el que se modifica el diverso que establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 18 de junio de 2004. Se establece “que por los graves problemas que enfrenta México respecto a la degradación de sus acuíferos subterráneos<sup>4</sup>, la frecuencia de desastres en eventos de precipitación extrema y los problemas de azolves y calidad de agua relacionados con la erosión del suelo, el primer elemento a ponerse en práctica de la estrategia del Poder Ejecutivo, apoyado por el H. Congreso de la Unión es, canalizar parte de las contribuciones federales de los usuarios del agua al mantenimiento de los Servicios Ambientales Hidrológicos prestados por bosques y selvas ubicados en zonas prioritarias.

Igualmente, en este acuerdo, se reconoce que todo bosque y selva provee Servicios Ambientales, por lo que la línea de política pública es focalizar, durante la primera etapa, los recursos federales donde pueda hacer una diferencia mayor, esto es, en las áreas forestales que actualmente no generan ingresos como tales para sus propietarios y que por lo mismo están en mayor riesgo de deforestación por cambio de uso de suelo y que al mismo tiempo sean claves para la provisión del servicio ambiental de protección al “recurso agua”.

✓ *Acuerdo por el que se expiden las Reglas de Operación de los Programas de Desarrollo Forestal de la Comisión Nacional Forestal*, se publica el día jueves 16 de febrero de 2006, después de la implementación de algunos programas de PSA (tanto hidrológico como de captura de carbono). Estas Reglas de Operación establecen las normas y procedimientos de aplicación general que se deberán observar en la operación, asignación y ejecución de los apoyos federales a cargo de la CONAFOR. Algunos de sus objetivos es impulsar la planeación y

---

<sup>4</sup> La palabra acuífero hace referencia a una formación geológica, parte de una formación o grupo de formaciones con material suficientemente poroso para almacenar agua, y con la permeabilidad necesaria para permitir que el agua fluya a través de él en cantidades económicas y de calidad deseable, por lo que todos los acuíferos se encuentran en el subsuelo y no es necesario agregar la palabra subterráneo ya que sería un pleonasma

organización forestal, incrementar la producción y productividad de los “recursos forestales”, conservación y restauración, así como elevar el nivel de competitividad del sector para contribuir a mejorar la calidad de vida de los mexicanos.

El contenido de estas Reglas de Operación sustituye a las Reglas de Operación de los siguientes Programas:

- Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN)
- Programa de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales (PROCOREF)
- Programa de Desarrollo Forestal (PRODEFOR)
- Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH)
- Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono, de Protección a la Biodiversidad y los derivados del establecimiento y mejoramiento de Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA)

Adicionalmente se incorporan a estas Reglas de Operación los conceptos de apoyo siguientes:

- Cadenas productivas, y
- Prevención y Combate de Incendios Forestales

Con este nuevo esquema de operación los apoyos al sector forestal se enmarcan en cuatro categorías:

1. Planeación y organización forestal
  - Estudios regionales forestales
  - Programas de manejo forestal
2. Producción y productividad forestal
  - Ejecución de programas de manejo forestal
  - Cultivo forestal
  - Diversificación del uso de terrenos forestales
  - Plantaciones forestales comerciales
3. Conservación y Restauración forestal
  - Conservación y restauración
  - Prevención y combate de incendios forestales
  - Sanidad forestal
  - Servicios ambientales
4. Incremento del nivel de competitividad
  - Equipamiento e infraestructura
  - Desarrollo de la cadena productiva forestal
  - Auditoria técnica preventiva y certificación forestal
  - Capacitación y adiestramiento

Las especificaciones correspondientes a cada categoría y los criterios de resolución y de prelación, se encuentran en los anexos 1, 2, 3 y 4 de las Reglas.

En cuanto a servicios ambientales, el objetivo es promover y desarrollar el mercado de servicios ambientales forestales<sup>5</sup>. Los recursos disponibles se destinarán a la elaboración y ejecución de proyectos de los conceptos específicos relacionados con servicios ambientales hidrológicos, por captura de carbono, los derivados de la protección de la biodiversidad y los sistemas agroforestales con cultivos bajo sombra. Las proporciones para cada concepto específico serán especificadas anualmente en las convocatorias de CONAFOR, asimismo, las áreas objeto de apoyo por concepto de servicios ambientales son aquellas dentro de las zonas de elegibilidad para cada concepto que dé a conocer CONAFOR.

De manera general, los apoyos actuales de servicios ambientales se muestran en la *Tabla No. 1.1*.

*Tabla No. 1.1. Apoyos por Servicios Ambientales*

<b>CONCEPTOS DE APOYO</b>	<b>MONTO DE APOYO (smvdf*)</b>	<b>SUPERFICIE DE APOYO (ha)</b>	<b>FORMA DE OTORGAR EL APOYO</b>
I) Hidrológicos	8.5 por ha por año en mesófilo y 6.5 por ha por año en otros bosques y selvas	50 a 4,000	Apoyo hasta por 5 años consecutivos
II) Captura de carbono	2 por tonelada de CO <sub>2</sub> e	Mínimo 500	Apoyo hasta por 5 años consecutivos
III) Protección a la biodiversidad	10,500 por proyecto	No aplica	Apoyo hasta por 5 años consecutivos
IV) Sistemas agroforestales con cultivos de sombra	6.5 por ha por año y 10.5 por ha por año para producción orgánica certificada	Mínimo 250	Apoyo hasta por 5 años consecutivos
V) Elaboración y promoción de los proyectos relativos a los incisos I), II) y III)	4,200 por proyecto	No aplica	Apoyo por única ocasión, 50% al iniciar y 50% cuando el Comité apruebe el proyecto. Un 30% del apoyo otorgado deberá estar destinado para la promoción a fin de propiciar la compra de los servicios ambientales considerados.

\*smvdf: salario mínimo vigente en el Distrito Federal

*Criterios de resolución del trámite:*

- 1) Sólo se podrá ser beneficiado por uno de los cinco conceptos de apoyo,
- 2) La zona debe estar dentro de las áreas definidas por CONAFOR como zonas de elegibilidad para el pago de servicios ambientales según el concepto de apoyo correspondiente,
- 3) Para el caso de SA hidrológicos y sistemas agroforestales con cultivos de sombra, se requiere que el terreno tenga una cobertura forestal arbórea mayor al 50% conforme a la cartografía publicada por el INEGI.

<sup>5</sup> Al parecer se pretende más la búsqueda de un mercado de SA que su misma conservación, esto se discute en el capítulo 5

Adicionalmente, en las reglas se presentan los criterios de ejecución específico para cada concepto de apoyo, sin embargo, en este estudio sólo se mencionará el caso de los servicios ambientales hidrológicos.

### *Servicios Ambientales Hidrológicos*

La cantidad de pago por servicios ambientales hidrológicos se determina a partir de la suma de las superficies con bosques y selvas que presenten una cobertura forestal arbórea mayor del 50% dentro de cada área propuesta. La superficie total del área propuesta puede estar integrada en grupos de predios que por lo menos se encuentren unidos por uno de sus vértices y que en conjunto, cumplan con la superficie mínima requerida.

Los beneficiarios de este pago deberán entregar un programa de mejores prácticas de manejo de los predios beneficiados, siguiendo los términos de referencia de CONAFOR, como requisito para refrendar el pago del segundo año. Se podrá presentar el programa de mejores prácticas desde el primer año, lo cual dará prioridad en la asignación de acuerdo con los criterios de prelación; el cumplimiento de las acciones señaladas en el programa de mejores prácticas será requisito para los pagos anuales subsecuentes a cuando se haya presentado.

Los solicitantes de este pago, pueden optar por requerir primero apoyos para la elaboración de proyectos que incluyan las mejores prácticas de manejo y posteriormente requerir los correspondientes a ejecución. De ser así, los apoyos consideran las superficies y montos señalados en la *Tabla No. 1.2*.

*Tabla No. 1.2. Apoyos por Servicios Ambientales Hidrológicos*

<b>Superficie Ha</b>	<b>Monto anual (smvdf)</b>
50 - 200	500
> 200 - 500	550
> 500 - 1,000	600
> 1,000	700

Para predios que se encuentren bajo manejo forestal maderable, la superficie máxima de apoyo por beneficiario es de 200 hectáreas y no pueden coincidir con las áreas de corta determinadas por el Programa de Manejo Forestal autorizado. Dicha superficie puede ser de hasta 4,000 hectáreas, cuando comprometan superficies de conservación que se encuentren totalmente fuera de las áreas de aprovechamiento maderable, acreditada en el plano que contenga el plan de cortas del Programa de Manejo Forestal.

Los criterios de prelación son:

- a. porcentaje de cobertura forestal arbórea
- b. ubicación dentro de un ANP
- c. zona ubicada dentro de los límites de las sesenta montañas prioritarias para la CONAFOR
- d. localización dentro de un acuífero “sobreexplotado” (decreto CNA)

- e. ubicación dentro de las zonas consideradas de alto riesgo de deforestación según el Índice de Riesgo de Deforestación (INE)
- f. zona ubicada dentro de una región con “alta escasez” de agua superficial (Ley Federal de Derechos)
- g. localización en municipio con mayoría indígena (INEGI)
- h. solicitantes de localidades marginadas (CONAPO)
- i. solicitante con contrato vigente señalando algún usuario de sus servicios ambientales<sup>6</sup>

### **1.5.2. Agua Subterránea**

Se ha comentado anteriormente en este trabajo sobre la importancia de conocer el funcionamiento del agua subterránea, a pesar que existen diversas metodologías que buscan este objetivo, son pocas las que ven al ambiente como un sistema complejo con diferentes variables (muchas veces interdependientes) y lo que hacen por lo contrario es un intento por realizar una calificación y más aún, una cuantificación del agua sin incorporar todas las variables involucradas (del entorno ambiental) ni entender realmente el comportamiento del mismo. Se señalan variables “del entorno ambiental” debido a que en la mayoría de los estudios de agua subterránea se realiza un intento por obtener el volumen del elemento a través del balance hídrico, donde se analizan otras variables relacionadas con las entradas de agua que alimentan al acuífero y las salidas del mismo.

#### **BALANCE HÍDRICO**

La ecuación en su forma más básica se representa:

$$P = E_{sc} + E_{vtrans} + Q_{ext} + R_{ec}$$

Donde,

P	Precipitación
$E_{sc}$	Escorrentía
$E_{vtrans}$	Evapotranspiración
$Q_{ext}$	Caudal de extracción
$R_{ec}$	Recarga al agua subterránea

Sin embargo, en este trabajo no se realizará el balance debido a que se considera que es una metodología poco confiable ya que algunas variables involucradas no son medidas directamente sino estimadas a partir de otros parámetros. Según estudios realizados como el de Hergt *et al* (2002), Huizar *et al* (2004) y el SEDESOL (2005), entre otros, se tiene que:

---

<sup>6</sup> Existen diversos parámetros subjetivos en esta lista de criterios de prelación, “sobre-explotación” y “escasez” discutidos en la parte introductoria de este capítulo, “localidades marginadas” indicando un nuevo enfoque en los SA orientado más hacia la pobreza que conservación ambiental? (discutido en el capítulo 5) y el último numeral (i) referente al contrato vigente de SA, los cuales no han sido claramente identificados por lo que es difícil conocer los directos beneficiados de SA sin tener claro el funcionamiento de los mismos

1) *la precipitación*, es la variable que se presume como conocida y que representa ser la única fuente de agua que se maneja en el balance para una cuenca hidrográfica, sin embargo no se realiza el estudio para una cuenca hidrogeológica que puede tener entrada de agua subterránea a través de flujos intracuenca.

Generalmente se cuenta con datos históricos de precipitación, sin embargo, consiste de un registro de valores totales diarios, por lo que no se tiene la evolución de cierto evento o tormenta. La determinación de este parámetro para un área determinada presenta problemas graves por el número reducido de estaciones climatológicas, localización de éstas, tipo de estación (pluviógrafo o pluviómetro), influencia del cambio climático y procesos de urbanización alrededor de la estación.

Es importante anotar que las estaciones, tanto hidrométricas como climatológicas, se distribuyen en forma muy irregular por el territorio del país y muy pocas veces se cuenta con datos de dos o más estaciones en la misma corriente fluvial o cuenca hidrológica y con todo el registro histórico necesario para calcular (correctamente) el balance hídrico. Igualmente, la calidad de estos datos se ve afectada ya que existen errores humanos en la medición, manejo, método, interpretación e interpolación.

2) *la escurrentía*; es un parámetro que se mide muy poco, generalmente en ríos perennes y de gran magnitud, su limitación básica es la densidad, ubicación y tipo de estaciones a usar, adicionalmente, para su estimación es importante incorporar el efecto del cambio de cobertura del suelo en el territorio de estudio e identificar los diferentes componentes del flujo base, lo que implica una comprensión del funcionamiento del sistema hidrológico y conocer los diferentes aportes de agua existentes, ya que, en caso de presentarse un aporte de fuera de la cuenca, el cual no sea identificado, al realizar el cálculo parecerá que existe más infiltración de la que realmente se tendría, repercutiendo en los resultados finales y llevando a valores erróneos.

En otras ocasiones esta variable simplemente no es medida directamente en campo, por lo que algunos autores han propuesto el uso de un *coeficiente anual de escurrimiento*, el cual se obtiene a través de fórmulas empíricas, y ha sido estimado para otra cuenca con geomorfología, suelo y características climáticas diferentes en tiempo, espacio e historia precedente de temperatura, precipitación, viento, entre otras, lo que produce errores importantes para conocer el caudal de agua superficial que escurre como resultado de un episodio de precipitación, adicionalmente, en forma incomprensible, se incluye la evapotranspiración en el coeficiente de escurrimiento.

3) *la evapotranspiración*, a pesar que es usualmente un factor preponderante en el balance, es otro cálculo (no medición) que comúnmente se maneja y que tiene severas críticas debido a que los métodos propuestos fueron desarrollados para zonas templadas y normalmente, no representa las condiciones de campo; las fórmulas usadas simplemente no incluyen aspectos que inciden directamente en el caudal de agua que se va a la atmósfera, descartan parámetros de los cuales depende la evapotranspiración tales como la presencia de diferente tipo de vegetación, su estado de crecimiento y la densidad en la que se encuentra, la estructura del suelo, el clima, lluvia presente, antecedente y su duración, además



de la presión de vapor, velocidad del viento, temperatura, latitud, tiempo de insolación, profundidad al nivel freático, nivel topográfico, limitaciones por el cambio de escala.

4) Cabe mencionar igualmente que para el caso del *caudal de extracción* tampoco se obtienen valores que se ajusten a la realidad, considerando que la base de pozos no se encuentra verdaderamente actualizada debido a que no todos los pozos existentes son reportados, asimismo, los caudales de extracción reportados pueden no corresponder con los usados, ya que al parecer no se lleva control diario alguno al respecto.

5) *La recarga al agua subterránea*, es un parámetro que no ha podido ser directamente cuantificado en las zonas de recarga, y más aún, estas zonas no han sido establecidas con precisión y bases científicas sino que por el contrario, ha sido de manera cualitativa su definición. Por ende, el valor que se toma para esta variable es muchas veces el resultado de reemplazar la ecuación de balance hídrico.

Teniendo en cuenta esta problemática anteriormente señalada, no es recomendable realizar un balance hídrico para definir volúmenes asequibles de agua, ya que como se aprecia puede provocar una evaluación incorrecta de la situación con el elemento y cálculos errados.

Por otro lado, como se menciona antes, este trabajo pretende identificar y analizar procesos relacionados con impacto ambiental por lo que la aplicación de una metodología como el balance hídrico no sería la más apropiada ya que no analiza, incorpora ni establece procesos, por el contrario, se requiere de una técnica que permita visualizar el comportamiento del agua subterránea y su interacción con el ambiente, ya que el entender la dinámica del agua en el ambiente permite establecer los posibles impactos ambientales que se podrían generar al modificar algún proceso en el sistema, teniendo en cuenta que ciertos fenómenos naturales pueden ser generados o influenciados por el agua subterránea, tales como: salinización del suelo, generación de cárcavas, licuefacción del suelo, inestabilidad de un talud, presencia de geysers, eutrofización de lagos, cambio en el tipo y calidad de cobertura vegetal, morfología de karst, entre otros. Por tal razón se seleccionó trabajar con la teoría de los sistemas de flujo (Tóth, 2000) que permite la definición del funcionamiento del flujo de agua subterránea y a su vez, incorpora parámetros ambientales.

### TEORÍA DE SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Según Tóth (2000), el agua subterránea es la causa común de una gran variedad de procesos y fenómenos naturales, y que por tanto debe ser considerada como un importante agente geológico. Se considera que la interacción agua-ambiente y la naturaleza jerárquica y sistematizada de las líneas de corriente son las dos causas fundamentales responsables del comportamiento del agua subterránea como agente geológico.

A su vez, los parámetros de un régimen de agua subterránea están controlados por tres grandes componentes: la topografía, la geología y el clima; donde los factores climáticos determinan la magnitud y distribución espacial del agua suministrada a cada región; la topografía determina la cantidad de energía y su distribución zonal que dispone el agua para su movimiento en una cuenca determinada y conforma los contornos del sistema de flujo, por su parte, el referente geológico proporciona las zonas en las que el agua puede circular, controlando las magnitudes y el esquema de flujo, específicamente la posición de la roca basamento de donde se tiene el volumen y la distribución del agua almacenada, adicionalmente, determina la hidroquímica del agua.

En la *Figura No. 1.2* se aprecia un esquema simplificado de la distribución del flujo subterráneo tanto en el plano horizontal como en el vertical, se observa a su vez, zonas de recarga, tránsito y descarga, junto con los sistemas de flujo (local, intermedio y regional).

Para mayor comprensión se define brevemente a continuación algunos conceptos básicos de los sistemas de flujo, los cuales serán discutidos posteriormente con mayor detalle.

1) *Zonas de recarga.* Las zonas de recarga son áreas que reúnen una serie de factores que propician la infiltración de agua hasta alcanzar el agua subterránea, el flujo es vertical descendente y el nivel freático es profundo.

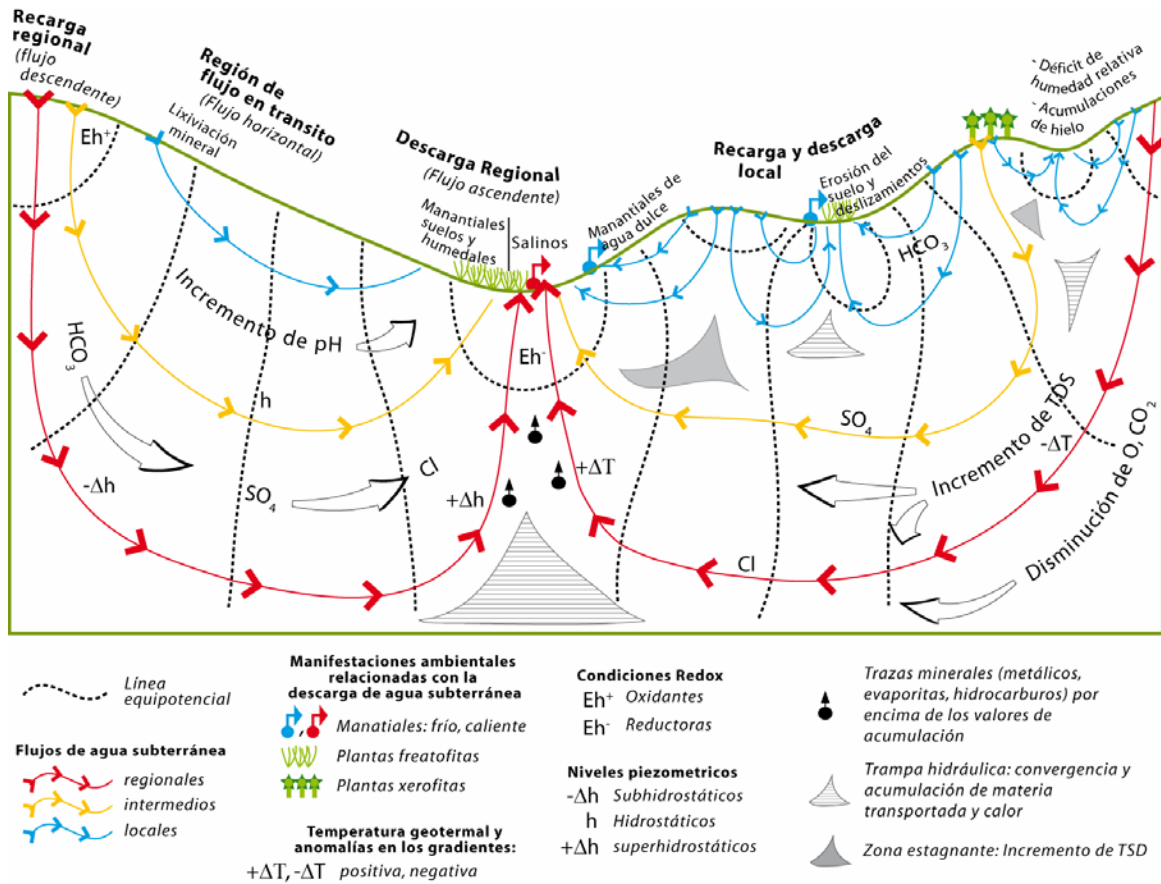
2) *Zonas de tránsito.* Como su nombre lo indica es una parte intermedia donde se produce la circulación del agua desde la zona de recarga hasta la de descarga.

3) *Zonas de descarga.* Son zonas naturales con movimiento vertical ascendente del agua, emergiendo del subsuelo, contribuyendo junto con el agua de escorrentía (exceso de lluvia) a la formación de fuentes superficiales de agua (manantiales, lagos, flujo base de ríos, lagunas costeras).

4) *Jerarquización de sistema.* Esto incorpora definir flujos de tipo local, intermedio y regional con sus componentes de recarga y descarga particular.

En forma general, existen tres sistemas principales de flujo de agua subterránea que se establecen con la topografía y el referente geológico existente: local, intermedio y regional (Tóth, 1962).

*Figura No. 1.2. Sistemas de flujo. Efectos y manifestaciones del flujo gobernado por gravedad en una cuenca regional (Tóth, 1999)*



### Sistemas de flujo local

Es el sistema más simple dentro de la jerarquía definida de las redes de flujo en el plano vertical. Generalmente, la topografía abrupta produce varios sistemas de este tipo, en donde las zonas de recarga y descarga están situadas en colinas y depresiones adyacentes, es decir, en el mismo valle. Las distancias que recorre el flujo desde su entrada hasta su salida son pequeñas, este tipo de sistemas se encuentra incluido en áreas de pocos kilómetros cuadrados, por lo que representa un sistema dinámico de corta duración, sensible a la precipitación y de poca cuantía. Con respecto a la calidad fisicoquímica del agua subterránea, en general, el agua es de baja salinidad, con alto contenido de oxígeno disuelto, bajo pH, temperatura cercana a la del ambiente y puede variar acorde cambian las estaciones del año.

### Sistemas de flujo intermedio

En algunos casos, parte del agua de recarga puede descargarse en otro valle localizado a un nivel topográfico menor incluyendo dentro de su extensión la presencia de varios flujos locales, esto definirá un sistema intermedio. Por lo tanto, este sistema se diferencia con el de flujo local en:

- el recorrido del agua subterránea en este sistema es de mayor dimensión
- presenta movimiento vertical descendente de agua con mayores gradientes hidráulicos
- el flujo lateral se lleva a cabo a mayor profundidad y por mayor distancia

- el movimiento de agua vertical ascendente es de mayor velocidad

Desde el punto de vista fisicoquímico y comparativamente con el agua de flujo local, el agua en la zona de descarga presenta una mayor temperatura, menor contenido de oxígeno disuelto, mayor contenido de sólidos totales disueltos (STD), pH más alcalino y más concentración de sales disueltas.

### Sistemas de flujo regional

Un sistema de flujo regional circula a mayor profundidad, iniciando en los terrenos de mayor altitud y finalizando en las zonas más bajas donde descarga, por lo que se pueden encontrar varios sistemas de flujo local sobre éste y al menos uno de tipo intermedio. Debido a su mayor recorrido y profundidad de circulación, el agua adquiere mayor temperatura que los sistemas locales e intermedios, la concentración de sales disueltas es también la mayor, presenta menor contenido de oxígeno disuelto y su pH tiende a ser más alcalino.

Cabe resaltar que todos los sistemas de flujo en un ambiente natural mantienen un recorrido separado. Como se puede apreciar (*Ver Figura No. 1.2*), los patrones de flujo presentan varios rasgos distintivos adicionales, éstos son:

- alternancia de regiones de recarga-descarga
- superposición vertical de diferentes tipos de régimen de flujo
- presencia de puntos de estancamiento, y
- sistemas de flujo de diferente jerarquía que comienzan en una misma región.

Por otra parte, los sistemas de flujo se pueden identificar por medio de métodos de gabinete y campo, donde se realice el análisis de la topografía, clima, referente geológico y se incluya la cartografía de cuerpos de agua, pruebas hidráulicas en perforaciones e indicadores superficiales de agua subterránea, tales como:

- flujo base en ríos y humedad en el suelo
- vegetación
- distribución de características físicas y químicas del agua subterránea
- presencia de suelos salinos, entre otros

Asimismo, en el trabajo de campo se puede observar características físicas y químicas que permiten definir las zonas de recarga y descarga (*Ver Tabla No. 1.3*).

Por último, en un programa ambiental como el de servicios ambientales es importante tener en cuenta las zonas de recarga y descarga del agua subterránea, ya que son primordiales en el funcionamiento de un sistemas hídrico (Tóth 1995, 2000), y se pueden considerar servicios, por el papel determinante que tienen en la renovación del de agua subterránea y en los ecosistemas que soportan.

*Tabla No. 1.3. Principales características comparativas entre zonas de recarga y descarga*

<b>ZONAS DE RECARGA</b>	<b>ZONAS DE DESCARGA</b>
Nivel freático profundo	Nivel freático somero
Relativa deficiencia de humedad en el suelo	Mayor y permanente humedad en el suelo
Nivel piezométrico relativamente alto, decrece con la profundidad	Nivel piezométrico bajo, crece con la profundidad
Corrientes superficiales con agua inmediatamente después de la lluvia	Presencia de flujo base en ríos
No existen manantiales	Presencia de manantiales
Flujo vertical descendente y divergente	Flujo vertical ascendente y convergente
Topografía alta	Topografía baja
Temperatura fría del agua (aumento de 1°C/33 m)	Temperatura caliente del agua
pH usualmente ácido	pH usualmente básico
Potencial redox (Eh) positivo	Potencial redox (Eh) negativo
Oxígeno disuelto alto	Oxígeno disuelto bajo
Agua de baja salinidad	Aumenta la salinidad
Cl<SO <sub>4</sub> <HCO <sub>3</sub>	Cl>SO <sub>4</sub> >HCO <sub>3</sub>
Vegetación xerófita (o que depende de la lluvia)	Vegetación freatofita (o que toma agua del nivel freático), y halófila (capaz de soportar cierta salinidad)
Suelo ácido	Suelo alcalino

## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TERRITORIO DE ESTUDIO

### 2.1. UBICACIÓN

El presente trabajo realiza el análisis de veinte ejidos, los cuales se agruparon en dos grandes áreas de estudio para mayor facilidad de manejo y comprensión de la información, teniendo en cuenta que son ejidos localizados en su vecindad, por lo que sus características físicas pueden ser muy semejantes entre sí. En la *Tabla No. 2.1* se señalan los ejidos agrupados en las áreas y en la *Figura No. 2.1* se presenta su distribución espacial.

*Tabla No. 2.1. Predios localizados en las áreas de estudio (Fuente: Base CONAFOR, 2003)*

ESTADO	Área de estudio	Clave Ejido INE	Nombre del Predio	Municipio	Superficie (ha)
DF	Área 1	14	Ejido Magdalena Petlacalco	Delegación Tlalpan	641.98
		15	Comunidad La Magdalena Atlitic Contreras	Delegación Magdalena Contreras	1,745.88
		16	Comunidad San Miguel Topilejo	Delegación Tlalpan	2,979.31
		17, 18	Ejido San Nicolás Totolapan	Delegación Magdalena Contreras	596.76
Puebla	Área 2	339, 340	Ejido San Juan Cuauhtemoc	Tlahuapan	236.04
		343	Ejido Guadalupito Las Dalias	Tlahuapan	95.13
		345, 346	Ejido Ignacio Manuel Altamirano	Tlahuapan	44.01
		347-349	Ejido San Andrés Hueyacatitla	San Salvador El Verde	80.38
		350	Bienes comunales de San Juan Cuauhtemoc	Tlahuapan	156.98
		351	Ejido Santa Cruz Moxolahuac	Tlahuapan	155.95
		352	Ejido Santiago Coltzingo	Tlahuapan	208.83
		523	Ejido San Miguel Tianguistengo	Tlahuapan	40.54
		524	Ejido Santa Rita Tlahuapan	Tlahuapan	191.03
		525	Hacienda San Miguel Contla	San Salvador El Verde	157.68
		526	Ejido San Rafael Ixtapaluca	Tlahuapan	200.15

El área 1 se encuentra al suroeste del Distrito Federal, entre las coordenadas 19°10'05" - 19°29'51" de latitud norte y 99°17'30" - 99°31'65" de longitud oeste;

por su parte, el área 2 se ubica al oeste del Estado de Puebla, en cercanía con el límite del estado de Tlaxcala, abarcando una pequeña superficie del lado este del estado de México, entre las coordenadas 19°23'28" – 19°46'54" de latitud norte y 98°57'33" – 98°67'06" de longitud oeste (*Ver Figura No. 2.1*).

Cabe señalar que, considerando que para el análisis del funcionamiento del flujo subterráneo es necesario manejar un esquema regional que permita ver la interrelación del agua subterránea con otras variables externas, en este estudio se analiza no sólo las dos áreas de estudio establecidas sino que a su vez se incorpora un análisis de información regional (aprovechamientos, litología, suelos, etc), cuyas características permiten definir con mayor factibilidad el comportamiento del agua, involucrando de esta manera una superficie de estudio de mayores dimensiones (territorio de estudio), la cual está representada de manera general en la *Figura No. 2.1*, abarcando el Distrito Federal en su totalidad y segmentos de los estados de México, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Morelos.

Los principales rasgos geográficos localizados en el territorio de estudio son las sierras, de oeste a este: Las Cruces, con dirección NW-SE, la cual inicia a un lado del Volcán Ajusco; Chichinautzin, con dirección W-E, localizada entre los volcanes Ajusco y Popocatepetl; Nevada y Río Frío, con lineamiento aproximado N-S y constituida por los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón y Tláloc.

## **2.2. CLIMA**

Debido a la diferencia de altitud y morfología del territorio de estudio, se presentan diversos tipos de clima, sin embargo, según el mapa de climas de CONABIO (1998), se observa que prevalece la lluvia en verano sin importar el clima predominante. De manera general, hacia la parte norte y central del territorio predominan los tipos de clima semiárido templado y los templados subhúmedos (*Ver Figura No. 2.2*), cuya temperatura media anual varía entre 12° y 18°C. Por otra parte, hacia el sur del territorio se encuentra clima semicálido subhúmedo, con temperatura media anual mayor de 18°C.

Al este y oeste del territorio, principalmente en las sierras e involucrando las áreas de estudio, prevalece un clima semifrío subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5° y 12°C y una precipitación promedio anual de 800 a 1,000 mm, no obstante, según el INEGI (2001), en los terrenos próximos al Volcán Ajusco, se puede tener una lluvia total anual de hasta 2,000 mm; la lluvia se presenta en verano, en las regiones menos altas, y cerca de las cumbres la lluvia cae durante todo el año. Hay heladas de octubre a marzo, frecuentemente se presenta niebla y rocío por la gran humedad que se ha estimado como promedio de 61 por ciento (Quintino, 1998).

De acuerdo con estos datos, se aprecia que las áreas de estudio se encuentran en partes más frías, factor atribuido en gran parte por su altitud (2,200 a 4,000 m snm), la cual a su vez, es importante para la formación de zonas de recarga de agua subterránea. En la *Tabla No. 2.2* se señalan los climas presentes en el territorio de estudio y su principal característica.

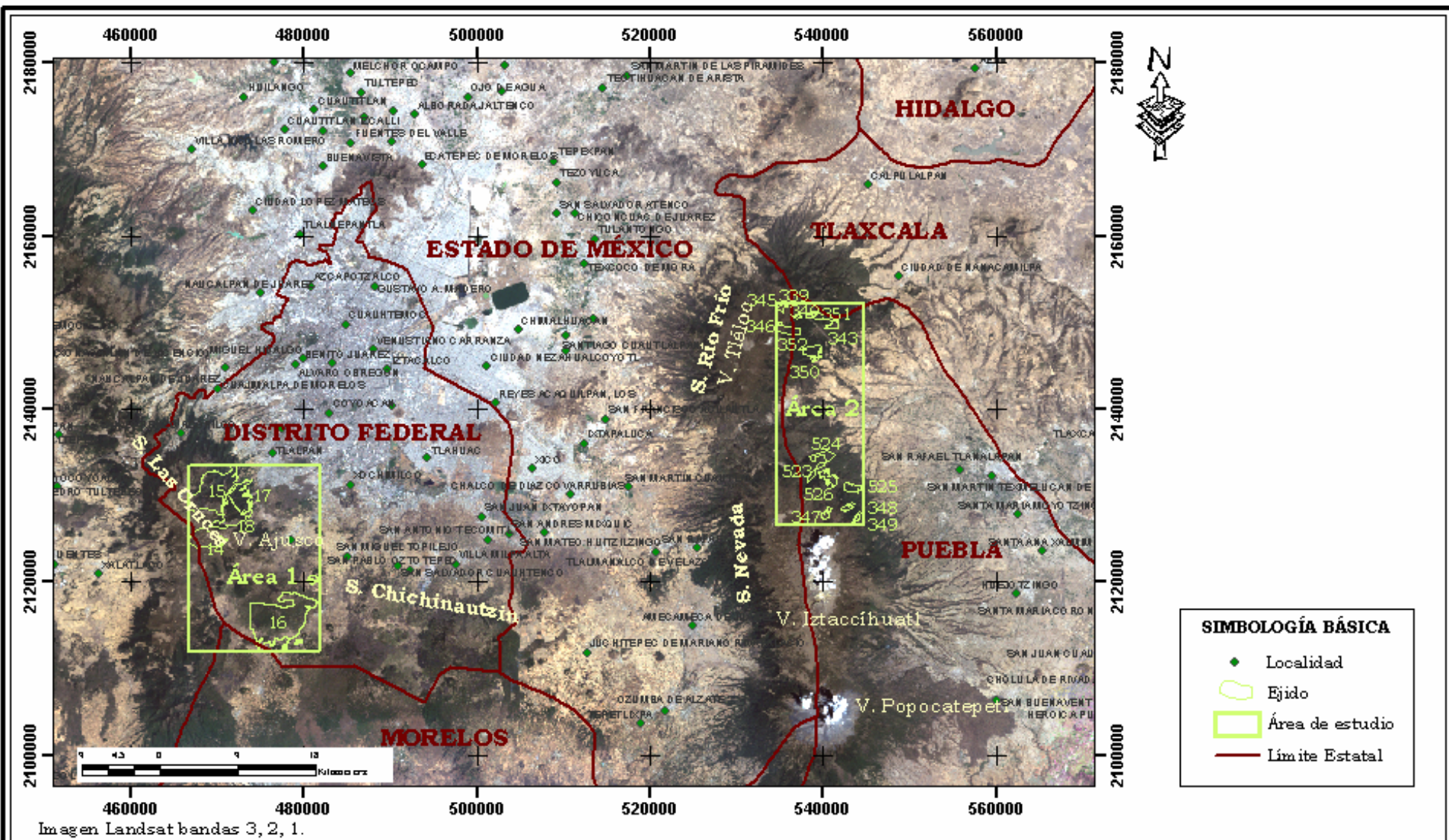


FIGURA No. 2.1. LOCALIZACIÓN DEL TERRITORIO DE ESTUDIO

**PROCESO DE RECARGA-DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS RECEPTORAS DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO, SIERRAS NEVADA Y LAS CRUCES - MÉXICO**

LILIANA ANDREA PEÑUELA ARÉVALO

2007

TERRITORIO DE ESTUDIO



POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



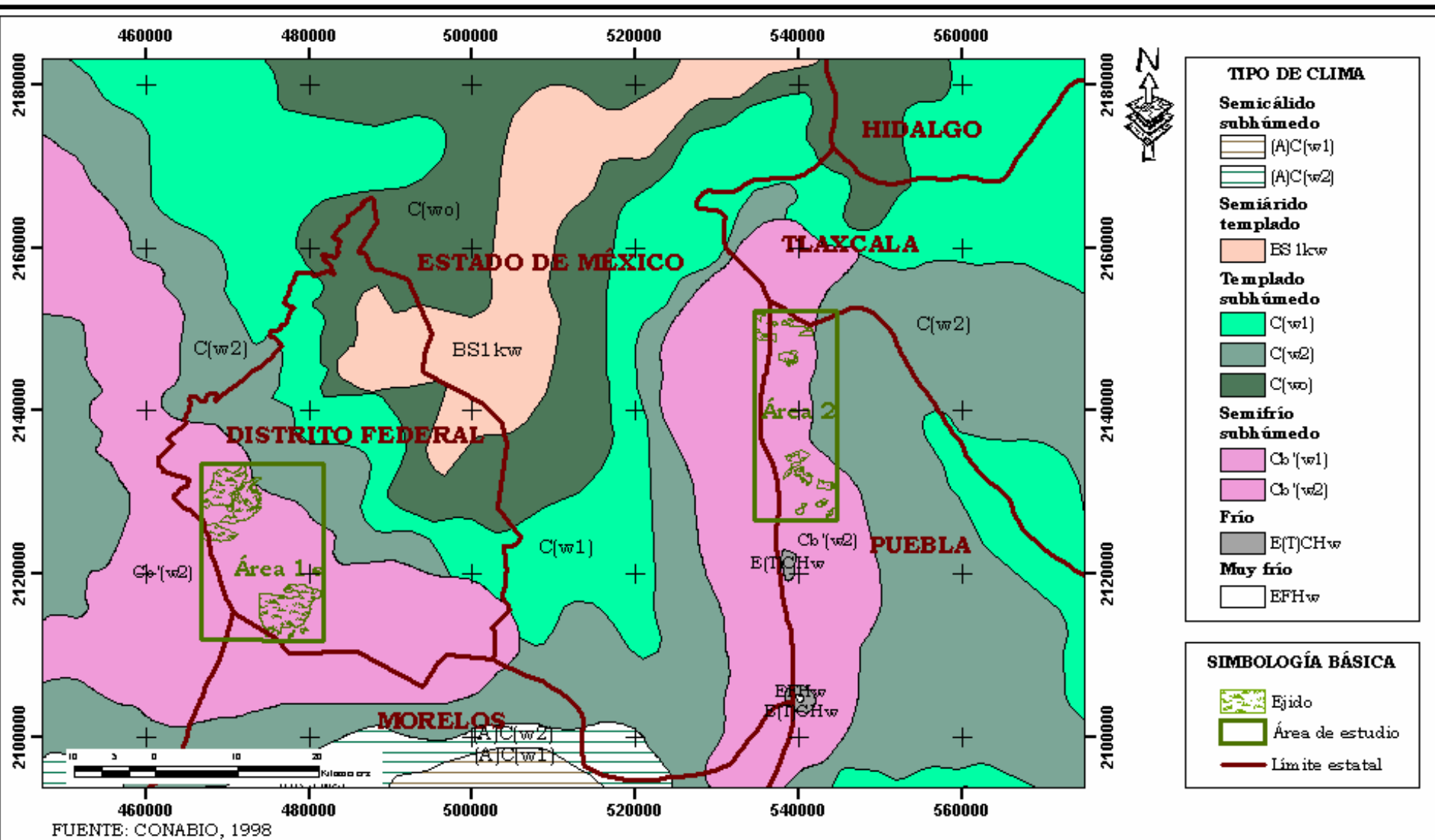


FIGURA No. 2.2. TIPO DE CLIMA EN EL TERRITORIO DE ESTUDIO

**PROCESO DE RECARGA-DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS RECEPTORAS DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO, SIERRAS NEVADA Y LAS CRUCES - MÉXICO**

LILIANA ANDREA PEÑUELA ARÉVALO

2007

TERRITORIO DE ESTUDIO



POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Tabla No. 2.2. Tipos de clima en el territorio de estudio

<b>TIPO DE CLIMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN TEMPERATURA</b>	<b>DESCRIPCIÓN PRECIPITACIÓN</b>
(A)C(w1)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual >18°C, temperatura del mes más frío <18°C, temperatura del mes más caliente >22°C.	Precipitación del mes más seco <40 mm; lluvia de verano con índice P/T entre 43.2 y 55; porcentaje de lluvia invernal de 5% a 10.2% del anual.
(A)C(w2)	semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual >18°C, temperatura del mes más frío <18°C, temperatura del mes más caliente >22°C.	Precipitación del mes más seco <40 mm; lluvias de verano con índice P/T >55 y porcentaje de lluvia invernal de 5% al 10.2% del anual.
(A)C(wo)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual >18°C, temperatura del mes más frío < 18°C, temperatura del mes más caliente >22°C.	Precipitación del mes más seco <40 mm; lluvias de verano con índice P/T < 43.2, y porcentaje de lluvia invernal de 5% al 10.2% del anual.
BS1kw	Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente <22°C.	Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal de 5% al 10.2% del anual.
C(w1)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente <22°C.	Precipitación en el mes más seco <40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55; porcentaje de lluvia invernal de 5% al 10.2% del anual.
C(w2)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente <22°C.	Precipitación en el mes más seco <40 mm; lluvias de verano con índice P/T >55 y porcentaje de lluvia invernal de 5 al 10.2% del anual.
C(wo)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente <22°C.	Precipitación en el mes más seco <40 mm; lluvias de verano con índice P/T <43.2 y porcentaje de precipitación invernal de 5% al 10.2% del anual.
Cb'(w1)	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C , temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente <22°C.	Precipitación en el mes más seco <40 mm; lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal de 5 al 10.2% del anual.
Cb'(w2)	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C , temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente <22°C.	Precipitación en el mes más seco <40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal de 5 al 10.2% del anual.
E(T)CHw	frío, temperatura media anual entre -2°C y 5°C, temperatura del mes más frío >0°C y temperatura del mes más caliente entre 0°C y 6.5° C.	Con lluvias de verano.
EFHw	Muy frío, temperatura media anual <-2°C, temperatura del mes más frío <0°C y temperatura del mes más caliente < 0°C.	Con lluvias de verano.



Clima presente en las áreas de estudio



así como sedimento lacustre y material re-trabajado. El espesor de estos materiales aumenta de norte a sur.

En general, la cuenca está compuesta por varios aparatos volcánicos, entre los que destacan los estratovolcanes del Iztaccíhuatl y Popocatepetl por su gran elevación, junto con la parte baja que se caracteriza por una extensa planicie lacustre en donde la elevación del terreno es del orden de 2,240 m snm (Vásquez, 1995).

Según Tapia-Varela (1999) se presentan cuatro grandes tipos de relieve en la Cuenca de México, éstos son:

#### LADERA DE MONTAÑA

Relieve de origen endógeno volcánico, de edad Terciario Superior-Cuaternario, está formado por domos, conos volcánicos y derrames de lava, principalmente; la composición de las rocas es de tipo básico a intermedio, encontrándose andesitas, dacitas y tobas con material piroclástico de flujo y de caída. Son unidades que se presentan a una altitud que varía entre los 5,465 y 2,900 m snm. Las sierras que componen este sistema corresponden con aquellas que se localizan en las áreas de estudio: las sierras Nevada y Ajusco.

#### LOMERÍO

Corresponde con el relieve de origen endógeno volcánico modelado durante el Cuaternario, se compone de toba, ceniza y depósito piroclástico.

#### PIEDEMONTE

Este relieve es de origen exógeno acumulativo de edad Cuaternaria, con altitud de 2,700 a 2,500 m snm y está compuesto de lava, toba, ceniza y depósito epiclástico y piroclástico de flujo.

#### PLANICIE

Su relieve es de origen aluvial y lacustre, se encuentra entre el piedemonte y las montañas menores, las unidades están ligeramente inclinadas.

### **2.3.2. Cuenca del Río Balsas**

Al igual que la de México, la parte alta de la cuenca del Río Balsas (Río Atoyac) se enmarca dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano y ha estado sujeta a intensos procesos volcano-tectónicos (Vásquez, 1985). Parte de esta cuenca es conocida como Cuenca Puebla-Tlaxcala, sin embargo, a pesar de contar con diversos estudios, su delimitación no ha sido realizada, y lo existente en este sentido es poco claro.

El estudio de Ortega (1984) hace referencia a la Cuenca Puebla-Tlaxcala, donde indica sus límites: al oeste con las sierras Nevada y de Río Frío, al norte con la Sierra de Calpulalpan y al este con el Volcán La Malinche (*Figura No. 2.3*). Por lo que, de acuerdo con estos límites el área de estudio 2 queda incorporada en dicha cuenca. Asimismo señala que el agente endógeno dominante para el actual relieve de esa cuenca es el volcanismo y materiales más antiguos del Mioceno que corresponden con el volcán Tláloc.

Según Vázquez (1985) se presentan las siguientes unidades de relieve:

#### LADERA DE LAVA DE GRANDES CONOS COMPUESTOS

Este relieve abarca las laderas de tres grandes edificios volcánicos: Tlaloc, Telapón y el Iztaccíhuatl; constituye un alineamiento montañoso de orientación aproximada norte-sur: Sierra de Río Frío (Tlaloc-Telapón) - Sierra Nevada (Iztaccíhuatl-Popocatepetl). El patrón de avenamiento característico es el dendrítico. La roca se encuentra cubierta por material piroclástico con un espesor variable, principalmente cenizas, donde se desarrolla el suelo, encontrándose muchas veces paleosuelo sepultado por diversas capas de ceniza de diversos eventos volcánicos.

#### COLADAS DE LAVA RECIENTE

Unidad de relieve que incluye las coladas de lava de tres volcanes: el Hielotzochio, Táyotl y el Papayo. Su característica geomorfológica principal es que refleja la forma original de la colada de lava, donde la configuración topográfica no ha sido modificada significativamente por procesos exógenos. La red de avenamiento muestra un patrón dendrítico en las lavas del Táyotl y el Hielotzochio, por su lado, en las lavas del Papayo se presenta totalmente desarticulado, como corresponde a coladas de lava con pocos cauces.

#### PIEDEMONTES PIROCLÁSTICOS

Este relieve es el sector de transición entre la zona montañosa y la planicie lacustre-aluvial. La red de avenamiento presenta un patrón paralelo, este patrón es común en superficie de piedemonte pronunciada o donde existía control estructural.

#### MONTAÑAS BAJAS DEL BLOQUE TLAXCALA

Unidad que constituye el límite entre las cuencas de México y Puebla-Tlaxcala. Su límite con la ladera de lava de la Sierra de Río Frío se define por un cambio de pendiente cóncava. El bloque Tlaxcala se encuentra en una zona intensamente afectada por el tectonismo, principalmente de tipo distensivo, la cual favorece el vulcanismo, originando conos volcánicos y derrames de lava. El aspecto general de este bloque es de una meseta fuertemente disecada por barrancos con dirección norte - sur, donde los barrancos secundarios (afluentes laterales de los principales) han fragmentado el interfluvio en lomas o montañas bajas.

#### PLANICIE DE DEPÓSITOS LACUSTRES, ALUVIALES Y PIROCLÁSTICOS

Unidad cuyo origen y evolución consiste de una serie de eventos acumulativos principalmente. Su uniformidad en la cuenca sólo se interrumpe por algunas colinas aisladas catalogadas como "laderas de piroclastos". La planicie tiene una inclinación hacia el sureste, con una pendiente que va de poco menos de 2° en el sector de transición con el piedemonte a menos de medio grado en su parte más baja.

### **2.4. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL**

El territorio de estudio se localiza dentro de las Regiones Hidrológico Administrativas (RHA) XIII *Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala*, RHA VIII *Lerma-Santiago-Pacífico* y RHA IV *Pacífico Centro*. A su vez, las RHA se dividen

en diferentes regiones hidrológicas (RH), de las cuales se aprecia en el territorio de estudio la RH 26 Río Panuco, RH 18 Río Balsas y RH 12 Lerma-Santiago (Ver Figura No. 2.4).

La CNA, a su vez, divide las regiones hidrológicas en cuencas. En la Tabla No. 2.3 se aprecian las regiones hidrológicas y cuencas asociadas a las áreas de estudio.

Tabla No. 2.3. Regiones hidrológicas y cuencas en el territorio de estudio

REGIÓN HIDROLÓGICA ADMINISTRATIVA	REGIÓN HIDROLÓGICA	CUENCA	ÁREA DE ESTUDIO	OBSERVACIONES
XIII – Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	26 – Río Panuco	Río Moctezuma	N y SE área 1	Abarca la mayoría de ejidos del área
			NW área 2	Abarca los ejidos: BC San Juan Cuauhtemoc; Ignacio Manuel Altamirano
IV – Pacífico Centro	18 – Río Balsas	Río Grande de Amacuzac	SW área 1	Incluye parte al oeste del Ejido San Miguel Topilejo
		Río Atoyac	Área 2	Casi la totalidad del área
VIII – Lerma-Santiago-Pacífico	12 – Lerma-Santiago	Río Lerma-Toluca	W área 1	Incluye parte del Ejido Magdalena Petlascalco

#### 2.4.1. Corrientes superficiales

En el territorio de estudio se encuentra una gran cantidad de ríos perennes, intermitentes, a los que se le agregan manantiales y acueductos que conducen la mayor parte del agua para el abastecimiento de la Ciudad de México y localidades del Estado de Puebla. Los ríos principales del área de estudio 1 son El Magdalena y Eslava (Ver Figura No. 2.5).

Según Mendoza (1994), el río Magdalena nace en la estribación de los cerros de La Palma, San Miguel y Coconetta, a una elevación aproximada de 3,650 m snm, su curso sigue una dirección noreste, presenta un régimen perenne y es torrencial en época húmeda. Como fuentes de alimentación y afluentes de este río se tienen los manantiales de Cieneguillas, Los Cuervos, San Miguel, Tamascalco, San José, entre los principales, otros han sido captados para el abasto de poblaciones ligadas a la zona urbana-rural del Distrito Federal. Este cauce junto con el Eslava, San Angel, Hondo y Mixcoac forman el río Churubusco. Un factor importante a considerar y remediar, es que en buena parte de su recorrido, este río así como otros del área, sirve de colector de agua residual. Su caudal en la zona de Los Dinamos es destinado al turismo y otra parte es tratado para uso de la población, después se mezcla con agua servida y finalmente sale al Gran Canal.

El río Eslava nace en la Sierra de Las Cruces a 3,650 m snm, marca el límite entre la Delegación Tlalpan y la Jurisdicción Magdalena Contreras, es alimentado por los manantiales de Monte Alegre, Viborillas La Escondida, La Leona y Las Regaderas, entre otros.

En la Delegación Magdalena Contreras, en la parte alta de la montaña, algunos manantiales presentan agua todo el año, de los cuales ciertos son captados y entubados para el consumo de la Ciudad de México, como es el caso de Monte Alegre. Sin embargo, este manantial está sufriendo una creciente contaminación de tipo biológico a consecuencia del uso del suelo no reglamentado para turismo y ganadería, manifestado por contenido de NO<sub>3</sub> en el agua muestreada (Mendoza, 1994).

En la Sierra del Ajusco no existen corrientes fluviales que se puedan clasificar como río perenne, porque sólo en temporada de lluvia (de junio a agosto y lluvia tardía de otoño e invierno) adquieren carácter de torrente fluvial; estos ríos intermitentes corren de acuerdo con el relieve, en dirección de oeste a este y de sur a norte, escurriendo entre los cerros existentes (Oyameyo, Cantil, Xictle, Xicontli y Ajusco (Haro, 1986)).

Hacia la zona del volcán Pelado se encuentra otro lugar importante con torrentes fluviales, los cuales en su mayoría bajan de la cima hacia el norte y sur-oeste, sin embargo, existen otros torrentes más pequeños que se dirigen hacia el oeste.

En el área 2, los ríos provenientes de la Sierra Nevada escurren hacia el noreste y este, uniéndose con corrientes de la Sierra de Río Frío, las cuales fluyen hacia el este y sureste, formando el Río Atoyac, uno de los más importantes ríos del Estado de Puebla, con dirección de flujo hacia el sureste, entrando al Estado de Tlaxcala (*Ver Figura No. 2.5*).

Una nota de prensa del Tribunal Latinoamericano del Agua indica que existe una gran contaminación de origen industrial, agrícola y urbana en este río, generada principalmente por el “depósito de residuos, sustancias tóxicas y químicas de industrias, así como los efluentes de pequeñas lavanderías” situadas alrededor.

#### **2.4.2. Sistema Lacustre**

El sistema lacustre de la Cuenca de México era el más extenso entre diferentes regiones lacustres de origen volcánico ubicadas en la parte central de la República de México, sin embargo, actualmente, quedan pocos vestigios de este sistema.

La Cuenca de México comenzó a poblarse desde los años 6000 hasta 750 a.C aproximadamente, debido a que su misma configuración física permitía la existencia de abundante vida silvestre, elementos biológicos (de lagos y montañas circundantes), fertilidad de su suelo, entre otros (Rojas, 2004). Sin embargo, se encontraron restos humanos en la antigua isla de Tlapacoya que sugiere la ocupación de la cuenca hace más de 22,000 años (Lorenzo y Mirambel, 1986).

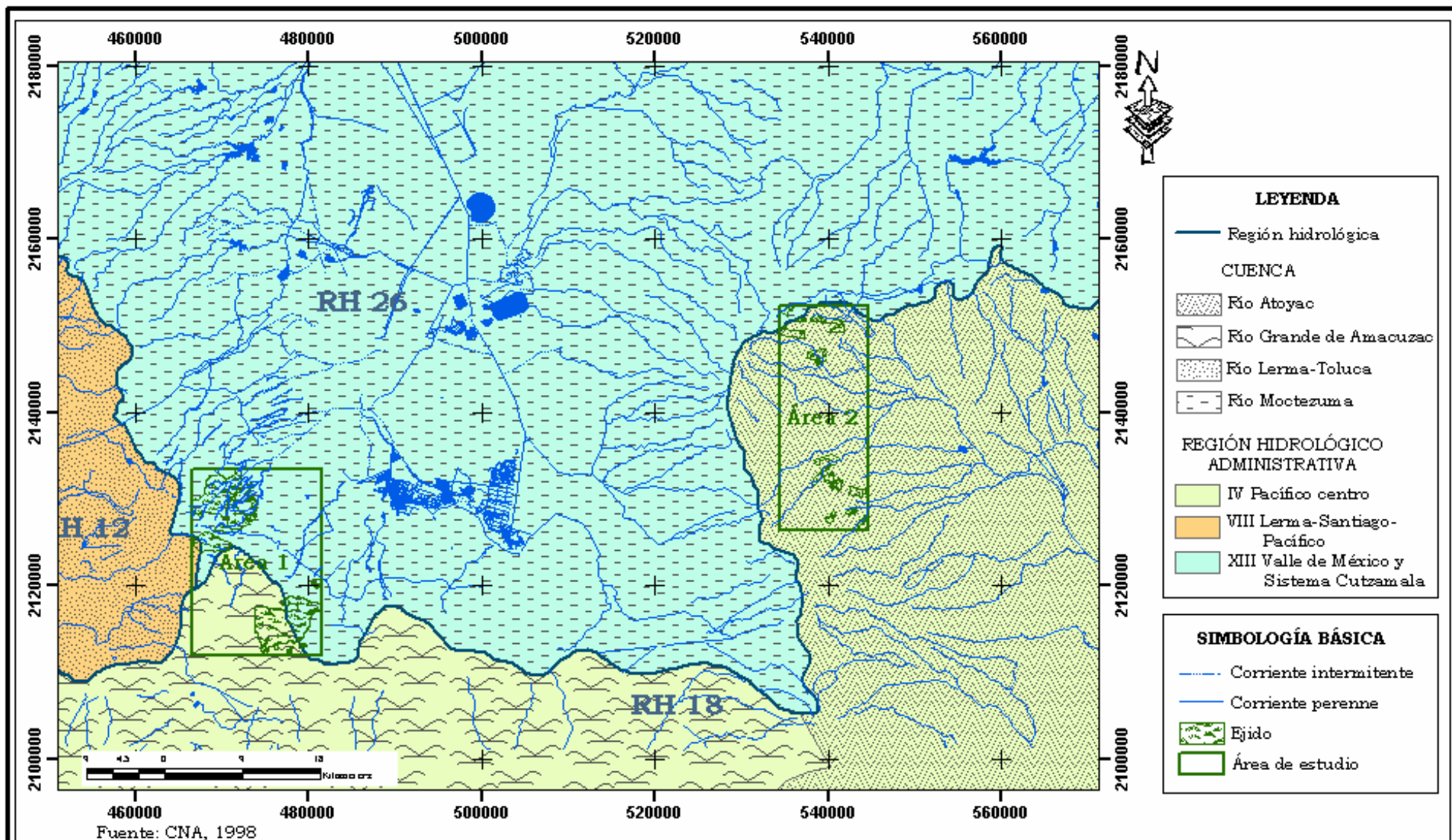


FIGURA No. 2.4. REGIONES HIDROLÓGICAS EN EL TERRITORIO DE ESTUDIO

**PROCESO DE RECARGA-DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS RECEPTORAS DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO, SIERRAS NEVADA Y LAS CRUCES - MÉXICO**

LILIANA ANDREA PEÑUELA ARÉVALO

2007



POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

TERRITORIO DE ESTUDIO





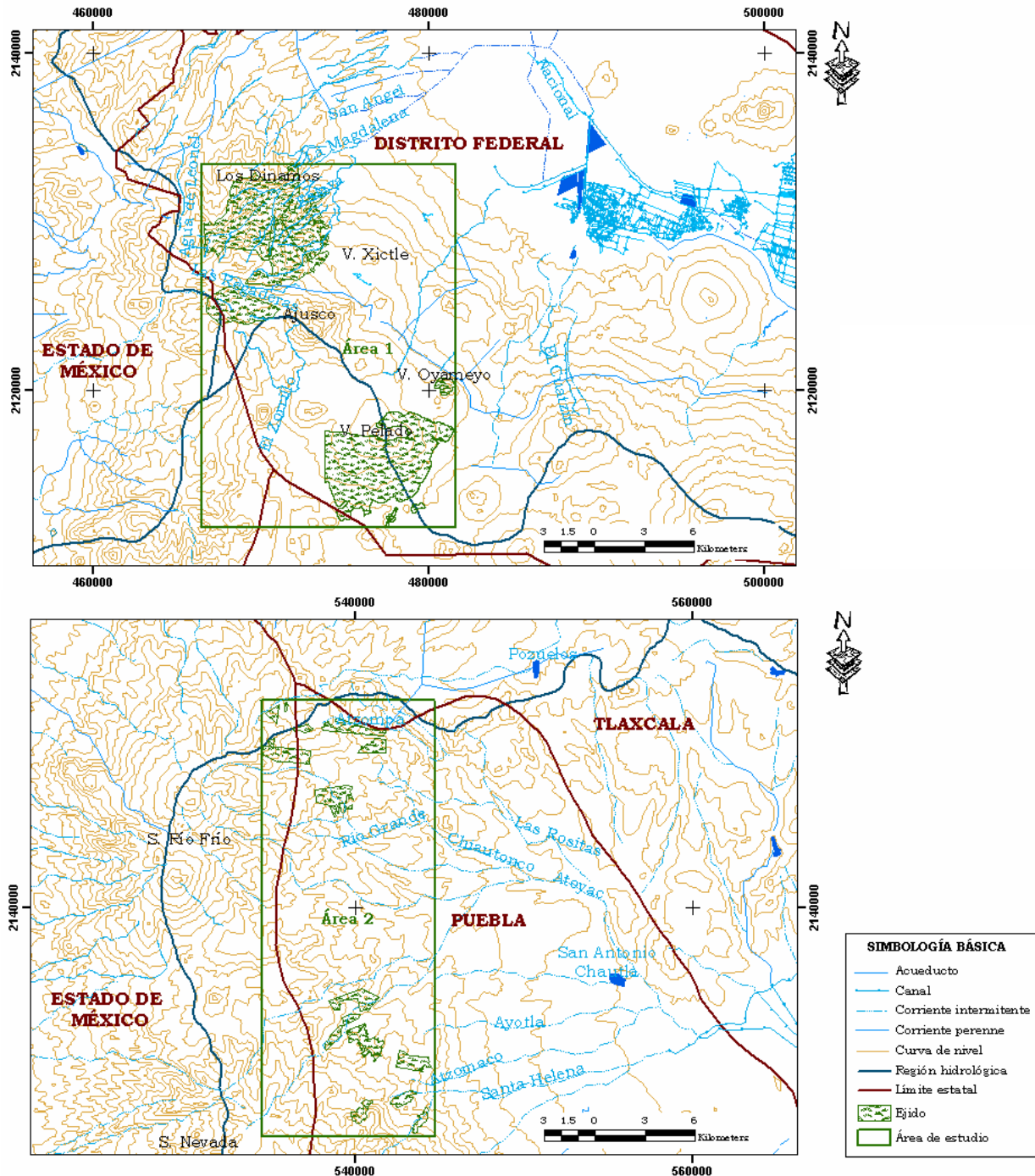
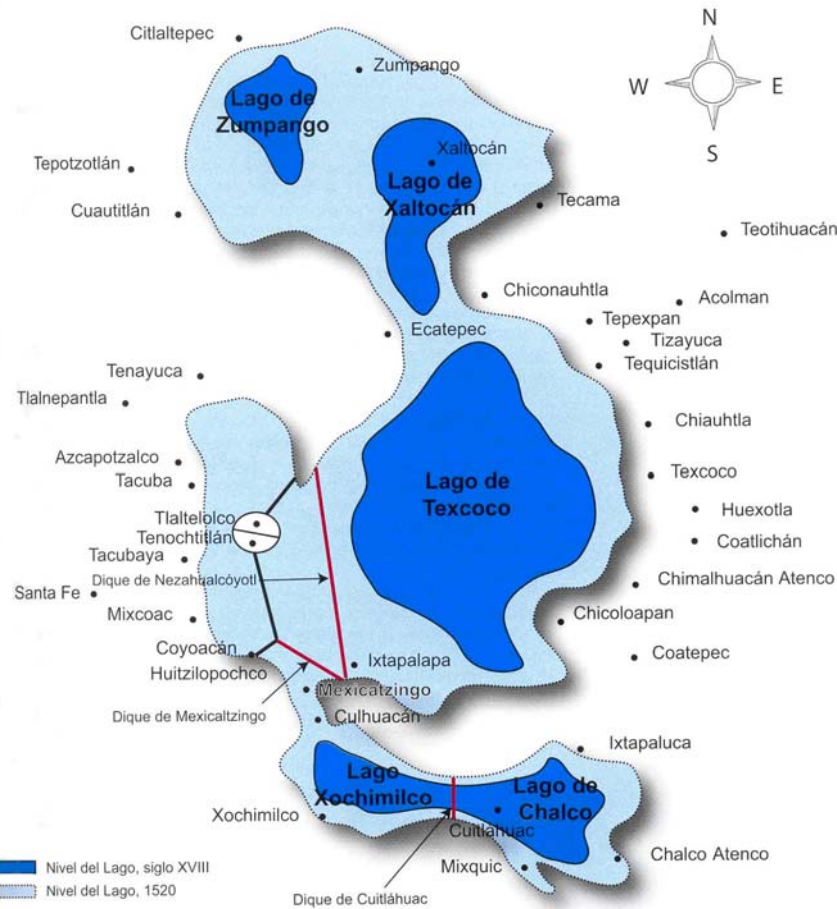


Figura No. 2.5. Principales corrientes superficiales de las áreas de estudio

En el Posclásico, antes de la invasión española, se crearon ciudades como Tenochtitlan y Tlatelolco en islotes en el medio del lago, el cual realmente era un sistema compuesto por varias subcuencas con cuerpos de agua somero y fondo relativamente plano, ocupando entre 800 y 1,000 km<sup>2</sup> de superficie, las subcuencas son, de norte a sur: Zumpango, Xalcotan, Tezcoco, México, Xochimilco y Chalco (Ver Figura No. 2.6).



Tomado de CONAGUA, 2005

Figura No. 2.6. Comparativo de los niveles de agua en el lago de la Cuenca de México

Las tres primeras subcuencas eran independientes y con calidad de agua salobre; sin embargo, los lagos de Zumpango y Xalcotan se alimentaban con agua de ríos perennes y temporales, así como de manantial, lo cual le daba al agua un carácter menos salado que el lago de Texcoco, el cual se considera que descargaba agua de flujos con carácter regional (Edmunds *et al*, 2002). El lago de México, ubicado en la parte occidental del lago, presentaba menos salinidad que los anteriores debido a que recibía agua dulce de manantial del sur (Sierra de Chichinautzin), de ríos del oeste (Sierra de Las Cruces). Este lago estaba separado del agua del Lago de Texcoco por la presencia del dique de Nezahualcóyotl, construido en 1449 bajo la dirección del gobernante de Texcoco, a quien debe su nombre, el cual según algunas fuentes se realizó para controlar la salinidad del lago (Rojas, 2004) y otras señalan que fue para controlar y evitar inundaciones (Carballal *et al*, 2004). Por último, los lagos de Xochimilco y Chalco se localizaban hacia el sur (Xochimilco al oeste y Chalco al este), se caracterizaban por su agua dulce y riqueza silvestre, se alimentaban de varios manantiales y ríos provenientes del deshielo de los volcanes nevados.

Con la obra de Nezahualcóyotl se puede argüir que así fue como se inició la formación de una compleja red hidráulica que tenía como fin evitar inundaciones

y efectos de la sequía en el sistema lacustre en general, construyéndose obras ingenieriles (calzadas, diques, acueductos, compuertas, canales, etc) que a su vez facilitaron el poblamiento, navegación y práctica de la agricultura chinampera pero que igualmente contribuyeron con la deforestación de las sierras, continuando con la generación de alteraciones y modificaciones en los ecosistemas y en el medio, especialmente durante los siglos XIV, XV y XVI (Armillas, 1971; Palerm, 1973; tomado de Rojas, 2004).

Adicionalmente, con la llegada de los españoles se introdujeron técnicas de agricultura y ganadería que se consideran depredaban con mayor intensidad suelo y cuerpos de agua, que las prácticas empleadas por los indígenas. Asimismo, fue práctica cotidiana que canales fueran rellenados para la construcción de calzadas generando obstrucciones en el avenamiento superficial de la cuenca, provocando múltiples inundaciones (1449, 1555, 1580, 1604, 1629, etc) (Gurria, 1978). A su vez, los españoles concebían los lagos como un peligro, donde el agua sin movimiento era perjudicial para la salud y después de construir su ciudad sobre la antigua Tenochtitlan y ser afectados por inundaciones inician el desagüe de la Cuenca de México (Aréchiga, 2004). Es así como desde el año 1550 se inician obras hidráulicas para el desagüe, alternando con las inundaciones en la ciudad hasta 1895 que se termina la obra de desagüe de la construcción del Gran Canal, que arrancaba desde la orilla occidental del lago de Texcoco y se unía al Túnel de Tequixquiac, que descargaba en el río de Tula de la vertiente del Golfo de México.

Después de 30 años de operación del Túnel de Tequixquiac, éste estaba a punto de derrumbarse, por lo que en 1946 se inaugura un segundo túnel, el cual se derrumba seis meses después de entrar en operación, por lo que entra nuevamente en servicio el primero (Tomado de Sandoval, 2000).

En la década de los 1950's el lago de Texcoco disminuyó su superficie casi desapareciendo por completo, el lago de Chalco se extinguió y del de Xochimilco sólo persisten sus canales debido a la importación del agua residual de nivel secundario. Este fenómeno acelerado de desecación fue atribuido al abrupto crecimiento de la población que llevó a la formación de nuevos asentamientos, que aprovecharon el desplazamiento de los cuerpos de agua. A su vez, para los 1950's los pozos para agua potable aumentaron su profundidad, alcanzando los 100 m; con el tiempo, cada vez se requería extraer agua a mayor profundidad, llegando hasta los 200 m. Al mismo tiempo, se atribuye la acelerada subsidencia de la ciudad a la extracción de agua subterránea por lo que se suspende la extracción de las unidades lacustres someras en y alrededor del centro histórico de la Ciudad de México en la década de los 1970's.

Es en 1975 que se inaugura el drenaje profundo como “solución final” para el problema de las inundaciones, este drenaje consiste en una red de cientos de kilómetros de túneles instalados a una profundidad que fluctúa entre los 22 y 217 m, con el fin de asegurar un lecho que no se inunde; a pesar de esto, las inundaciones y encharcamientos siguen hasta hoy día en la Ciudad de México y hay indicios que esta obra ha sido afectada por hundimientos (Aréchiga, 2004).

Para la década de los 1990's, el agua que abastece a la Cuenca de México proviene del sistema acuífero de la Ciudad de México, cubriendo un 70% del suministro. Sin embargo, el continuo crecimiento urbano y poblacional de la ciudad, con autoridades que sólo se preocupan por la oferta de agua, genera una mayor necesidad de infraestructura para el servicio de agua y drenaje. Sin embargo, la insuficiencia de obras se trata de enmascarar con una falsa teoría de falta de agua subterránea, lo que hace justificable para las autoridades el importar agua de fuentes externas (sistema Lerma y Cutzamala), generando así, mayores problemas y modificaciones en el entorno natural tanto en la Cuenca de México como en las zonas de donde se está suministrando a la ciudad, sin olvidar también el aumento de desechos, uso de fertilizantes que junto con la lluvia e infiltración permite la contaminación del agua subterránea; asimismo, se tiene la invasión de tierra cada vez más elevada, problemas de deforestación y cambio de uso de suelo, los cuales muchas veces corresponde con zonas de recarga del agua subterránea.

## **2.5. SUELO Y VEGETACIÓN**

### **2.5.1. Tipos de suelo**

El suelo es la resultante de la interacción continua entre sus factores formadores: material original, clima (incluyendo agua), relieve, factores bióticos y tiempo transcurrido. En función del factor o factores que prevalecen en su formación son las características edáficas que caracterizan a un suelo en particular, incorporando el movimiento vertical del agua subterránea ya sea hacia arriba o hacia abajo, lo que se puede apreciar en el grado de desarrollo del perfil (tipo, número y profundidad de horizontes), características morfológicas y analíticas, que definen la potencialidad y limitantes de uso del suelo.

Consecuentemente, su descripción y caracterización permite inferir su origen, las condiciones en las cuales se ha desarrollado y servir entonces como elemento diagnóstico de otras variables asociadas al mismo, tal como vegetación y agua.

Se considera entonces necesario definir los principales tipos de suelo que se han descrito en las áreas de estudio, con el fin de establecer asociaciones entre los diferentes elementos que conforman el paisaje: suelo, agua, vegetación, geomorfología, y litología.

Si bien, para el territorio de estudio sólo se dispone de cartografía edáfica a escala regional (escala 1:250,000 y 1:1'000,000, Mapa edafológico del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-INIFAP y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-CONABIO, 1995) esta resulta útil para los fines del presente trabajo a fin de dar lineamientos generales de análisis que se deben considerar al estudiar los sistemas de flujo de agua subterránea.

Según la clasificación de suelos FAO-UNESCO que utilizan los mapas mencionados anteriormente, se describen para la región 18 subgrupos de suelo pertenecientes a 6 grupos (*Tabla No. 2.4*). Su ubicación geográfica se presenta en la *Figura No. 2.7*.

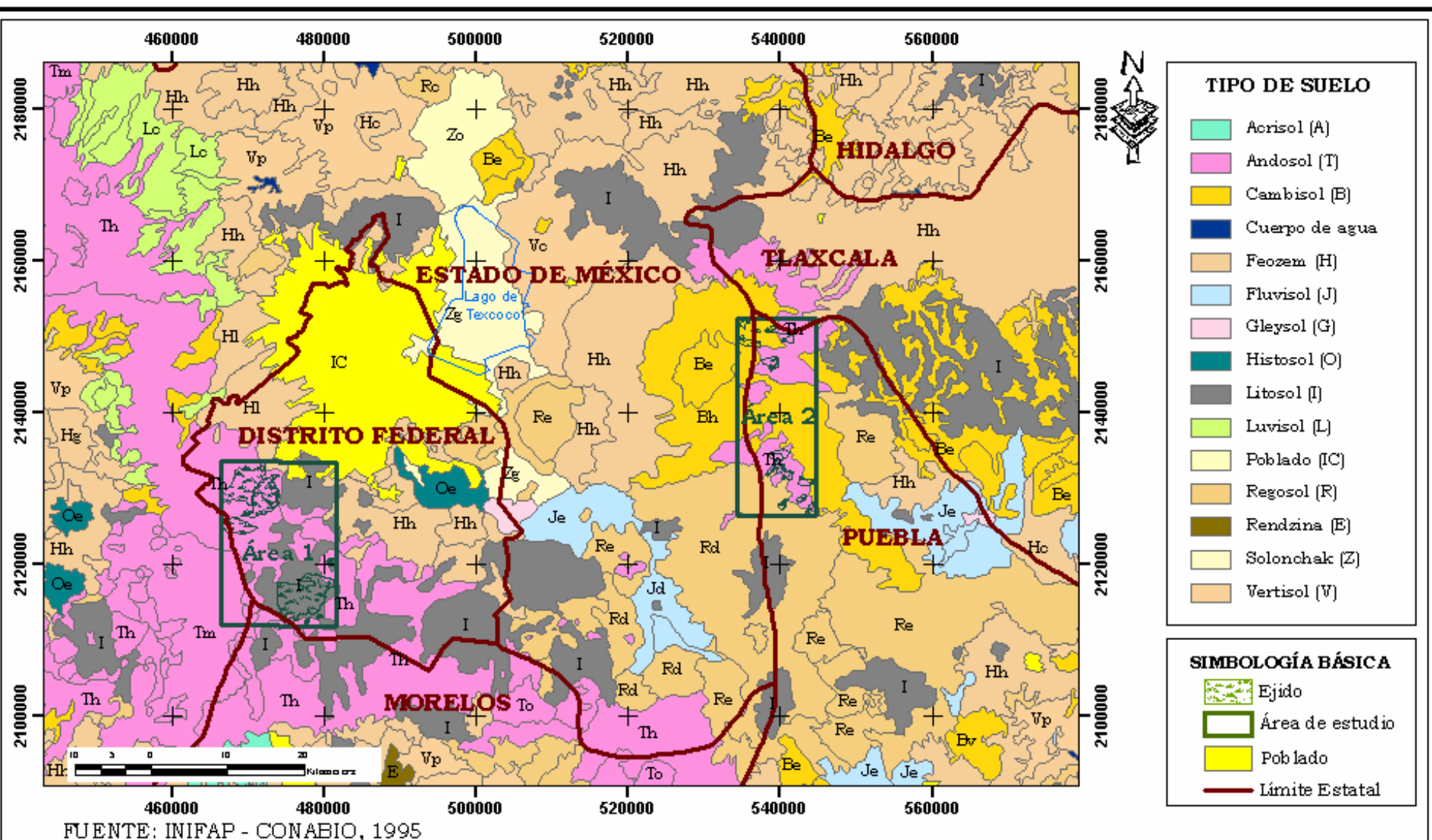


FIGURA No 2.7. TIPO DE SUELO EN EL TERRITORIO DE ESTUDIO

**PROCESO DE RECARGA-DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS RECEPTORAS DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO, SIERRAS NEVADA Y LAS CRUCES - MÉXICO**

LILIANA ANDREA PEÑUELA ARÉVALO

2007

TERRITORIO DE ESTUDIO



POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Tabla No. 2.4. Principales grupos y subgrupos de suelo presentes en el territorio de estudio

TERRITORIO DE ESTUDIO					
CLAVE	GRUPO	%	SUBGRUPO		%
H	Feozem	25.31	Hc	Feozem calcarico	0.71
			Hg	Feozem Gleyico	0.30
			Hh	<b>Feozem haplico</b>	<b>22.55</b>
			Hi	Feozem luvico	1.75
T	Andosol	18.22	Th	<b>Andosol humico</b>	<b>13.75</b>
			Tm	Andosol molico	3.66
			To	Andosol ocrico	0.81
R	Regosol	13.09	Rc	Regosol calcarico	0.30
			Rd	Regosol districo	4.73
			Re	<b>Regosol eutrico</b>	<b>8.06</b>
I	Litosol (Leptosol)	11.49	I	<b>Litosol</b>	11.49
B	Cambisol	9.27	Bc	Cambisol crómico	0.26
			Be	<b>Cambisol eutrico</b>	<b>5.22</b>
			Bh	Cambisol humico	3.42
			Bk	Cambisol cálcico (calcárico)	0.02
			Bv	Cambisol vertico	0.35
V	Vertisol	6.73	Vc	Vertisol cromico	1.92
			Vp	<b>Vertisol pelico</b>	<b>4.81</b>

A continuación se realiza una breve descripción de las principales características de los grupos de suelo más representativos del territorio de estudio:

#### FEOZEM

Este grupo de suelo abarca la mayor extensión del territorio de estudio, ubicándose principalmente hacia el norte y parte central, son suelos típicos de pastizal húmedo y bosque en clima templado a frío.

Este suelo se caracteriza por presentar un horizonte superficial oscuro y rico en humus, un horizonte A mólico delgado, en su mayoría sobre un horizonte cámbico o árgico. El horizonte mólico es un horizonte superficial, bien estructurado, oscuro, con alta saturación de bases (SB > 50%). El horizonte cámbico presenta una coloración rojiza/café por la neoformación de óxidos de hierro, textura fina asociada a la neoformación *in situ* de arcillas minerales cristalinas y una capacidad de intercambio catiónico (CIC) mayor de 16 cmol/kg. Por último, el horizonte árgico se desarrolla por la acumulación de arcillas por iluviación, se forma directamente bajo la capa arable, contiene arcilla y humus acumulados en manera de láminas gruesas y oscuras, presenta una saturación de sodio de <15%.

Los Feozem pueden o no presentar carbonatos secundarios, sin embargo, tienen una alta saturación de bases en el metro superior del suelo. La formación de estos suelos se debe, en la mayoría de los casos, al intemperismo de rocas ígneas extrusivas, las cuales son abundantes en la Cuenca de México.

El manejo y uso de un suelo Feozem está relacionado con la agricultura debido a que es un suelo poroso y fértil. Se considera que la erosión hídrica y eólica son serias amenazas para este grupo de suelos. Este suelo puede corresponder tanto a zonas de recarga como descarga, dependiendo de las características de cada subtipo, por ejemplo, el feozem gleyico puede estar asociado con una zona de descarga por sus propiedades gleyicas y en cambio, el feozem haplico es un suelo poco desarrollado que no presenta características determinantes que permitan relacionar este subgrupo de suelo con zonas de recarga/descarga, sin embargo, en el territorio de estudio, teniendo en cuenta su ubicación topográfica, parece estar más asociado a zona de recarga, por lo que es pertinente estudiar detalladamente las propiedades de los suelos en campo.

### ANDOSOL

Este suelo es el segundo más abundante del territorio, se presenta principalmente en la zona alta, cima de cerros y volcanes, hacia las sierras de Las Cruces y Chichinautzin, al suroeste de la Cuenca de México, y en menor proporción hacia las sierras de Río Frío y Nevada, al oeste de los estados de Puebla y Tlaxcala.

La característica principal de este grupo de suelos es que se deriva de la intemperización de material volcánico (principalmente cenizas) bajo casi cualquier tipo de clima (menos en condiciones hiper-áridas), igualmente, se pueden desarrollar sobre material rico en silicatos y clima húmedo. Presenta baja densidad aparente (menor de 0.85), tendencia a la acidez, alta capacidad de retención de agua y fijación de fósforo debido a la presencia de arcilla amorfa conocida como “alofana”.

Los Andosoles se encuentran sobre superficie húmeda ondulada a montañosa, en regiones árticas a tropicales asociadas con un gran número de tipos de vegetación, posiblemente asociados a zonas de recarga. Toscana (1998) señala, para el caso del Ajusco, que es un suelo asociado a vegetación de bosque de pino y encino en condición natural, susceptible a la erosión, por lo que recomienda su conservación con un uso forestal.

### REGOSOL

Este grupo de suelo se localiza hacia los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl; se caracteriza por ser poco desarrollado en material no consolidado, su formación generalmente depende de la litología subyacente, no presentan horizonte mólico, umbrico ni capas con diferencia clara. Realmente este tipo de suelo es un grupo taxonómico remanente que contiene todos los suelos que no se ajustaban a ninguna descripción de la clasificación de suelos. Los Regosoles son extensos en terrenos erosionados, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en superficies montañosas. Este tipo de suelo tiene poca importancia para la agricultura, muchas veces es usado para pastoreo y en regiones montañosas se considera que es un suelo delicado por lo que mejor no se le da uso productivo y se deja forestal. No obstante, considerando el tipo de roca presente en la Cuenca de México, de origen volcánico, alta porosidad y muchas veces fracturado, se podría asociar con zonas de recarga de agua subterránea.

### LEPTOSOL (anteriormente Litosoles)

En el territorio de estudio, este suelo se presenta en zonas con pendiente abrupta a moderada. Haro (1986) hace referencia de éstos y menciona que se encuentran principalmente en faldas de los volcanes Xitle, Xitontli, Oyameyo y Texoxocol, extendiéndose hacia el norte hasta la estación de ferrocarril del Ajusco. Asimismo, estos suelos se localizan al norte del Distrito Federal, en la Sierra de Guadalupe; hacia el este de la Cuenca de México, en las partes más altas de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl y en el Estado de Tlaxcala, en la Sierra de Calpulalpan, entre otras zonas.

Los leptosoles son suelos muy someros sobre roca dura o una capa cementada (espesor < 30 cm), extremadamente gravosos y/o pedregosos, comunes en regiones montañosas con topografía fuertemente disectada, en zonas con todo tipo de clima (muchos en regiones secas cálida o fría) y en particular se encuentran en áreas altamente erosionadas. La formación de este tipo de suelo es de origen residual, a partir de la intemperización de roca ígnea extrusiva del Terciario y Cuaternario, su espesor está condicionado con la pendiente, la cual puede facilitar su erosión, sin olvidar también que su poca profundidad hace que este suelo se pierda fácilmente. Se considera que el Leptosol tiene potencial para uso forestal y por sus características permite la infiltración de agua lluvia.

### CAMBISOL

Este grupo predomina hacia las sierras de Río Frío y Calpulalpan, son suelos jóvenes, poco desarrollados, característicos de zonas de transición climática. Es evidente la transformación del material parental por la formación de estructuras y principalmente por la decoloración, aumento de contenido de arcilla y/o remoción de carbonato.

Los Cambisoles se caracterizan por un intemperismo leve a moderado del material parental y por la ausencia de cantidad apreciable de arcilla iluviada, materia orgánica y componentes de aluminio y/o hierro. Este grupo de suelo se puede encontrar en una región seca y húmeda, siendo más común en el trópico y subtropical húmedo donde el intemperismo y la formación del suelo se realiza a tasas más elevadas que en regiones secas. Los cambisoles posiblemente están relacionados con zonas de recarga. Sin embargo, la cartografía temática de suelos de INIFAP-CONABIO (1995) lo presenta a su vez, en sitios que sugiere zonas de descarga de agua subterránea, por lo que sería recomendable verificar si las características físicas y químicas corresponden a los suelos de este grupo y subgrupos.

Generalmente estos suelos son usados intensivamente para la agricultura, dando buen resultado, aquellos Cambisoles con alta saturación de bases en zona templada están entre los suelos más productivos sobre la Tierra. Los Cambisoles más ácidos son usados para arado en granjas, pastoreo y bosques. Asimismo, los que se encuentran sobre una pendiente abrupta se conservan mejor con un uso forestal y aquellos localizados en una llanura aluvial con influencia de agua subterránea se consideran altamente productivos.



### VERTISOL

Los Vertisoles se localizan generalmente en zonas con menor pendiente de la Cuenca de México, principalmente en la parte central del norte del territorio de estudio; son de origen aluvial y residual, formados a partir de rocas sedimentarias clásticas e ígneas extrusivas, presentan más de 30% de arcilla desde superficie con una alta proporción del tipo expansivo especialmente, montmorillonita.

Este grupo de suelo se encuentra en depresiones y áreas planas a ondulantes, principalmente en clima tropical, subtropical, semiárido a subhúmedo y húmedo con alternancia de estación húmeda y seca, generando grietas profundas en época seca, “slickensides” y estructuras en forma de cuña. Es un suelo difícil de asociar con zonas de descarga.

La vegetación asociada es de sabana, pastizal natural y/o selva; tienen baja susceptibilidad a la erosión y se consideran potenciales para la agricultura, especialmente para el cultivo de sorgo, arroz, girasol, soja, algodón, sin embargo, ocasiona problemas por sus características físicas y el difícil manejo con el agua por la presencia de arcilla montmorillonita.

OTROS GRUPOS presentes en menor proporción en el territorio de estudio son los Solonchak, Fluvisol, Luvisol, Histosol, Acrisol, Gleysol y Rendzina.

De estos, los grupos Solonchak, Fluvisol Histosol y Gleysol, son los que *a priori* se asociarían con *zonas de descarga de agua subterránea* debido a que exhiben rasgos hidromórficos tales como: moteado y concreciones de Fe-Mn; colores gley (gris verdoso); horizontes diagnóstico albico (horizonte E, formado por eluviación de materia orgánica u óxidos de hierro, por lo que presenta bajo contenido de materia orgánica y arcillas); elevado contenido de sales y/o sodio en superficie (horizonte diagnóstico sálico, nátrico, respectivamente, y otras propiedades asociadas); aspectos que sugieren un nivel freático somero (parámetro importante asociado con zonas de descarga según la Teoría de Tóth, 2000). Asimismo, la acumulación elevada de materia orgánica en superficie (horizonte diagnóstico hístico, saturado de agua) o depósitos de origen fluvial, indica que existe aporte continuo de agua. Se observa que estos suelos se encuentran localizados hacia el centro del territorio de estudio, en la planicie de la Cuenca de México, correspondiendo nuevamente con la teoría de los sistemas de flujo que las zonas de descarga se ubican en zonas topográficamente bajas.

En la *Tabla No. 2.5* se muestran los grupos y subgrupos de suelos que se presentan en las áreas de estudio, sin embargo, tal como se indicó, la escala de trabajo (1:250,000) resulta de escaso detalle (mapa de reconocimiento).

En el área de estudio 1 (Ajusco-Volcán Pelado) predominan los Andosoles en un 60% de la superficie, sin embargo, observando específicamente los ejidos receptores de pago por servicio ambiental de esta área, se tiene que hacia el Ajusco y los Dinamos prevalece el subgrupo Andosol húmico, el cual se diferencia de los demás del grupo por su mayor contenido de materia orgánica. Por su parte, en los ejidos cercanos al Volcán Pelado, se presenta el grupo de suelo Leptosol (antes Litosol), segundo en extensión en el área de estudio 1 (*Ver Figura No. 2.7*).

Tabla No. 2.5. Grupos de suelo presentes en las áreas de estudio

ÁREAS DE ESTUDIO							
	CLAVE	GRUPO	%	SUBGRUPO	%	ZONA	
ÁREA 1	T	Andosol	58.80	Th <b>Andosol humico</b>	44.00	Recarga	
				Tm Andosol molico	14.80	Recarga	
	I	Litosol (Leptosol)	35.70	I <b>Litosol</b>	35.70	Recarga	
	H	Feozem	2.81	Hh <b>Feozem haplico</b>	1.82	Recarga?	
				HI Feozem luvico	0.99	Descarga	
	IC	Cuerpo de agua y poblados	2.69	IC Cuerpo de agua y poblados	2.69	-	
ÁREA 2	B	Cambisol	45.79	Bh <b>Cambisol humico</b>	44.42	Recarga	
				Be Cambisol eutrico	1.37	Recarga	
	T	Andosol	38.81	Th <b>Andosol humico</b>	38.81	Recarga	
	R	Regosol	15.14	Rd Regosol districo	15.14	Recarga	
	H	Feozem	0.25	Hh Feozem haplico	0.25	Recarga?	

En el área de estudio 2 (Río Frio-Cerro La Trampa), a pesar que el grupo de suelo Cambisol es el que ocupa mayor superficie, la mayoría de los ejidos beneficiados por el PSAH se ubican sobre suelos del subgrupo Andosol húmico, al igual que en la zona 1 del Ajusco y Los Dinamos.

Las características de los suelos de las áreas de estudio sugieren que éstas son posibles zonas de recarga natural de agua subterránea (Ver Tabla No. 2.5), igualmente, su posición topográfica corrobora esta posibilidad, según las zonas potenciales de recarga al agua subterránea por topografía definidas por Ángeles-Serrano (en proceso) para la región central de México (Ver Figura No. 2.8).

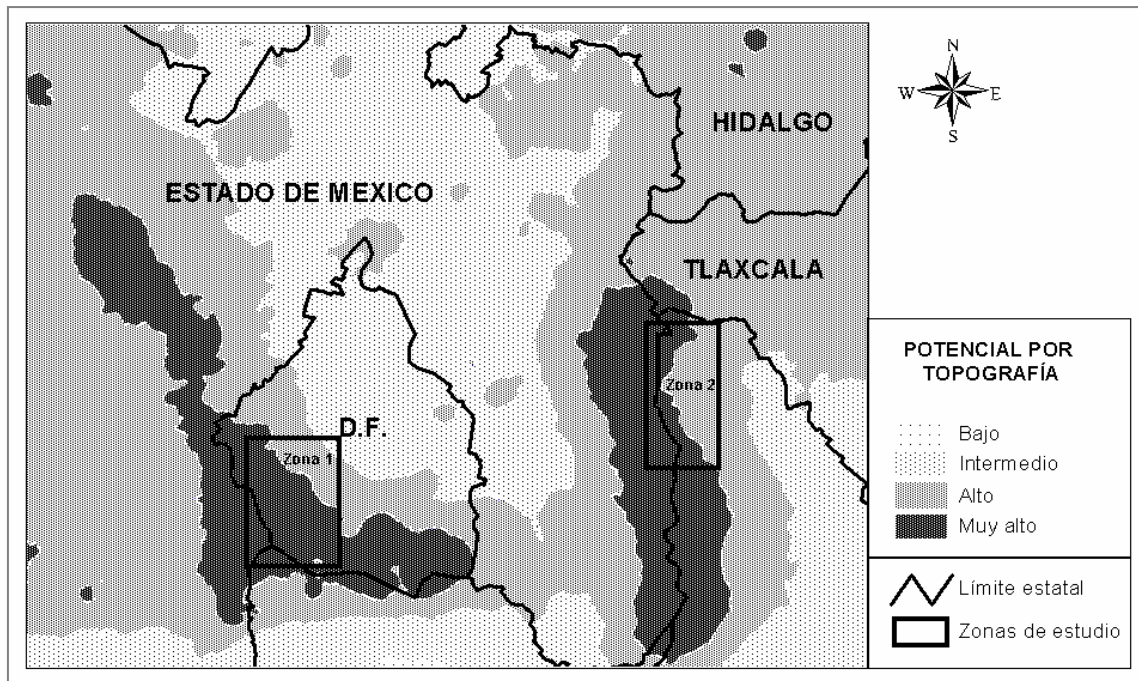


Figura No. 2.8. Zonas potenciales de recarga al agua subterránea por topografía (Región central de México, información tomada de Ángeles-Serrano, en proceso)

El análisis de suelo en el presente estudio, se realizó con base en información existente en la literatura, no se efectuó trabajo de campo específico para este tema, por lo que cabe destacar la relevancia de investigaciones al respecto. Así, la relación suelo-zona de recarga/descarga requiere de un análisis de mayor detalle del tipo de suelo, que adicionalmente incorpore la mayor cantidad de parámetros involucrados en la dinámica del agua, con el fin de establecer la asociación suelo-agua-vegetación-paisaje.

### **2.5.2. Uso de suelo y vegetación**

El cambio en el uso del suelo modifica el comportamiento del agua tanto en las zonas de recarga como en las de tránsito, y descarga. El sitio que ocupe en el paisaje será el principal factor a considerar, ya que permitirá establecer su incidencia en los sistemas de flujo de agua subterránea y su manifestación superficial. Así, por ejemplo, el efecto de un bosque será muy diferente al de una pradera, y de igual manera, cada una de estas actividades productivas tendrá diferente efecto en función del sitio donde se implante y el tipo de especie vegetal involucrada, entre otras variables.

La Cuenca de México ha sufrido modificaciones en el suelo desde tiempos prehispánicos, principalmente con la desecación del lago, seguida del continuo crecimiento demográfico de la ciudad y la acelerada industrialización, que han ocasionado la desaparición de numerosos manantiales al sur de la cuenca. Hasta el momento no se ha realizado ninguna acción que retrase o evite el aumento de estas actividades que generan un cambio de uso del suelo, por lo que se estima que los impactos seguirán ocurriendo, lo que conducirá a un mayor desequilibrio tanto hidrológico como ecológico, problemas que posiblemente serán irreversibles.

Según el Inventario Forestal Nacional (IFN) del 2000, existen dos principales usos de suelo en el territorio de estudio (*Ver Figura No. 2.9*):

El mayor uso es la agricultura de temporal con cultivo anual, semiperenne y perenne, y en menor medida agricultura con riego. Estas actividades productivas se localizan preferentemente en partes planas hacia el centro del territorio de estudio.

En segundo lugar, se destaca el bosque en las zonas de alta montaña, especialmente bosque de pino, oyamel, encino, pino-encino, asociados en muchas ocasiones con vegetación secundaria arbustiva y herbácea; cabe resaltar que la cartografía del Inventario Forestal Nacional (IFN, 2000) incluye el bosque de encino-pino dentro del de pino-encino.

En la *Tabla No. 2.6* se señalan las especies más importantes localizadas en las áreas de estudio y alrededores, según Solana (1992), Mendoza (1994), Sánchez-González y López-Mata (2003), Jujnovski (2006).

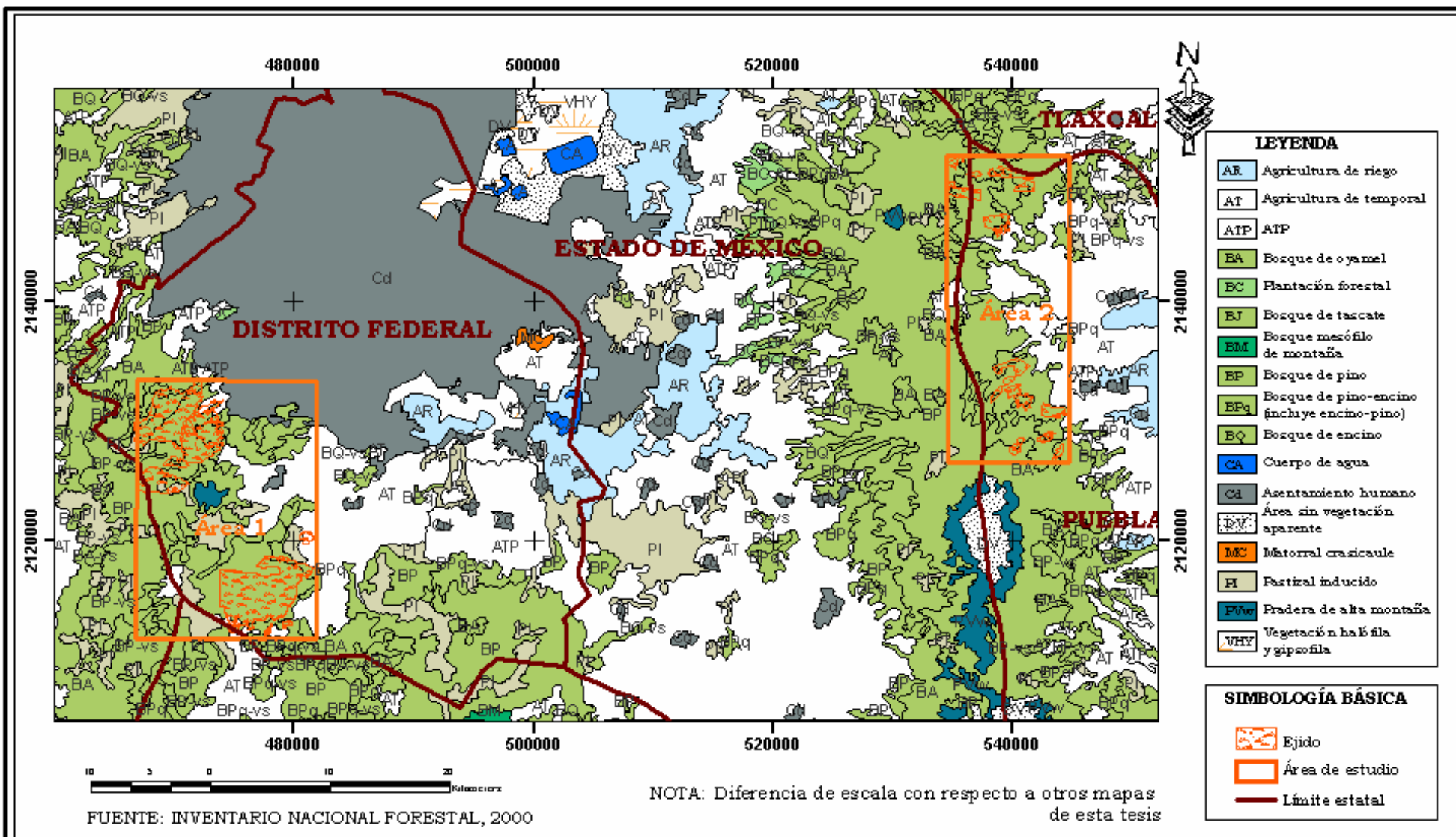


FIGURA No. 2.9. USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN EN EL TERRITORIO DE ESTUDIO

**PROCESO DE RECARGA-DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS RECEPTORAS DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO, SIERRAS NEVADA Y LAS CRUCES - MÉXICO**

LILIANA ANDREA PEÑUELA ARÉVALO

2007



POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

TERRITORIO DE ESTUDIO



Tabla No. 2.6. Vegetación y especies importantes en las áreas de estudio y alrededores

REGIÓN	TIPO	ESTRATO	NOMBRE
SIERRA NEVADA	Bosque de encino	arbóreo	<i>Quercus rugosa</i> , <i>Quercus laurina</i> , <i>Arbutus xalapensis</i> y <i>Ceanothus coeruleus</i>
		arbustivo	<i>Amelanchier denticulada</i> , <i>Baccharis conferta</i> , <i>Buddleia parviflora</i> , <i>Eupatorium glabratum</i> , <i>E. rhomboideum</i> , <i>Furcraea parmentierii</i> , <i>Ribes ciliatum</i> , <i>Salvia microphylla</i> , <i>Stevia salicifolia</i> , <i>Symphoricarpos microphyllus</i> y <i>Verbesina oncophora</i>
		herbáceo	<i>Alchemilla procumbens</i> , <i>Archibaccharis serratifolia</i> , <i>Asplenium monanthes</i> , <i>Brachypodium mexicanum</i> , <i>Castilleja tenuiflora</i> , <i>Festuca rosei</i> , <i>Galium aschenbornii</i> , <i>Gnaphalium chartaceum</i> , <i>Muhlenbergia macroura</i> , <i>Sedum moranense</i> , <i>Stipa ichu</i> y <i>Trisetum virletii</i>
	Bosque de oyamel	arbóreo	<i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus acuminata</i> , <i>Berberis moranensis</i> , <i>Pinus hartwegii</i> , <i>P. montezumae</i> , <i>Salix paradoxa</i> y <i>S. lasyolepis</i>
		arbustivo	<i>Acaena elongata</i> , <i>Buddleia parviflora</i> , <i>Comarostaphylis discolor</i> , <i>Fuchsia microphylla</i> , <i>F. thymifolia</i> , <i>Ribes ciliatum</i> , <i>Salvia fulgens</i> , <i>S. gesnerifolia</i> , <i>Senecio barba-johannis</i> , <i>S. angulifolius</i> , <i>S. cinerarioides</i> y <i>Symphoricarpos microphyllus</i>
		herbáceo	<i>Alchemilla procumbens</i> , <i>Archibaccharis hieracioides</i> , <i>Brachypodium mexicanum</i> , <i>Didymaea alsinoides</i> , <i>Erigeron galeottii</i> , <i>Eupatorium pazcuarense</i> , <i>Festuca amplissima</i> , <i>Galium aschenbornii</i> , <i>Senecio callosus</i> , <i>S. platanifolius</i> , <i>S. toluccanus</i> , <i>Stellaria cuspidata</i> y <i>Stevia monardifolia</i>
	Bosque pino - encino	arbóreo	<i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus laurina</i> y <i>Cupressus lusitanica</i>
		arbustivo	<i>Acaena elongata</i> , <i>Baccharis conferta</i> , <i>Buddleia parviflora</i> , <i>Eupatorium pichinchense</i> , <i>E. rhomboideum</i> , <i>Fuchsia thymifolia</i> , <i>Lonicera pilosa</i> , <i>Monnina ciliolata</i> , <i>Ribes ciliatum</i> , <i>Rubus pringlei</i> , <i>Salvia fulgens</i> , <i>Senecio barba-johannis</i> , <i>S. angulifolius</i> , <i>S. cinerarioides</i> , <i>Symphoricarpos microphyllus</i> y <i>Verbesina oncophora</i>
		herbáceo	<i>Alchemilla procumbens</i> , <i>Archibaccharis hieracioides</i> , <i>Chaptalia filaginoides</i> , <i>Didymaea alsinoides</i> , <i>Erigeron galeottii</i> , <i>Eupatorium pazcuarense</i> , <i>Festuca amplissima</i> , <i>Geranium seemannii</i> , <i>Muhlenbergia macroura</i> , <i>Relbunium hypocarpium</i> , <i>Salvia elegans</i> , <i>S. microphylla</i> , <i>Sibthorpia repens</i> , <i>Stellaria cuspidata</i> , <i>Stevia monardifolia</i> y <i>Trisetum virletii</i>
	Bosque de pino	arbóreo	<i>Pinus hartwegii</i>
		arbustivo	<i>Acaena elongata</i> , c <i>Senecio angulifolius</i> y <i>S. cinerarioides</i>
		herbáceo	<i>Alchemilla procumbens</i> , <i>Calamagrostis toluccensis</i> , <i>Cerastium nutans</i> , <i>Cinna poiformis</i> , <i>Lithospermum distichum</i> , <i>Lupinus montanus</i> , <i>Penstemon gentianoides</i> y <i>Oxalis alpina</i>

REGIÓN	TIPO	NOMBRE
AJUSCO	Bosque de pino	<i>Muhlenbergia quadridentata, Pinus hartwegii, Festuca tolucensis, Pinus teocote, Pinus montezumae, pinus ayacahuite, Cinna poiformis, Oxalis jaquiniana</i>
	Bosque de oyamel	<i>Acaena elongata, Abies religiosa, Senecio angulifolius, Senecio cinerarioides, Fuchsia microphylla, Symphoricarpos microphyllus, Senecio barba-johannis, Didymaea mexicana</i>
	Bosque pino - encino	<i>Abies religiosa, Quercus laurina, Quercus rugosa, Pinus patula, Cupressus lusitanica, Baccharis conferta, Didymaea mexicana, Muhlenbergia macroura, Muhlenbergia</i>
	Bosque de encino	<i>Quercus mexicana, Quercus rugosa, Baccharis conferta, Muhlenbergia macroura, Muhlenbergia</i>

Los asentamientos humanos muestran una extensión importante en el territorio del presente estudio, que se inician en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En menor proporción se encuentran pastizales inducidos, área sin vegetación aparente, pradera de alta montaña, vegetación halófila y gipsófila, cuerpos de agua y matorral crasicaule.

Específicamente en las áreas de estudio predomina el bosque de pino, oyamel (incluye Ayarin y Cedro) y pino-encino (incluye encino-pino) considerando que uno de sus criterios de elegibilidad correspondía con que el porcentaje de cobertura forestal fuera igual o mayor al 80% como se mencionó anteriormente. Sin embargo, el área de estudio 1 muestra agricultura de temporal con cultivo anual (ejido San Miguel Topilejo, hacia el Ajusco), pastizal inducido (ejido Magdalena Petlacalco), agricultura de temporal con cultivo permanente y semipermanente (ejido San Nicolas Totolapan). Se recalca que estas actividades deben ser controladas para evitar el posterior deterioro del área y efectos colaterales que conlleva. Se observó que no existe una relación específica de suelo con vegetación, puesto que los diferentes tipos de bosque están asociados con diversos suelos, así como diferente litología.

#### CAMBIO EN LA COBERTURA BOSCOSEA

En el presente estudio se realizó una evaluación del cambio de la cubierta boscosa para el territorio de estudio, a través de un análisis multitemporal de dos coberturas (INEGI, 1976; IFN, 2000) a escala 1:250,000, utilizando el programa ArcGIS. Si bien el análisis efectuado corresponde a un período anterior al de la implementación del PSAH se consideró pertinente realizar esta evaluación teniendo en cuenta el impacto que se viene generando desde tiempo atrás sobre el bosque, con el objetivo final de crear conciencia sobre la importancia de instaurar y fomentar algún tipo de estrategia (puede ser el PSAH u otro tipo pero que demuestren resultados positivos) que permita la conservación y recuperación del entorno natural para finalmente obtener un buen funcionamiento y equilibrio del sistema.

La *Figura No. 2.10* presenta la distribución espacial de los bosques para los dos años seleccionados (1976 y 2000). El análisis consistió en una comparación de

superficie ocupada (en porcentaje) por bosque primario y con vegetación secundaria en el territorio de estudio (Ver Tabla No. 2.7) y con respecto a la superficie misma ocupada por bosque (Ver Tabla No. 2.8), tomando como base la superficie de bosque de 1976, para finalmente visualizar el cambio ocurrido en la cobertura boscosa en el lapso de tiempo establecido. Los resultados porcentuales finales de la comparación de cubierta de bosque para los años 1976 y 2000 se señalan en la Tabla No. 2.9. Bosque primario hace referencia a aquel que no ha sufrido modificación desde su origen y bosque secundario cuando se origina en forma espontánea luego de una actividad antrópica.

Como resultado se aprecia que el bosque primario fue el más afectado en el período estudiado, debido a que presentó una disminución del 4.7% en la totalidad del territorio de estudio y del 12.2% respecto a la cobertura boscosa. Por el contrario, el bosque con vegetación secundaria mostró un aumento del 1.8% en el territorio de estudio y del 4.8% con respecto a la superficie de bosque de 1976.

Considerando la suma del bosque primario con aquel con vegetación secundaria como bosque total, se obtiene una disminución del 2.9% en el territorio y del 7.4% respecto a los bosques.

Tabla No. 2.7. Comparación de cobertura boscosa entre 1976 y 2000 con respecto al territorio de estudio

	SUPERFICIE (Ha)		SUPERFICIE respecto territorio (%)		DIFERENCIA (%)
	1976	2000	1976	2000	
<b>TERRITORIO DE ESTUDIO</b>	518624.512		100		
<b>BOSQUE TOTAL</b>	201286.015	186328.531	38.81	35.93	-2.88
<b>Bosque primario</b>	181078.741	156499.780	34.92	30.18	-4.74
<b>Bosque con veg secundaria</b>	20207.274	29828.751	3.90	5.75	1.86

Tabla No. 2.8. Comparación de cobertura boscosa entre 1976 y 2000 con respecto a la superficie de bosque en sí, tomando como referencia la superficie de bosque de 1976.

	SUPERFICIE respecto bosque (%)		BOSQUE (%)
	1976	2000	
<b>BOSQUE TOTAL</b>	100	92.57	-7.43
<b>Bosque primario</b>	89.96	77.75	-12.21
<b>Bosque con veg secundaria</b>	10.04	14.82	4.78

Tabla No. 2.9. Comparación de cobertura boscosa entre 1976 y 2000, a) con respecto al territorio de estudio y b) con respecto a la cobertura de bosque en sí.

	a) TERRITORIO (%)	b) BOSQUE (%)
<b>BOSQUE TOTAL</b>	-2.88	-7.43
<b>Bosque primario</b>	-4.74	-12.21
<b>Bosque con vegetación secundaria</b>	1.86	4.78

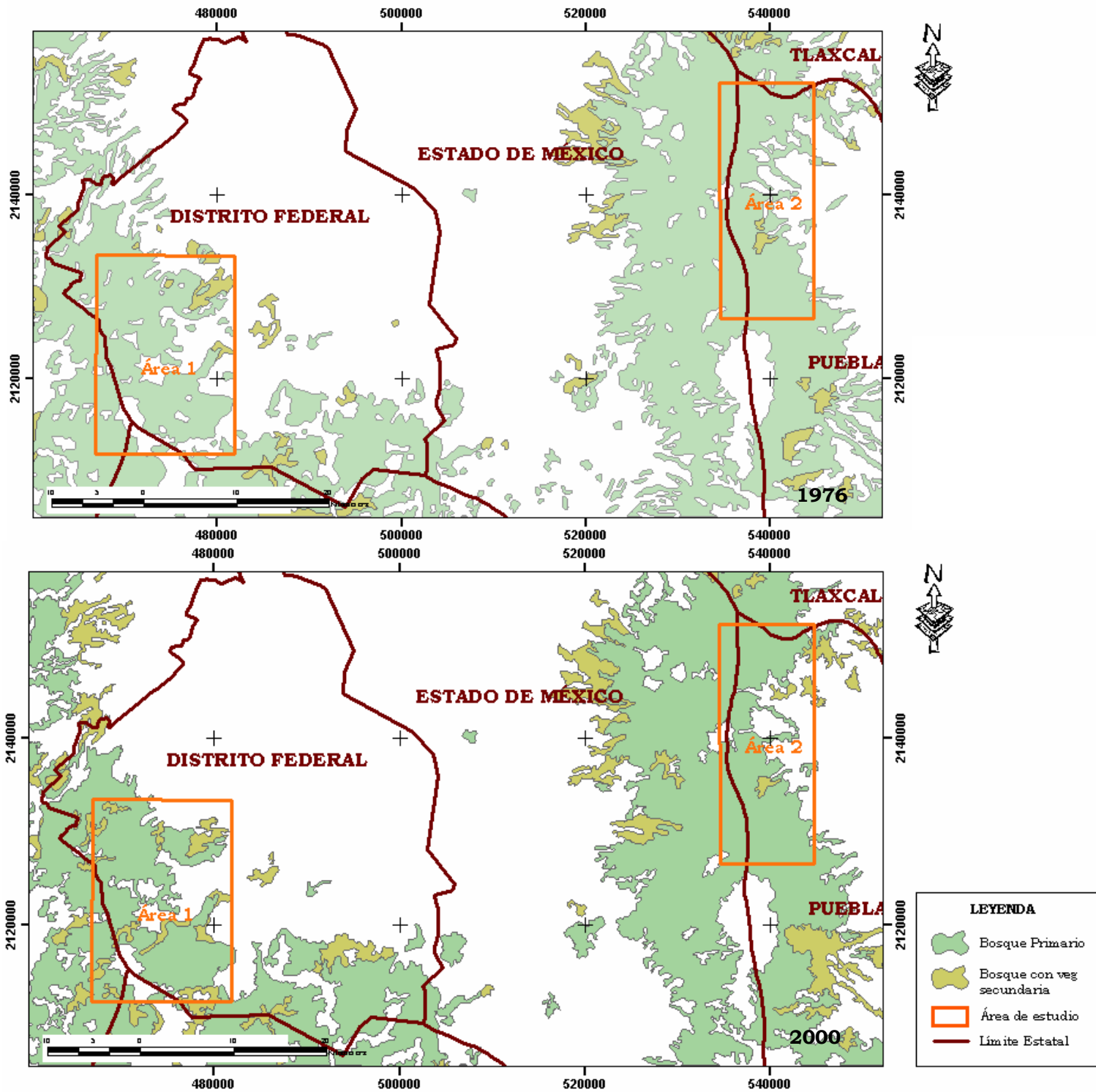


Figura No. 2.10. Comparación de la cobertura boscosa para los años 1976 y 2000.

Los anteriores resultados indican una invasión del bosque con vegetación secundaria al primario, por ende causando su disminución. En términos ambientales esta disminución de bosque primario es de gran importancia debido a que sus efectos repercuten en el buen funcionamiento del sistema, por lo que



su valoración debe ser estimada por separado, teniendo en cuenta que, en este caso por ejemplo, si se manejan los datos como bosque total se generarían interpretaciones erróneas puesto que mostraría una menor disminución a la que se está presentando realmente en el bosque primario.

Esto se indica debido a que existen diferentes metodologías de valoración de superficie boscosa que llevan a confusiones, en el caso del territorio nacional, investigadores y ambientalistas señalan una notable reducción de superficies boscosas en el país, por el contrario, el Gobierno Federal indica su aumento. De esta manera, se aprecia que el manejo de la información debe ser minucioso y la representación de datos es de suma importancia, donde debe ser descrita lo más detallado posible, de manera que los demás comprendan su significado. En términos estrictos debería existir un método establecido para comparación, en tiempo y espacio, de coberturas temáticas, para con base en esto realizar los análisis necesarios y una mejor gestión ambiental.

### CAMBIO EN LA COBERTURA URBANA

Otro aspecto que influye drásticamente en la dinámica de la naturaleza es el crecimiento demográfico, el cual crea un cambio en el uso del suelo afectando zonas de recarga y descarga de agua subterránea. Asimismo, genera una mayor presión al suelo por el peso de las estructuras, produce subsidencia del suelo y origina la migración o desaparición de especies animales y vegetales por pérdida o alteración de su hábitat.

La Ciudad de México es una de las ciudades más grandes del mundo, esto se debe al desplazamiento de la población del país a los alrededores de la ciudad original y al acelerado ofrecimiento de vivienda, lo cual propicia la creación de nuevas zonas urbanas alrededor de dicha ciudad, la cual es conocida como Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)<sup>1</sup>. No obstante, el crecimiento no sólo afecta el sitio directamente construido sino también se alteran sitios y territorio cercano a la ciudad debido al incremento de necesidades básicas y consumo de la población. Así, se hace necesario importar a la ciudad elementos de otras regiones, lo que parece legitimar lo que sucede con el suministro de agua potable, que es tomada de diversas cuencas hidrográficas vecinas.

Al igual que para el cambio en densidad boscosa descrita anteriormente, se realizó una comparación del área urbana entre los años 1976 y 2000 (*Ver Figura No. 2.11*), la cual permitió apreciar el gran crecimiento que ha tenido la Ciudad de México durante este lapso y su expansión hacia una superficie cada vez más alta, afectando así las pocas áreas verdes y montañosas que delimitan la Cuenca de México. Es el caso del área 1, en cercanías del Ajusco y Los Dinamos, que por su ubicación geográfica y proximidad a la urbe, sus ejidos se encuentran cada vez más amenazados por la creciente urbanización.

---

<sup>1</sup> INEGI define la ZMCM como la zona conformada por las 16 delegaciones del DF y 35 municipios del Estado de México.

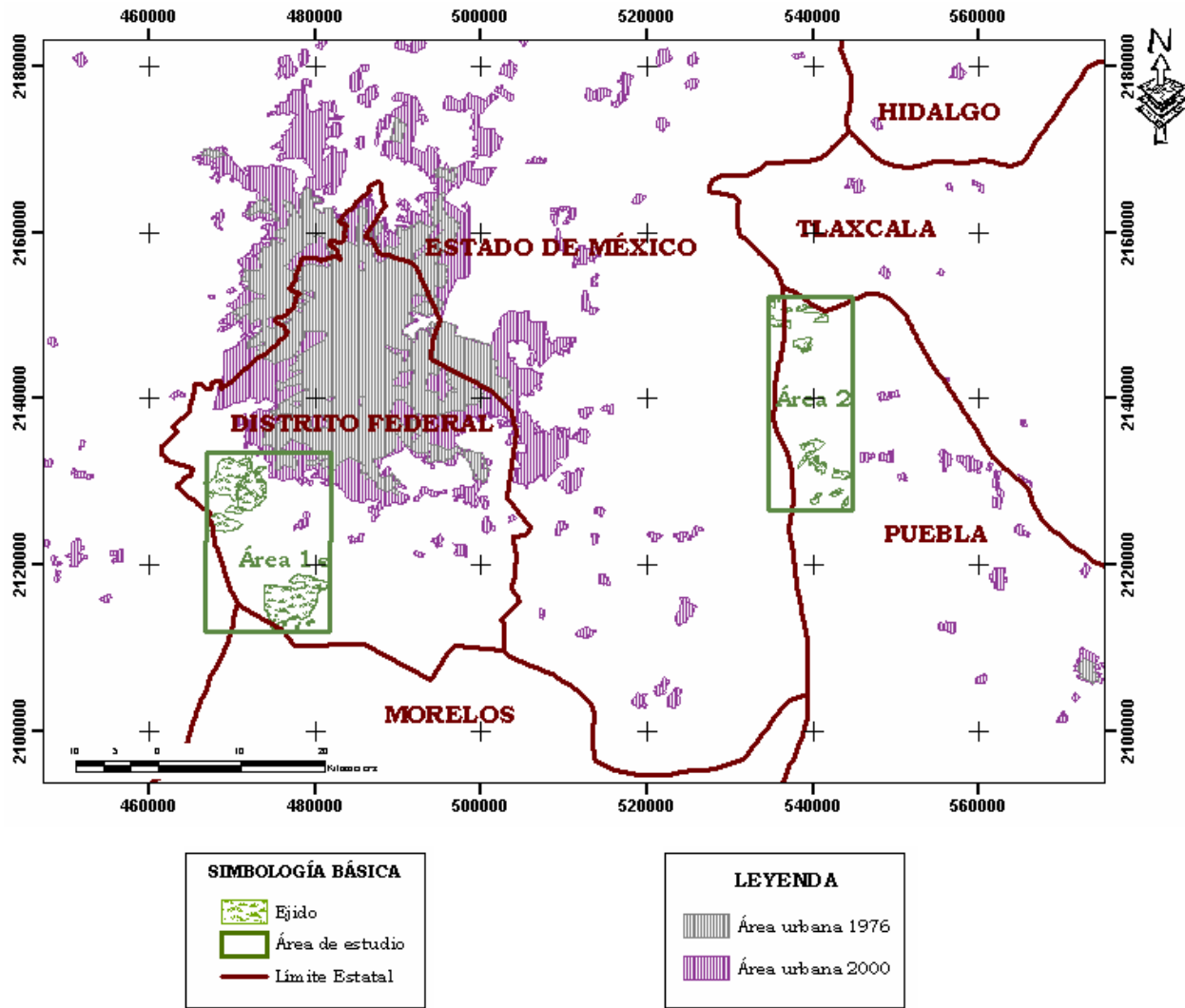
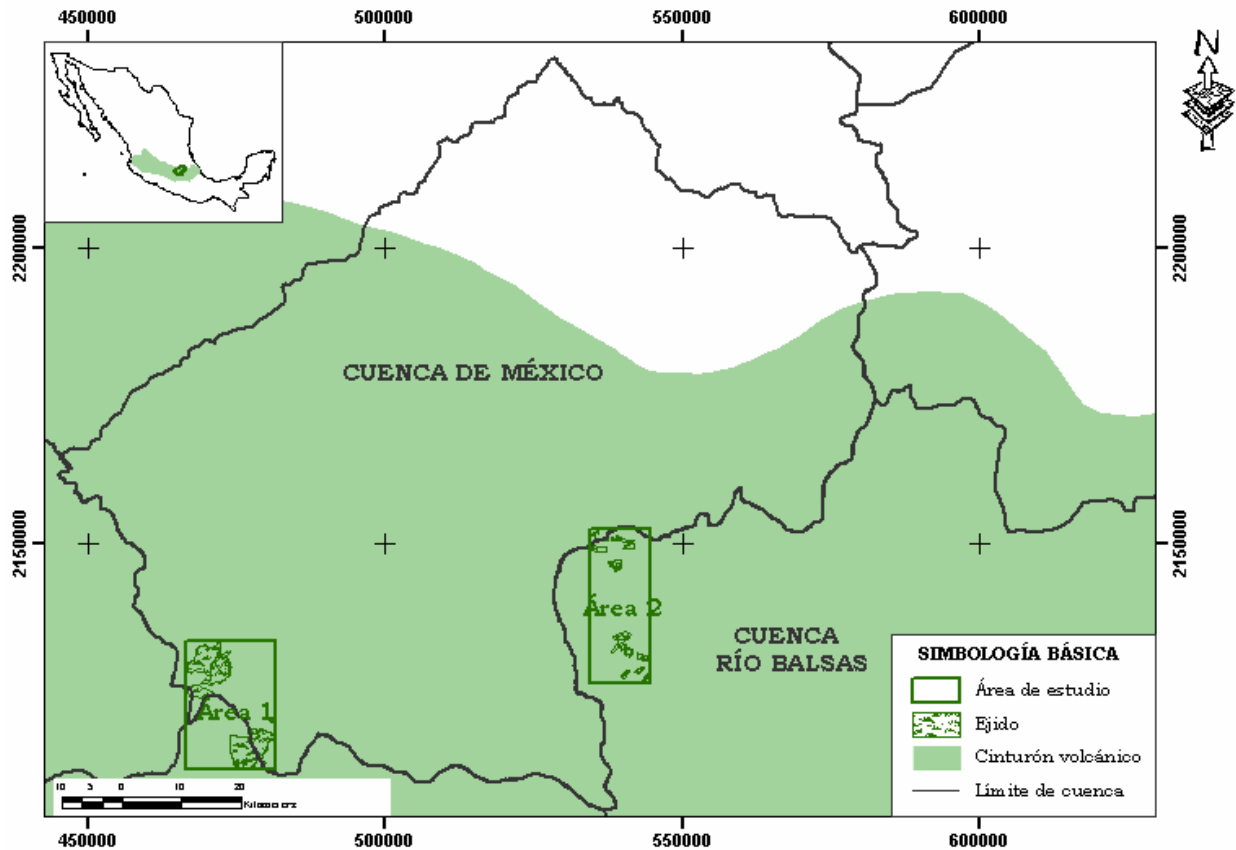


Figura No. 2.11. Cambio en la cobertura urbana 1976 – 2000.

### 3. CONTEXTO GEOLÓGICO

El territorio de estudio se localiza dentro de la porción centro-oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), el cual es una región volcánica, con fracturamiento de tipo tensional (Mooser *et al*, 1996), constituido de lavas y piroclastos del Terciario al Reciente, de aproximadamente 1,000 km de largo, ancho variable entre 50 y 150 km (Aceves, 1996), más de 2,000 m de espesor y que cruza la República Mexicana a la altura del paralelo 19° latitud norte. (Ver *Figura No. 3.1*).



*Figura No. 3.1. Localización de la Cuenca de México y zonas de estudio con respecto al Cinturón Volcánico Trans-Mexicano*

La existencia del CVT permite establecer una conexión litológica de este a oeste en el país, a lo largo y ancho de su distribución, factor de suma importancia en el aspecto hidrogeológico, ya que permite asumir la existencia de flujos de agua subterránea que recorren grandes distancias a través de dicho cinturón.

Las *Figuras No. 3.2 y 3.3* exhiben la secuencia litológica conocida para un tramo del Cinturón Volcánico Transmexicano, que incluye las cuencas de Toluca, México y Puebla (Mooser *et al.*, 1996), las cuales permiten visualizar a su vez, el gran espesor de la columna, continuidad litológica horizontal y vertical, y en general, la magnitud de la verdadera región asociada a los diferentes procesos relacionados con el flujo de agua subterránea. Así, se recalca nuevamente sobre la importancia de realizar estudios de carácter regional para alcanzar una mayor comprensión de la dinámica del agua subterránea y el ambiente.

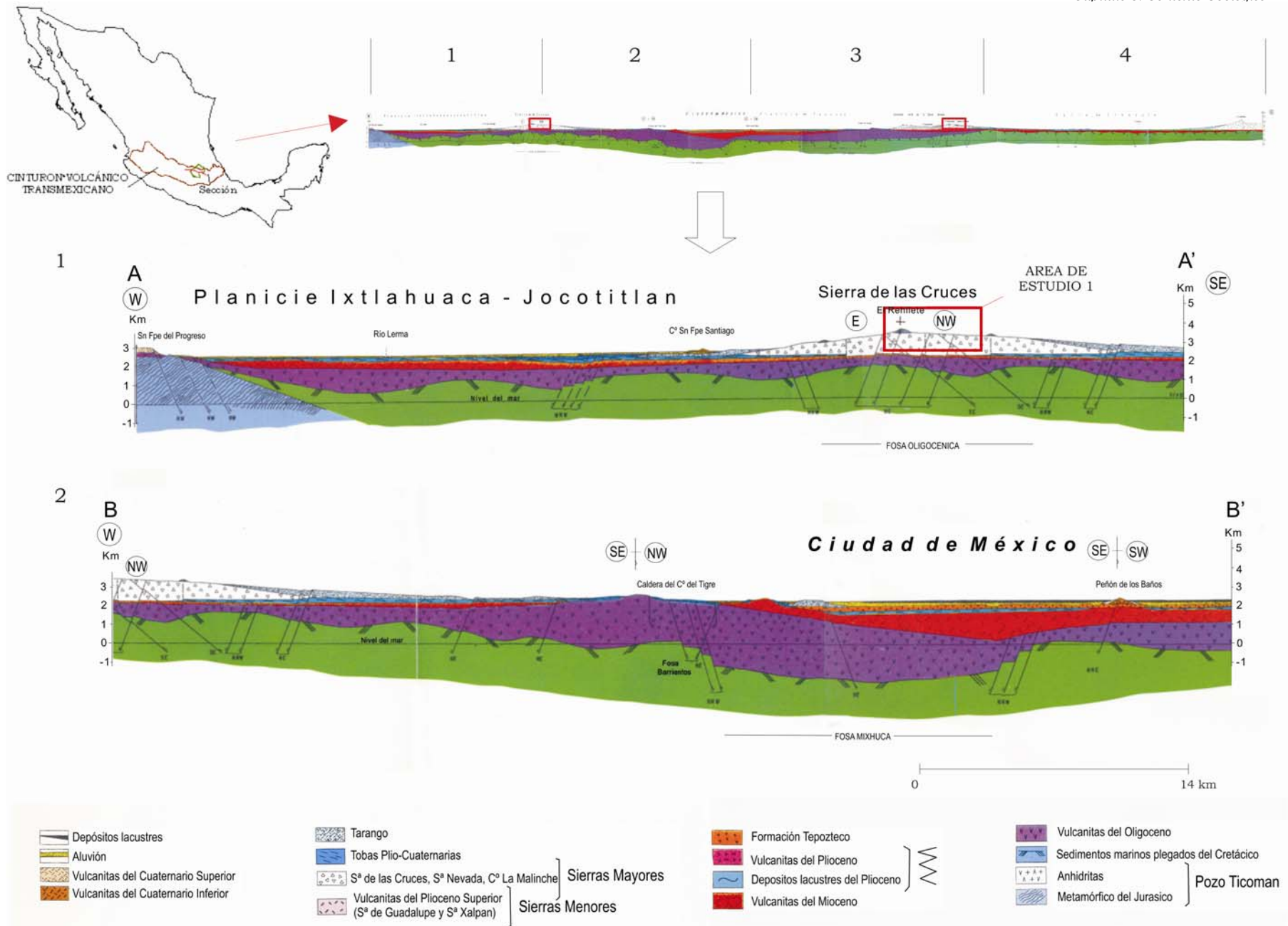


Figura No. 3.2. Localización del área de estudio 1 en la sección geológica de las cuencas de Toluca y México (Mooser et al., 1996)

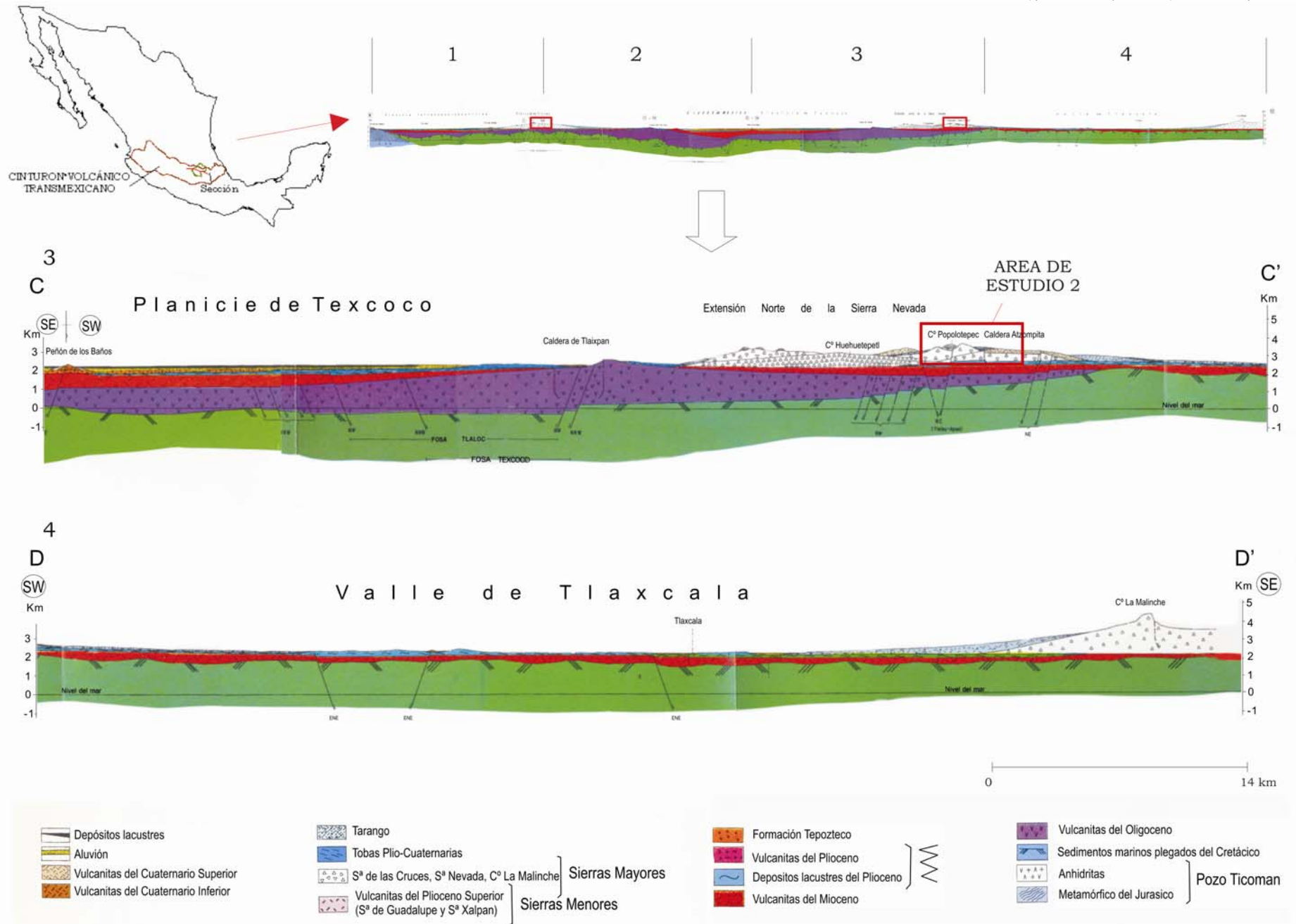


Figura No. 3.3. Localización del área de estudio 2 en la sección geológica de las cuencas de México y Puebla (Mooser et al., 1996)

Debido a que la mayor parte del territorio de estudio se encuentra incluido dentro de la Cuenca de México, la descripción geológica del presente estudio se basa en la misma.

Hasta el momento, la columna estratigráfica no ha sido definida en su totalidad, por lo que la profundidad hasta el basamento es aún desconocida. La roca más antigua reconocida en la Cuenca de México corresponde con caliza, de edad Cretácica, desarrollada en un ambiente de plataforma, la cual se encuentra plegada por efectos de la Orogenia Laramide hacia finales del Cretácico e inicios del Terciario, presentando pliegues del Maestrichtiano – Eoceno Temprano, generalmente simétricos y recostados al oriente y poniente, cuyos ejes sinuosos generalmente se encuentran orientados nor-noreste. La mayoría de estos pliegues, se cree, pertenecen a la provincia tectónica de rocas jurásicas y cretácicas plegadas que componen la Sierra Madre Oriental (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989); adicionalmente las rocas cretácicas presentan evidencias de procesos de erosión. Según Fries (1960), la Cuenca de México presenta pliegues del Maestrichtiano – Eoceno Temprano en las rocas cretácicas, estos son generalmente simétricos, cuyo eje sinuoso generalmente se encuentra orientado nor-noreste; la mayoría son relativamente cortos, de 2 a 3 km de longitud.

En la literatura geológica y estratigráfica, estas rocas calizas constituyen las formaciones Xochicalco, Morelos, El Doctor y Cuautla. Hacia fines del Cretácico, cambió el tipo de sedimentación en la cuenca, pasando de carbonatos a terrígenos finos, compuestos por lutita y arenisca arcillosa de la Formación Mexcala. Igualmente, se considera que el primer evento importante que posiblemente dio origen a la actual configuración de la Cuenca de México sucedió desde finales del Cretácico hasta el Eoceno Medio con el emplazamiento del Granito de Colotepec (Fries, 1960; De Cserna *et. al.*, 1988; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989)

Entre el Eoceno Tardío y el Oligoceno Temprano se presenta una etapa erosiva, considerada como la de máxima erosión en las montañas, en la cual se deposita el Grupo Balsas en forma de extensos sedimentos fluviales, los cuales yacen discordantemente sobre las rocas cretácicas (Fries, 1960) y se componen de conglomerado calizo cubierto por limolita calcárea con interestratificaciones de anhidrita y toba, suprayacido por una serie de derrames lávicos basálticos con intercalaciones de toba y aglomerado.

La composición principal de la cuenca se considera es de rocas volcánicas de composición andesítico-basáltica, formadas en el Terciario Medio, las cuales provienen de los pequeños volcanismos controlados por las numerosas fallas y fracturas que se presentan en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, el cual ha dado origen igualmente a los grandes volcanes del país (González-Morán, 1992).

Así, durante el Oligoceno se genera una etapa de actividad volcánica, especialmente en el noroccidente del país, depositando en la hoy Cuenca de México secuencias volcánicas del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano, de composición andesítica a riódacítica, con fenocristales de andesina, oligoclasa, sanidino, cuarzo, augita e hiperstena que yacen en una matriz compuesta por

micro-intercrecimientos de feldespato y cuarzo, con ilmenita acicular, magnetita, apatito y circón intergranulares. Estas secuencias volcánicas cubren la secuencia Cretácica de manera discordante, al igual que al Grupo Balsas, sin embargo, existe una discordancia entre estas rocas y otra secuencia de derrames lávico basáltico, andesítico y dacítico, correspondientes al Grupo Pachuca de Edad Oligoceno Medio-Tardío a Plioceno Temprano (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

Para el Mioceno Medio y Tardío se presentan rocas volcánicas, conocidas como las Sierras Menores (Sierra de Las Cruces-margen occidental de la cuenca, Sierra de Guadalupe-al norte de la ciudad de México, Sierra de Pachuca-en el extremo norte de la cuenca, entre otras), las cuales se distribuyen en áreas pequeñas a través de toda la cuenca (Mooser, 1975; Vázquez y Jaimes en González, 1998) y cuya mayoría se encuentran cubiertas por material más reciente. Estas rocas están compuestas de toba, brecha volcánica y lava, principalmente andesítica y dacítica, encontrándose andesita de lamprobolita o augita, con minerales esenciales de andesina, lamprobolita, feldespatos, augita, piroxenos y anfíboles y accesorios como magnetita, ilmenita, calcita, clorita, cuarzo y apatito. Asimismo, se han identificado dacitas con oligoclasa, cuarzo, anfíboles, piroxenos e ilmenita, magnetita, apatito y circón como minerales accesorios. Por su parte, las Sierras Mayores, ubicadas al oeste y al este de la cuenca, se desarrollan en el Plioceno Temprano, constituidas esencialmente por lavas porfidoandesíticas, como producto de numerosos estratovolcanes.

A finales del Plioceno se genera un cambio del régimen tectónico, produciendo una serie de fallas normales con dirección preferencial W-E, con un sistema conjugado de dirección promedio N55E hacia las sierras occidentales y orientales de la parte meridional de la cuenca, tales como las sierras Nevada, Río Frío, Chichinautzin; Guadalupe, Tepoztlán y Chimalhuacán (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). A este conjunto de fallas se les asigna una Edad Plio-Cuaternaria debido a que éstas cortan las formaciones volcánicas del Mioceno, Plioceno y Cuaternario. Asimismo, la composición de las rocas de este periodo se torna más andesítica y andesítica-basáltica.

La alineación de conos cineríticos en la cuenca es evidente, aquella con dirección W-E donde se incorpora la Sierra Santa Catarina y otras hileras de conos en la Sierra de Chichinautzin, asimismo, los cerros de La Estrella, Peñón Viejo y Chimalhuacán se alinean en superficie con dos fallas inferidas de orientación N50E, asociadas con actividad sísmica reciente (De Cserna *et al*, 1988), por lo que algunos las consideran como fallas activas. De igual manera, el Cerro del Pino se incorpora en la orientación de la Sierra de Santa Catarina (De Cserna *et al*, 1988), siendo esta sierra un ejemplo clásico de cizallamiento sinistral. En la Sierra de Chichinautzin se produjo claramente otro esfuerzo similar, en donde las hileras de conos dirigidos en dirección ENE en sus cumbres (los Tenayos) son evidencia de ello a pequeña escala (Mooser, 1978).

Por su parte, en la Cuenca de Puebla y Tlaxcala se presentan fallas normales con rumbo oeste-este, alineadas regionalmente al oeste con la Sierra de Río Frío, Llano Grande e Iztaccihuatl y al este con el Volcán La Malinche (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

Se considera que el rasgo volcánico más importante de la Cuenca de México se formó durante los últimos 700,000 años y consiste en la presencia de más de 200 conos volcánicos monogenéticos de andesita basáltica, distribuidos en tres campos volcánicos: Chichinautzin; Tezontepec, ubicado hacia el NE de Teotihuacan y el último localizado hacia la parte meridional de la cuenca, el cual contiene todas las estructuras volcánicas monogenéticas (Pantoja, 1993).

Originalmente la Cuenca de México era fluvial exorreica, cuyas corrientes fluían hacia el sur con dirección al Río Amacuzac, desarrollada por los anteriores episodios volcánicos. Hacia el Cuaternario Superior, hace menos de 500,000 años, se generó una gran actividad volcánica y el paso de grandes volúmenes de basalto que construyeron la Sierra Chichinautzin, que funcionó como cortina de presa (Mooser, 1975; tomado de González, 1998), creando la obstrucción del desagüe de la entonces Cuenca de México. Desde esa época la cuenca es de tipo endorreico, rodeada de montañas que alcanzan altitudes de 5,400 m snm. El enfriamiento rápido de la lava causó fracturas y poros grandes con un potencial importante de almacenamiento y filtración del agua de lluvia. A su vez, la cuenca endorreica formó un lago que permitió la acumulación de unos 30 a 300 m de sedimentación lacustre con intercalaciones de ceniza volcánica y pómez (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

Por último, la fase final de formación de la Cuenca de México consiste en el desarrollo de grandes abanicos aluviales, los cuales rellenaron de manera ocasional la parte central de la cuenca con depósitos limo-arenoso, de manera que, estos sedimentos se encuentran interestratificados con suelo, capas de ceniza y pómez, siendo estos dos últimos provenientes de erupciones volcánicas originadas principalmente hacia el sur de la cuenca. El continuo relleno de la cuenca dio origen a ambientes lacustres especialmente hacia el centro-sur y sur (Mooser, 1978), formando así, la altiplanicie de la cuenca (*Ver Figura No. 3.4*). Hacia el sur, se encuentran a su vez, los depósitos lacustres interdigitados con piroclastos resultado de la actividad del volcán Chichinautzin (González-Morán, 1992). Por otra parte, se considera que existía un clima húmedo y árido para el Pleistoceno Tardío-Holoceno debido a la presencia de evaporitas y toba consolidada (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

### **3.1. ESTRATIGRAFÍA GENERAL**

Teniendo en cuenta la importancia que tiene la geología regional, tanto en superficie como en profundidad, para estudios de agua subterránea y de índole ambiental, la *Figura No. 3.5* exhibe la columna estratigráfica reconocida para la Cuenca de México y áreas adyacentes, incluyendo sus espesores.

Asimismo, en el *Anexo 2* se presenta una descripción de la columna estratigráfica del territorio, de lo más antiguo a lo más joven, donde se incluye de forma más detallada sus características litológicas, espesor, ubicación de los principales afloramientos, posición y relación estratigráfica, y por último, la edad para cada unidad. El objetivo de presentar la secuencia estratigráfica es el de mostrar la importancia de las unidades geológicas en términos de su espesor y características intrínsecas que permite el almacenamiento y movimiento del agua trans-cuenca y en la formación de flujos regionales.



ERA	PERIODO	ÉPOCA	EDAD	CUENCA DE MÉXICO Y ÁREAS ADYACENTES	ESPESOR (m)																				
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO		LACUSTRE, FORMACIÓN CHICHINAUTZIN, FORMACIÓN POPOCATEPETL	30-300, MAX 1800, MAX 3500																				
		PLEISTOCENO	CALABRIANO	FORMACIÓN IZTACCÍHUATL	MAX 2500																				
				FORMACIÓN TLALOC	~1800																				
				FORMACIÓN EL PINO	MAX 750																				
				FORMACIÓN LLANO GRANDE	No definido																				
	TERCIARIO	NEOGENO	PLIOCENO	PIACENZIANO	ROCAS VOLCÁNICAS MÁFICAS, RIOLITA NAVAJAS	MAX 300, ~500																			
					FORMACIÓN LAS CRUCES, FORMACIÓN ZEMPOALA	MAX 990, MAX 1000																			
					FORMACIÓN OTOMI	MAX 1300																			
					DEPÓSITOS VOLCÁNICOS	~650																			
					GRUPO PACHUCA	MAX 3700																			
			MIOCENO	MESSINIANO	TORTONIANO	SERRAVALLIANO	LANGHIANO	BURDIGALIANO	ACUITANIANO	ROCAS EXTRUSIVAS, FORMACIÓN TEPOZTLÁN	No definido, MIN 250														
										ROCAS VOLCÁNICAS, RIOLITA TILZAPOTLA	390-1750, MAX 250														
										GRUPO BALSAS	1300-2500														
										GRANITO COLOTEPEC	No definido														
										FORMACIÓN MEXCALA	MAX 1500														
		PALEOGENO	OLIGOCENO	RUPELIANO	PRIABONIANO	BARTONIANO	LUTENIANO	YPRESIANO	THANETIANO	UNNAMEDANO	DANIANO	MAASTRICHTIANO	CAMPANIANO	SANTONIANO	CONACIANO	TURONIANO	CENOMANIANO	ALBIANO	APTIANO	BARREMIANO	HAUTERIVIANO	VALANGINIANO	BERRIASIANO		
																								GRUPO BALSAS	1300-2500
																								GRANITO COLOTEPEC	No definido
			EOCENO	LUTENIANO	YPRESIANO	THANETIANO	UNNAMEDANO	DANIANO	MAASTRICHTIANO	CAMPANIANO	SANTONIANO	CONACIANO	TURONIANO	CENOMANIANO	ALBIANO	APTIANO	BARREMIANO	HAUTERIVIANO	VALANGINIANO	BERRIASIANO					
																					GRUPO BALSAS	1300-2500			
	PALEOCENO	LUTENIANO	YPRESIANO	THANETIANO	UNNAMEDANO	DANIANO	MAASTRICHTIANO	CAMPANIANO	SANTONIANO	CONACIANO	TURONIANO	CENOMANIANO	ALBIANO	APTIANO	BARREMIANO	HAUTERIVIANO	VALANGINIANO	BERRIASIANO							
																			GRUPO BALSAS	1300-2500					
	MESOZOICO	CRETÁCICO	TARDÍO	CAMPANIANO	SANTONIANO	CONACIANO	TURONIANO	CENOMANIANO	ALBIANO	APTIANO	BARREMIANO	HAUTERIVIANO	VALANGINIANO	BERRIASIANO											
															GRUPO BALSAS	1300-2500									
															GRANITO COLOTEPEC	No definido									
															FORMACIÓN MEXCALA	MAX 1500									
															FORMACIÓN CUAUTLA	200-750									
			TEMPRANO	NEOCOMIANO	BARREMIANO	HAUTERIVIANO	VALANGINIANO	BERRIASIANO	MAASTRICHTIANO	CAMPANIANO	SANTONIANO	CONACIANO	TURONIANO	CENOMANIANO	ALBIANO	APTIANO	BARREMIANO	HAUTERIVIANO	VALANGINIANO	BERRIASIANO					
																					FM MORELOS, FM EL DOCTOR	MAX 900, 200			
																					FORMACIÓN XOCHICALCO	MIN >500			
GRUPO BALSAS																					1300-2500				
GRANITO COLOTEPEC																					No definido				

Modificado de Vázquez-Sánchez y R. Jaimes Palomera (1989)

Figura No. 3.5. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca de México y áreas adyacentes

### 3.2. ASPECTO GEOLÓGICO LOCAL

Los ejidos que reciben actualmente pago por servicio ambiental considerados en este estudio se localizan en dos áreas principales, en la Sierra Río Frío y hacia la zona de los Volcanes Ajusco y Pelado.

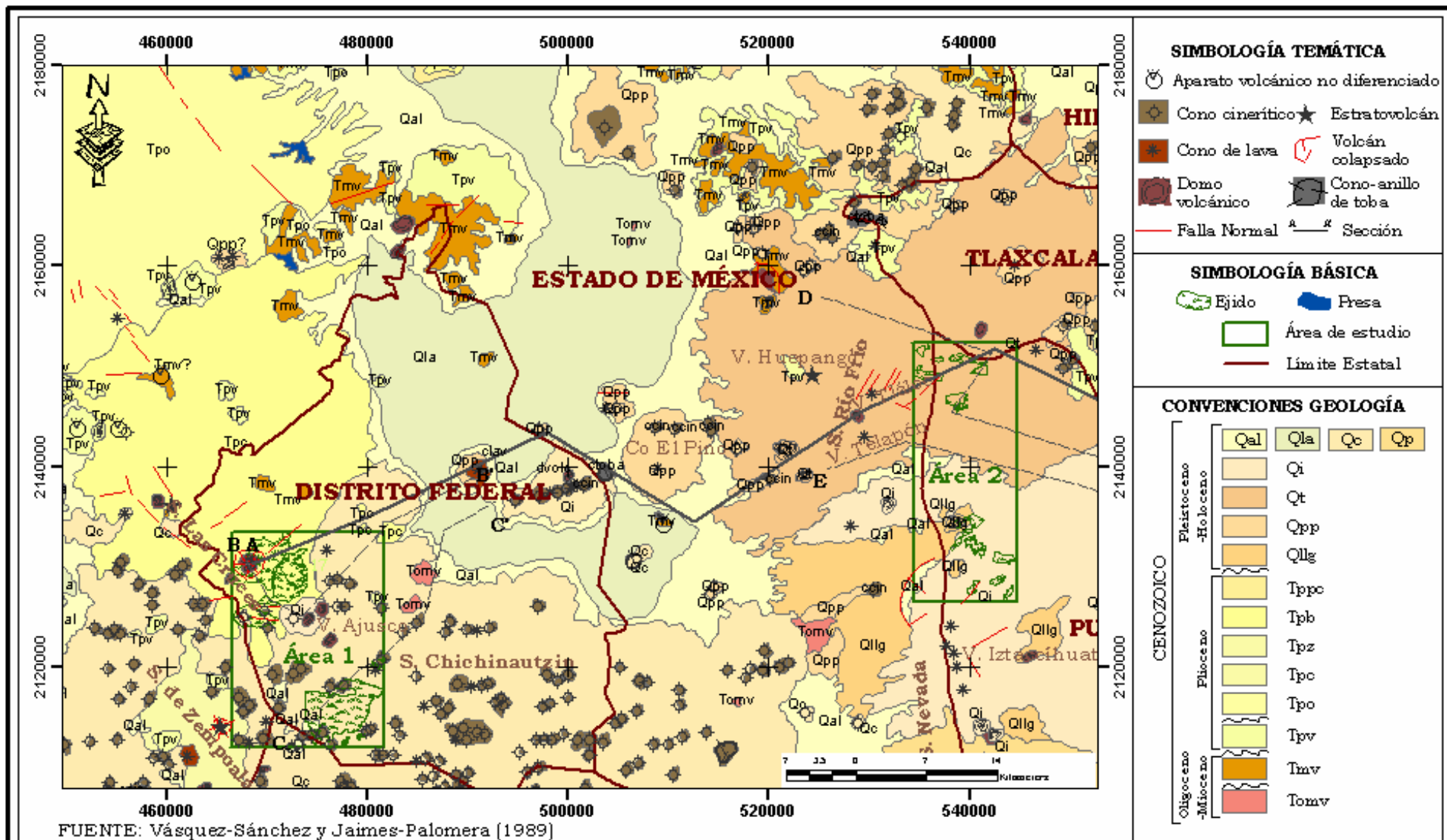


FIGURA No. 3.4. LITOLOGÍA AFLORANTE EN EL TERRITORIO DE ESTUDIO

PROCESO DE RECARGA-DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS RECEPTORAS DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO, SIERRAS NEVADA Y LAS CRUCES - MÉXICO

LILIANA ANDREA PEÑUELA ARÉVALO

2007

TERRITORIO DE ESTUDIO



POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

A continuación se realiza la descripción litológica para cada área, con base preferentemente en la recopilación bibliográfica, descripción y nomenclatura empleada por Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), considerando que su interpretación geológica fue realizada con fotografías aéreas a escala 1:40,000 para una región que abarca el territorio de estudio del presente trabajo y por ser una mayor escala que la usada por las cartas geológicas E14A49, E14B31, E14B32 (escala 1:50,000) y E14-2 (Escala 1:250,000) del INEGI. Asimismo, este último no utiliza nomenclatura estratigráfica sino que su descripción geológica se limita a tipo de roca, incluyen pocas características de las rocas y en muchas ocasiones las edades asignadas a la litología difieren con aquellas señaladas por Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989).

### **3.2.1. Área 1. Volcanes Ajusco y Pelado**

#### DEPÓSITOS VOLCÁNICOS DEL PLIOCENO TEMPRANO (Tpv)

Estas rocas se manifiestan hacia el este del área en una pequeña superficie, se considera representan un segundo período magmático del Cinturón Volcánico Transmexicano, son secuencias de toba, brecha volcánica, derrames lávicos y domos, de composición principalmente andesítica y dacítica, generalmente con fenocristales de labradorita, bitownita, andesina, oligoclasa, cuarzo, olivino, lamprobolita, augita, pigeonita e hiperstena, con un espesor del orden de los 650 m. En el cerro Xicuco consta de ignimbritas riolíticas vítreas con lentes aplastados de obsidiana. De acuerdo con interpretaciones de la litología del subsuelo existe una relación interdigitada de esta unidad con depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno (Tppc).

#### FORMACIÓN LAS CRUCES (Tpc)

Esta unidad se encuentra al noroeste del área de estudio 1; son sucesiones de composición andesítica y dacítica, formadas por pómez de caída, “surges” flujos de ceniza, pómez y de bloque. Según las observaciones de Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), las lavas se encuentran intercaladas con brechas en las partes altas de la Sierra de Las Cruces, en algunos casos finalizando en forma de domo; consisten de: andesita de pigeonita o de lamprobolita, con andesina, pigeonita o hiperstena y augita como minerales esenciales; dacita de lamprobolita o de pigeonita, con oligoclasa, andesina, cuarzo, pigeonita o lamprobolita e hiperstena como esenciales y magnetita, ilmenita y apatito como accesorios. Asimismo, los autores identificaron una brecha lítica andesítica originada por un flujo piroclástico, constituida por fragmentos líticos de andesita porfirítica, en la matriz cloritizada y desvitrificada existen fragmentos de andesina, pómez, hornblenda alterada y plagioclasa en pequeñas cantidades.

Esta formación corresponde con tres estratovolcanes (La Palma, Los Picachos y Los Tepalcates) alineados en dirección casi norte-sur, donde sus edades y características morfológicas indican una posible migración del volcanismo en esa misma dirección. Su espesor es variable, alcanzando un máximo en el cerro San Miguel de 990 m; a esta unidad se le atribuye una edad Plioceno Tardío según fechamientos isotópicos.

FORMACIÓN IZTACCÍHUATL (Qi)

Rocas localizadas hacia el volcán Ajusco; Schlaepfer (1968) asignó este nombre a la roca volcánica de los volcanes Llano Grande Iztaccíhuatl y Nexpayantla, construida principalmente por secuencias efusivas de composición andesítica basáltica a dacítica, las cuales inician con derrames lávicos y finalizan con extrusiones dómicas constituidos por andesitas de olivino y/o anfíbol y dacitas de anfíbol; contienen fenocristales de cuarzo, biotita, plagioclasa, anfíbol, piroxeno y olivino, en matriz microcristalina y vítrea. No obstante, Schlaepfer (1968) había definido la Formación Ajusco, la cual no es incorporada por Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), posiblemente por la similitud existente en la composición litológica, relación estratigráfica y edad de los volcanes Nexpayantla y Popocatepetl con el volcán Ajusco de la que hacen referencia.

Romero (1998) considera al volcán Ajusco como una serie de domos dacíticos y andesíticos acompañados de flujo piroclástico de bloque y ceniza, comprendido por cuatro fases de construcción de domos, en el siguiente orden:

- 1) Domo dacítico Cruz del Márques, edad probable >3 Ma
- 2) Domo andesítico Santo Tomás, edad de 3.4 Ma
- 3) Domo dacítico Pipixaca, edad de 2 Ma
- 4) Domo dacítico Pico del Águila, edad de 0.6 Ma

Entre los dos primeros eventos se presenta una diferencia en el contenido de hornblenda que indica a su vez, un aumento en el contenido de agua en el magma. Igualmente, existen variaciones en el contenido de sílice y biotita, así como la presencia de olivino hacia la última fase, originando lavas más máficas (Romero, 1998).

FORMACIÓN CHICHINAUTZIN (Qc)

Esta unidad se refiere al material aflorante hacia la zona del volcán Pelado, constituida de secuencias de derrames lávicos, con tefra de caída y de “surges” piroclásticos; su composición es principalmente andesítica-basáltica y andesítica con fenocristales coexistentes de olivino y piroxeno. Asimismo, se ha reportado la presencia de andesita de hiperstena con fenocristales de labradorita e hiperstena con pigeonita en menor cantidad y andesina con lamproboloita, magnetita, apatito y sericita como minerales accesorios. Andesita basáltica de augita, basalto, basalto alcalino y dacita han sido igualmente reportadas. Se cree que la abundancia de olivino sugiere procesos de fraccionamiento líquido-cristal, donde la cristalización inicial del olivino pudo generar una disminución de sílice en el líquido residual. Diversos autores han atribuido diferentes edades para esta formación, una edad más reciente que 700,000 años por polaridad magnética normal, entre  $38,590 \pm 3,210$  años y  $8440 \pm 70$  años con  $^{14}\text{C}$ ,  $2,422 \pm 250$  años para la colada más reciente de esta unidad, proveniente del volcán Xitle, por lo que como indican Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) quedaría dentro del intervalo Pleistoceno tardío y Holoceno. Sin embargo, un estudio posterior (Siebe, 2000), señala una edad de  $1,670 \pm 35$  años para el volcán Xitle, a partir del análisis de muestras de carbón, producto de su erupción.

### **3.2.2. Área 2. Sierra de Río frío y Cerro La Trampa**

#### FORMACIÓN LLANO GRANDE (Qllq)

Esta formación aflora al suroeste del área, está compuesta por intercalaciones de pómez de caída, “surges”, flujos de ceniza y brechas de flujo, superyacidas por derrames lávicos y dómicos; la composición varía de andesítica a riódacítica. Su espesor no se ha definido claramente y se considera perteneciente al Pleistoceno Temprano. Los flujos lávicos corresponden a andesitas de piroxeno y anfíbol con fenocristales de andesina, augita, hiperstena y lamprobolita.

#### FORMACIÓN TLÁLOC (Qt)

Esta unidad se encuentra al norte del área de estudio 2, definida como sucesiones de composición preferentemente andesítica, latítica y dacítica, principiadas por pómez de caída, “surges”, flujos de ceniza, pómez y de bloque, intercaladas y/o cubiertas por derrames lávicos que finalizan con efusiones dómicas. El espesor aflorante aproximado de esta unidad en el centro de la Sierra de Río Frío es de 1,800 m y se le atribuye una edad del Pleistoceno. La mayoría de las efusiones lávicas son andesitas y dacitas de anfíbol, lamprobolita e hiperstena con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, biotita, anfíbol y piroxenos.

#### FORMACIÓN IZTACCÍHUATL (Qi)

Unidad localizada al sur del área, más cerca de su localidad tipo, fue descrita previamente en el área de estudio 1, sin embargo, debajo de los flujos lávicos, en el flanco nororiental del volcán Iztaccíhuatl, se presentan flujos de ceniza cristalina y vítrea no solidificados, con niveles de “surges” ricos en partículas cristalinas y líticas.

## **4. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO**

Existen numerosos estudios relacionados con el agua subterránea de la Cuenca de México, sin embargo, aún no se conoce con detalle el funcionamiento del flujo subterráneo, principalmente porque los estudios se enfocan en realizar análisis de segmentos de la cuenca y no en su totalidad, problema que se aprecia de igual manera con la Comisión Nacional del Agua (CNA), la cual dividió el territorio nacional en 653 denominados acuíferos para intentar un mejor y fácil manejo administrativo; sin embargo, para fines de investigación y para definir el funcionamiento físico del sistema esta división no es adecuada ya que como se indica con anterioridad (apartado 2.1), el análisis hidrogeológico no sólo se realiza sobre una cuenca hidrográfica sino un territorio de mayor extensión a fin de incorporar y entender todos los procesos y elementos involucrados dentro del sistema. De igual manera, como se indica en el capítulo 3, todavía no se han realizado estudios geológicos y estratigráficos donde se presente alguna columna estratigráfica con la profundidad total de los sedimentos de la cuenca, de donde se pueda definir la roca basamento, parámetro de suma importancia para cualquier estudio de agua subterránea.

De acuerdo con resultados de estudios previos (González-Morán, 1992; Edmunds *et al*, 2002; Huizar *et al*, 2004), el subsuelo debajo de la planicie de la Cuenca de México está compuesto por una serie de unidades hidrogeológicas de aproximadamente 2,000 m de espesor y de continuidad lateral regional, considerando la homogeneidad de la litología, que permite pensar que el sistema se extiende a lo largo del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano.

De acuerdo con el funcionamiento hidráulico, es factible establecer que las unidades hidrogeológicas forman un sistema acuífero que en detalle consiste de una unidad arcillosa en su parte superior de espesor variable (alcanzando los 300 m en el Lago de Texcoco y Subcuenca de Chalco) y alta compresibilidad, denominada *acuitardo*. Subyaciendo a esta unidad se encuentra un acuífero heterogéneo y anisótropo, el cual consta de piroclastos, conglomerados y otros materiales volcánicos, con un espesor generalmente mayor de 2000 m.

Debido a la profundidad que alcanza la mayoría de los pozos en el territorio ( $\approx 200$  m), no se cuenta con datos de profundidad mayor, por lo que las propiedades hidráulicas de la unidad acuífera profunda no son conocidas, sin embargo, existe evidencia en otras partes de la región de estudio, donde las unidades del Cretácico y mitad del Terciario tienen una alta conductividad hidráulica (K), por ejemplo las primeras tienen propiedades cársticas existentes en la roca (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), factor determinante para el estudio de los sistemas de flujo de agua subterránea en la cuenca.

### **4.1. ANTECEDENTES DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO**

Diversas investigaciones y estudios señalan que las rocas que limitan la Cuenca de México presentan un potencial importante de filtración y almacenamiento de agua, sin olvidar, como se indicó anteriormente, el factor topográfico que favorece a su vez la recarga de agua subterránea; sin embargo, en la literatura no existen

suficientes datos de parámetros hidráulicos que permitan cuantificar con detalle dicha suposición.

De manera cualitativa se sabe que el rápido enfriamiento de las andesitas del Terciario y basaltos del Cuaternario que afloran hacia la zona montañosa (Sierras Nevada y Las Cruces) generó grandes poros y fracturas que permiten la interconexión y transmisión del agua, al igual que la actividad tectónica originó fallas profundas, las cuales, según Vázquez-Sánchez (*op cit*) permiten la circulación del agua hasta 2,500 m aproximadamente de profundidad a través de las andesitas fracturadas del Plio-Cuaternario que afloran en las Sierras de Las Cruces y Nevada-Río Frío.

Las lavas andesíticas de la Sierra Nevada tienen una menor conductividad hidráulica, capacidad de almacenamiento e infiltración con respecto a las rocas de la Sierra de Las Cruces (Durazo y Farvolden, 1989). Igualmente, Durazo y Farvolden (1989) consideran que los abanicos aluviales presentes en la cuenca tienen una alta conductividad hidráulica e infiltración, así como, los depósitos aluviales y material piroclástico forman una unidad acuífera granular permeable.

Se aprecia que muchos de los estudios realizados con anterioridad hacen referencia de propiedades hidráulicas cualitativas más no cuantitativas, que son definidas con base al material litológico y bases teóricas, puesto que es sabido de manera general que por ejemplo las arcillas presentan una menor conductividad hidráulica que las arenas por sus características intrínsecas. Según Freeze y Cherry (1979) la arena limpia tienen un intervalo de conductividad hidráulica de  $10^{-2}$  a  $10^{-5}$  m/s y la arcilla marina de  $10^{-9}$  a  $10^{-12}$  m/s.

Igualmente, las sierras de Las Cruces, Chichinautzin, Nevada y Santa Catarina son señaladas en la literatura como zonas de recarga de la Cuenca de México, sin embargo, no se han realizado estudios regionales que permitan conocer el funcionamiento real del flujo de agua subterránea, y para el caso de los SAH, verificar las zonas de recarga del agua subterránea y establecer los directos beneficiados por el elemento hídrico.

#### **4.2. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS**

Las unidades hidrogeológicas de la Cuenca de México han sido estudiadas a lo largo de décadas, por lo que han sido redefinidas en varias ocasiones. A continuación se muestra una breve descripción de diferentes investigaciones de más antiguas a más recientes:

1) Ortega y Farvolden (1989) clasifican las rocas y material semiconsolidado o no consolidado de la Cuenca de México descritas por Fries (1960), Mooser (1961 y 1962) y Schlaepfer (1968), en cinco unidades hidrogeológicas regionales, con respecto a sus propiedades físicas y comportamiento hidráulico, éstas son:

- Acuitardo en material lacustre Cuaternario
- Unidad acuífera en rocas volcánicas y material Cuaternario
- Unidad acuífera en material piroclástico y aluvial Terciario
- Acuitardo en rocas volcánicas terciarias

o Unidad acuífera en rocas carbonatadas cretácicas

2) Vázquez-Sánchez (1995) agrupa las diferentes unidades geológicas en unidades hidrogeológicas con base en la conductividad hidráulica determinada cuantitativamente a través del análisis numérico de pruebas de bombeo, así como con apoyo de sus características litológicas y estructurales, rasgos geomorfológicos y caudales de producción en pozos.

Las unidades con alta conductividad hidráulica están compuestas por sedimentos aluvio-lacustres (Cuaternario), rocas basálticas (Cuaternario), rocas andesíticas (Plio-Cuaternario y Plioceno Superior), depósitos piroclásticos andesíticos (Plio-Cuaternario) y rocas carbonatadas (Cretácico). Las unidades de baja conductividad hidráulica son los depósitos lacustres (Cuaternario), depósitos piroclásticos y lacustres (Plioceno Inferior), rocas andesíticas (Mioceno), rocas basálticas y riolíticas (Oligoceno), Grupo Balsas (Eoceno) y la Formación Mexcala (Cretácico Tardío) (Ver Figuras No. 4.1 y 4.2).

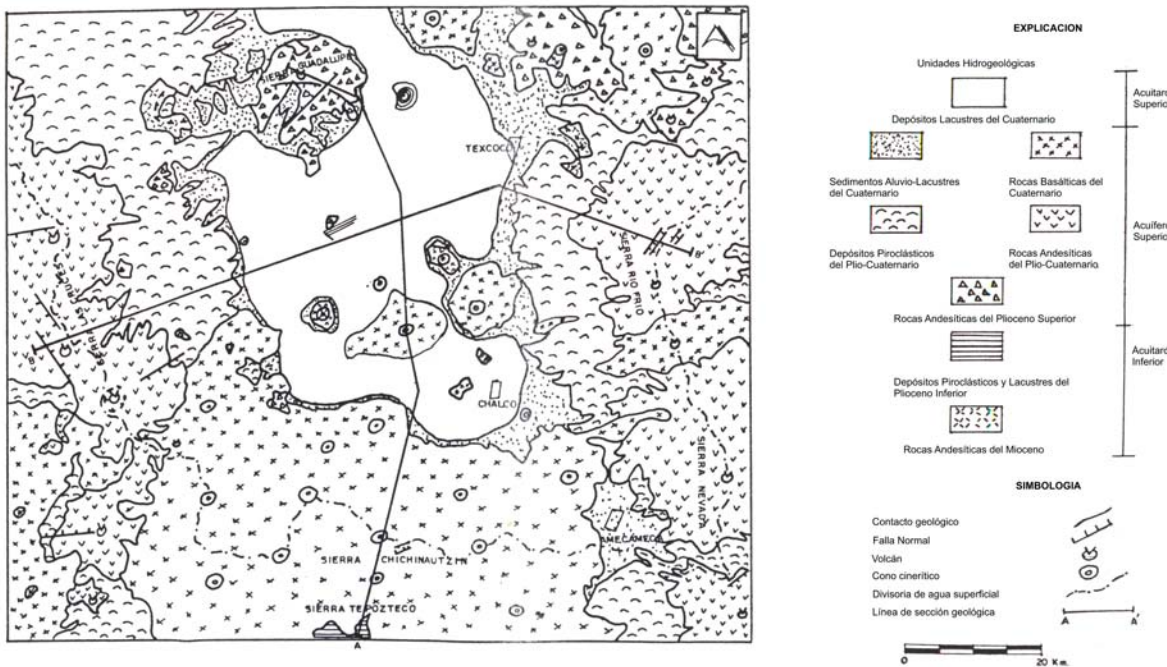


Figura No. 4.1. Unidades hidrogeológicas en la parte meridional de la Cuenca de México (Tomado de Vázquez-Sánchez, 1995)

En la Tabla No. 4.1 se presentan los valores de conductividad hidráulica media ( $K$  media) y conductividad hidráulica horizontal media ( $K_h$  media), la primera obtenida a través de un método estándar y la segunda por un modelo numérico de flujo de agua radial hacia un pozo (Vázquez-Sánchez, 1995). Cabe resaltar que hasta el momento no ha sido determinada la conductividad hidráulica para cada unidad geológica reconocida en la Cuenca de México, aspecto importante para análisis hidrogeológicos.



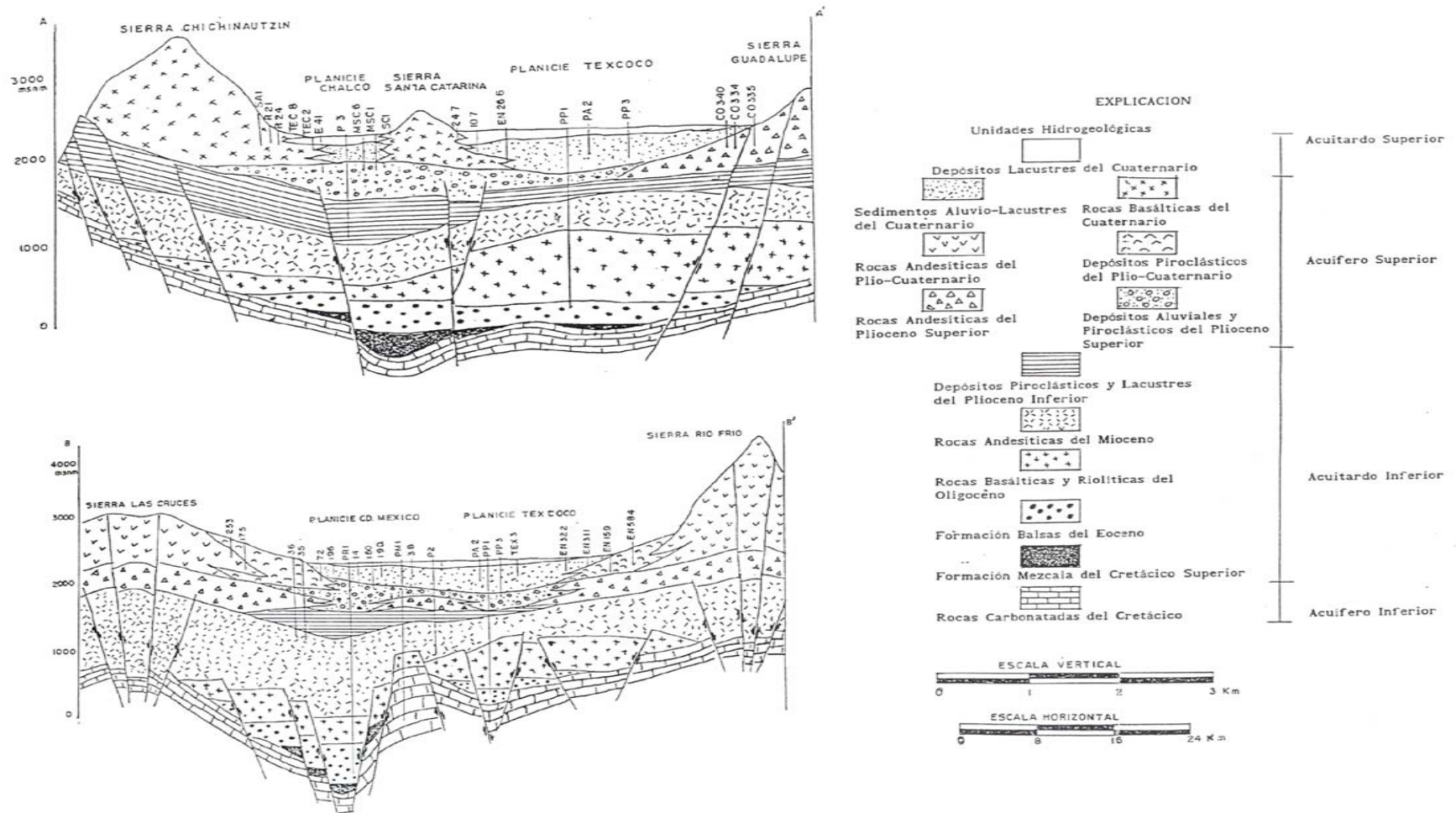


Figura No. 4.2. Modelo conceptual hidrogeológico de la parte meridional de la Cuenca de México (Tomado de Vázquez-Sánchez, 1995)

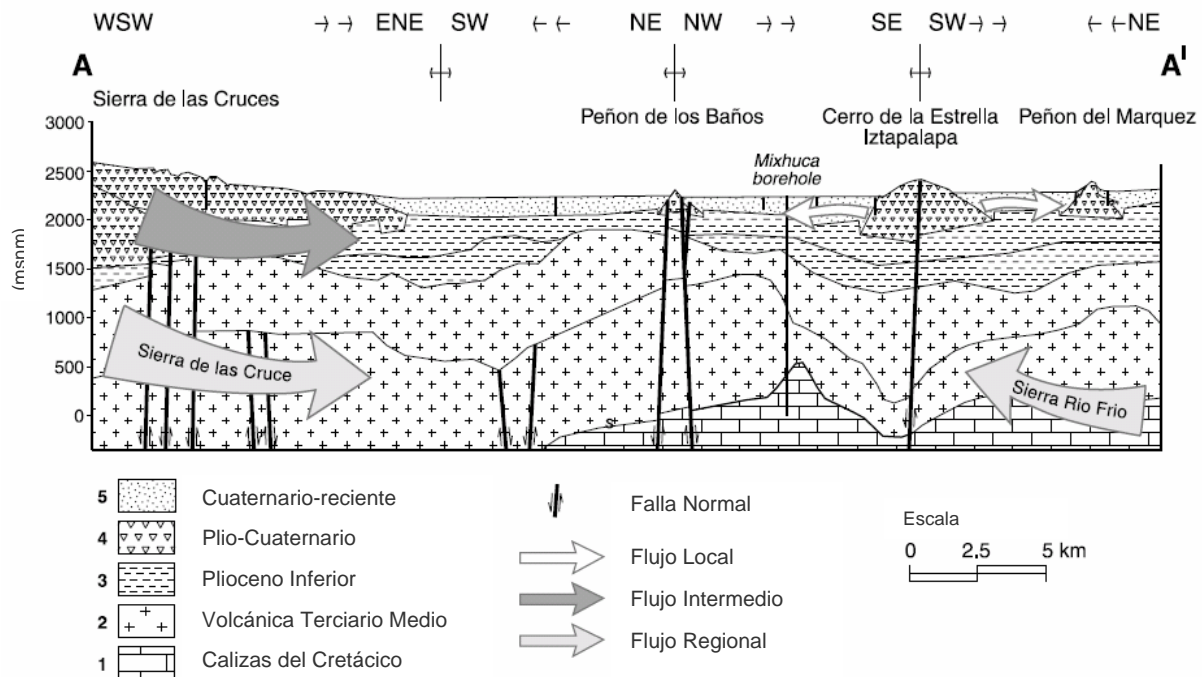
Tabla No. 4.1. Características hidráulicas de diferentes unidades hidrogeológicas

UNIDAD	K media (m/s)	Kh media (m/s)
Depósitos lacustres del Cuaternario	6.0E-09	
Sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario	3.7E-05	8.0E-05
Rocas basálticas del Cuaternario		4.9E-04
Depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario	8.0E-06	1.7E-05
Rocas volcánicas andesíticas del Plioceno Superior		1.4E-05
Depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno Superior		2.7E-05

(Tomado de Vázquez-Sánchez, 1995)

3) Edmunds *et al.* (2002) señalan que el sistema acuífero de la Ciudad de México consiste de un acuitardo altamente compresible (depósitos del Cuaternario-Reciente) parcialmente suprayaciendo un sistema acuífero heterogéneo y anisotrópico formado en depósitos de tipo granular y fracturado.

Así, el perfil hidro-estratigráfico está constituido por cinco unidades (Ver Figura No. 4.3), las cuales parecen corresponder con las descritas por Ortega y Farvolden (1989) ya indicadas. Los resultados de este estudio indican la existencia de los tres tipos de flujo (local, intermedio y regional) en la Cuenca de México, adicionalmente, se infiere que la recarga del flujo regional ocurre fuera del límite superficial de la misma, aproximadamente 120 – 150 km a la redonda, y por su parte, el flujo local descarga dentro de la cuenca. A continuación se describen las unidades hidrogeológicas definidas por Edmunds *et al.* (2002):



Tomado de Edmunds *et al.*, 2002

Figura No. 4.3. Sección hidrogeológica de la parte oeste de la Cuenca de México

a) Calizas del Cretácico

Esta es la unidad más profunda identificada en la cuenca, compuesta por caliza, arenisca y lutita, que aflora al sur del límite de la Cuenca de México, en los estados de Morelos e Hidalgo. Su espesor supera los 1,500 m en el centro de la cuenca (Mooser *et al*, 1997; tomado de Edmunds *et al*, 2002). Desde el punto de vista hidrogeológico, cabe resaltar que por ser la unidad más antigua reconocida hasta el momento, es considerada por diversos autores como el basamento del sistema acuífero, sin embargo, es importante recalcar que esta unidad de caliza, por sus características intrínsecas, propiedades cársticas y procesos que se generan durante la interacción roca-agua no debe ser interpretada como tal, por el contrario, puede ser una unidad permeable que permite el flujo de agua subterránea a gran profundidad y por distancias importantes, asociado al flujo regional.

b) Unidad volcánica del Terciario Medio

Esta unidad se encuentra constituida por material clástico del Eoceno, basalto y riolita del Oligoceno y andesita del Mioceno, cuyo espesor en conjunto es de 3,000 m aproximadamente. Estas rocas afloran en pocos lugares de la cuenca: en el centro poniente, en la Sierra del Tigre (Atizapán de Zaragoza) y en el centro oriente, en la Sierra de Tlaixpan (Texcoco); en cuanto a las rocas andesíticas del Mioceno, sus afloramientos más elevados se ubican hacia el centro de la cuenca, formando al norte de la ciudad el Cerro del Tepeyac y las elevaciones volcánicas de Barrientos. Desde el punto de vista hidrogeológico, estas rocas corresponden a una unidad acuífera perteneciente al sistema acuífero de la Ciudad de México, a pesar de no conocerse su conductividad hidráulica, se sabe que se extrae de manera continua varios cientos de litros de agua por segundo del secado de un distrito de mina en la parte norte de la Cuenca de México, en Pachuca, Hgo (Carrillo-Rivera *et al.*, 1999).

c) Depósitos del Plioceno Inferior

Esta unidad está compuesta por material lacustre y piroclástico, cuyo espesor total es de 600 m. Estos depósitos afloran en el norte de la cuenca por Huehuetoca, Taximay y Requena, desapareciendo hacia el sur bajo los rellenos aluviales (e) y las lavas pliocénicas intermedias y ácidas de las sierras de Tepozotán y Guadalupe (d) (Ángeles-Serrano, 2001). No existe información de las propiedades hidráulicas de esta unidad, sin embargo, de acuerdo con su litología se espera que esta unidad se comporte como un acuitardo.

d) Secuencia del Plio-Cuaternario

Esta es una unidad compuesta principalmente de andesita basáltica (cerros de La Estrella, Peñón de los Baños, Chimalhuacán), cuerpos dómicos de basaltos (sudeste de la Sierra de Guadalupe), andesita del Plioceno y piroclasto del Plio-Cuaternario (Sierra del Tepozteco, al oriente de Cuernavaca) y se encuentran interestratificadas con depósitos lacustre y aluvial contemporáneos. Su espesor total es de aproximadamente 1,000 m.

e) Depósitos del Cuaternario-reciente

Esta unidad cubre totalmente la planicie de la cuenca, comprende 600 m de depósitos aluvial y fluvial, dentro de estos depósitos se incluye un lente de material fino cuya parte superior aflora en el Lago de Texcoco pero subyace el resto de la planicie excepto en sus márgenes. Esta unidad está representada principalmente por microfósiles, ceniza volcánica y en menor extensión, arcilla lacustre interstratificada con arena, limo y ocasionalmente grava, su espesor total incrementa gradualmente desde el límite de la planicie hacia el Lago de Texcoco alcanzando aproximadamente 300 m. Desde el punto de vista hidrogeológico, esta unidad forma el principal acuitardo, altamente compresible, de conductividad hidráulica de  $6 \times 10^{-6}$  a  $10^{-9}$  m/s (Vázquez-Sánchez, 1995) y coeficiente de almacenamiento de 0.05 – 0.95 (Rudolph, 1989, tomado de Huizar *et al.*, 2004), confinando así la parte local de las unidades acuíferas del sistema acuífero de la Ciudad de México.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la porción que se capta del acuífero de las unidades d) y e) presenta una conductividad hidráulica horizontal que varía de  $1.5 \times 10^{-3}$  a  $8.1 \times 10^{-8}$  m/s, conductividad hidráulica vertical de  $3 \times 10^{-5}$  a  $10^{-6}$  m/s y coeficiente de almacenamiento de  $4 \times 10^{-4}$  a  $7 \times 10^{-5}$  y  $7.3 \times 10^{-2}$  a  $1.7 \times 10^{-1}$ , para condiciones confinadas y no confinadas respectivamente.

### **4.3. ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO**

#### **4.3.1. Características Químicas**

Teniendo en cuenta el particular interés para el sistema de pago por servicios ambientales hidrológicos de delimitar zonas de recarga y beneficiados directos por la misma, en el presente estudio se incorporan técnicas hidrogeoquímicas, que permiten identificar diferentes sistemas de flujo de agua subterránea basándose en la calidad química del agua como resultado de la interacción del agua con las rocas por las que fluye a lo largo de todo el trayecto, dependiendo de la profundidad y temperatura que logre alcanzar el agua durante su recorrido por el subsuelo.

Debido al limitado número de manantiales y ausencia de pozos en las áreas específicas de estudio, se llevó a cabo un muestreo de agua subterránea en el territorio de interés, en los sitios más cercanos a los ejidos beneficiados por el PSAH, que por sus características era posible su realización. En total se tomaron 15 muestras, de las cuales siete corresponden con manantiales (dos de ellas a arroyos) y ocho con pozos (*Ver Figura No. 4.4*).

La metodología empleada para la elaboración del muestreo fue descrita en el capítulo 1, donde igualmente se señalan algunos inconvenientes encontrados en el territorio para la elaboración del muestreo y pruebas de bombeo. Los resultados analíticos fisico-químicos de los laboratorios donde fueron enviadas las muestras se aprecian en el *Anexo No. 3*, no obstante, la *Tabla No. 4.2* muestra un resumen de los principales y más útiles valores analíticos y físicos obtenidos en campo.

Tabla No. 4.2. Tabla resumen de los principales resultados analíticos fisicoquímicos

<b>Símbolo</b>	pH	T agua	STD	Na	Mg	K	Ca	F	Cl	HCO3	NO3 (as N)	SO4	Error
<b>Unidades</b>		°C	mg/l	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	%
<b>Límite de detección</b>				0.005	0.001	0.03	0.7	0.01	0.03		0.01	0.03	
16 Justina 2	6.35	20.20	1035.7	120	39.4	13.3	54.4	0.52	37.9	600.24	1.4	22.8	0.59
237 Panotla (2)	6.83	19.10	1002.1	24.8	25	12.2	67.9	0.3	6.33	402.6	1.48	23.9	-3.07
Nativitas (3)	7.40	20.90	753.7	46.8	33.3	15.2	51.1	0.58	25.2	322.08	12.6	25.9	8.34
208 Tetla	7.36	18.70	178.7	29.2	20.6	4.19	25.2	0.44	4.93	275.72	< 0.01	13.2	-6.50
221 Tlalancalek	7.39	19.90	504.5	57.8	25.9	11.7	30.4	0.91	4.9	305	1.2	5.01	10.43
DAM TEX 3	7.81	19.10	397.2	16.1	14.6	7.48	28.8	0.51	5.72	173.24	3.11	3.97	6.78
230 M Tlal 2	7.34	14.90	60.1	11.2	8.29	3.11	5.8	0.17	1.26	92.72	0.32	1.87	-1.78
265 Salvador V3	6.60	12.00	86.1	10.1	7.5	3.49	8.5	0.24	1.89	47.82	1.06	5.66	24.37
214 El Salto	7.39	10.60	28.2	5.17	3.01	1.71	3.8	0.03	0.51	30.5	0.06	1.96	11.97
22 Cuahutemoc	7.08	12.50	30.9	6.15	3.33	1.91	4.1	0.06	0.52	67.1	0.05	1.02	-17.64
18 Guadalupe 2	6.48	17.70	304.0	26.6	28.1	4.47	28.3	0.34	12.4	136.64	12.5	54.2	14.68
Atotonilco 3	5.93	23.70	1534.1	42.2	70.5	15.5	86.7	0.1	4.81	610	1.2	2.8	9.64
Montealegre 01	7.34	9.50	29.7	4.2	1.9	3.9	4.2	0.19	1.3	24.4	0.22	7.2	5.02
Montealegre 02	6.90	17.10	19.8	2.99	1.37	1.24	2.8	0.37	0.76	9.76	0.11	6.62	12.96
Montealegre 03	6.67	13.20	18.6	3.44	1.08	1.82	2.9	0.1	0.67	19.52	0.07	3.97	0.99
MA' 01	7.34	9.50	29.7	4.2	1.9	3.9	4.2	0.19	1.3	27.82	0.22	7.2	0.47
MA' 02	6.90	17.10	19.8	2.99	1.37	1.24	2.8	0.37	0.76	16.59	0.11	6.62	-2.00
MA' 03	6.67	13.20	18.6	3.44	1.08	1.82	2.9	0.1	0.67	22.45	0.07	3.97	-4.40

El análisis hidrogeoquímico se basa en el estudio y comparación de los resultados de laboratorio para los diferentes elementos que componen el agua junto con los parámetros físicos medidos en campo, basándose en la relación existente entre los mismos y efectuando una serie de cálculos químicos correspondientes.

Cabe resaltar que se elaboró una segunda prueba de alcalinidad en el laboratorio LAFQA del Instituto de Geografía para las muestras de Montealegre (1, 2 y 3) para comprobar los datos medidos en campo (Ver Anexo No. 4), ya que se tenía duda con respecto a los aparatos; los valores obtenidos, a partir del método de Gran, de alcalinidad total y bicarbonatos difieren en pocas cantidades en las muestras 1 y 3, la 2 por su parte, es la que presenta mayor discrepancia, alcanzando diferencias hasta casi el doble (Ver Tabla No. 4.3).

El análisis hidrogeoquímico incluye los dos resultados obtenidos (campo y laboratorio) para visualizar algún posible efecto y comprobar si la metodología aplicada para determinar alcalinidad es la más apropiada.

Tabla No. 4.3. Comparación de valores de alcalinidad total (mg/l CaCO<sub>3</sub>) y bicarbonatos (mg/l) de mediciones de campo y laboratorio

Prueba en campo			Prueba en laboratorio		
Muestra	Alc	HCO <sub>3</sub>	Muestra	Alc	HCO <sub>3</sub>
Montealegre 1	20	24.4	MA1'	22.8	27.82
Montealegre 2	8	9.76	MA2'	14.4	17.57
Montealegre 3	16	19.52	MA3'	18	21.96

Una forma para determinar la confiabilidad de los datos que se tienen es la validación de los mismos a través de la condición de electroneutralidad o más conocida como el cálculo del porcentaje (%) de error (Ver resultados en la Tabla No. 4.2), cuya fórmula es:

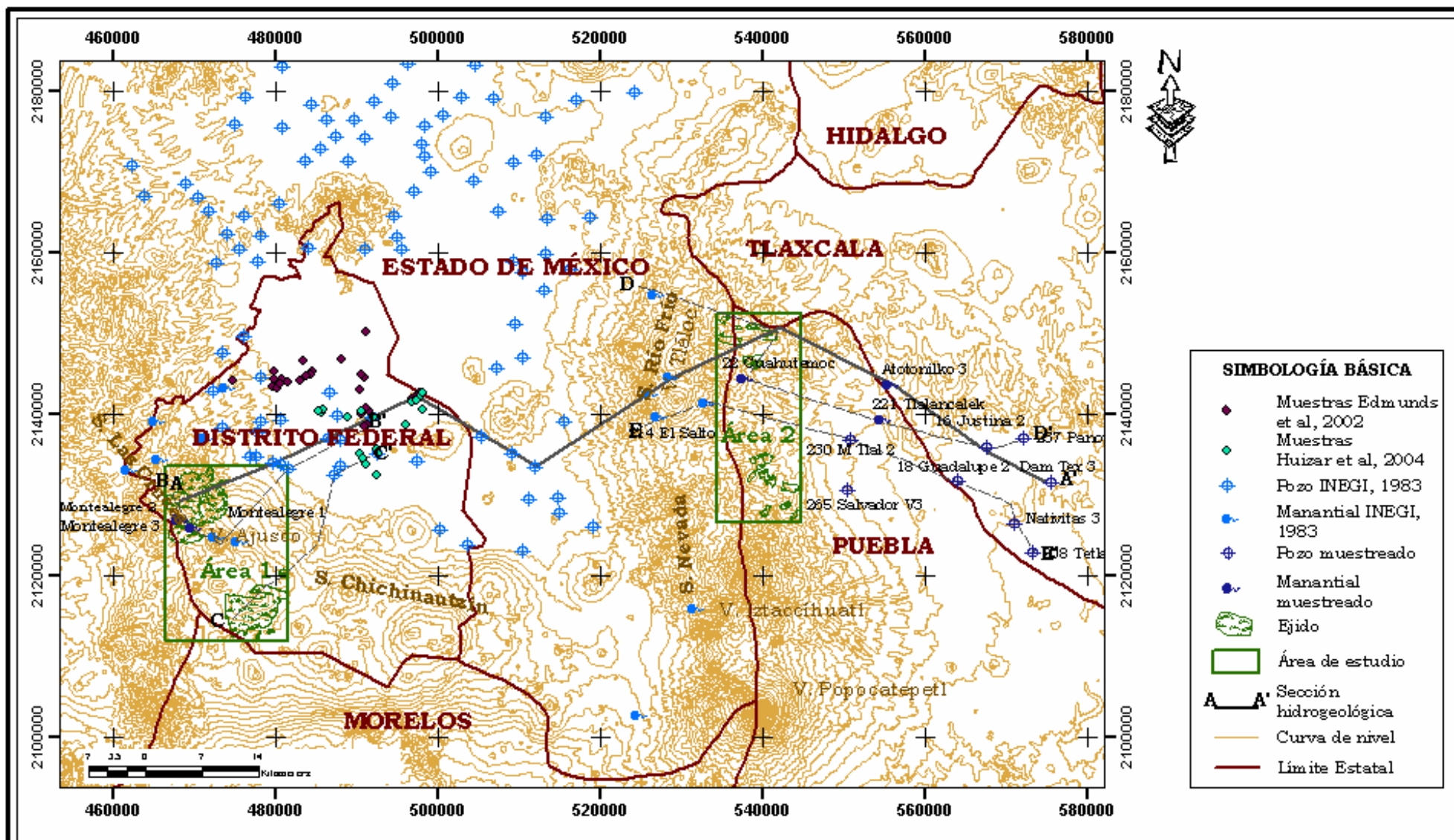


FIGURA No. 4.4. UBICACIÓN SITIOS DE MUESTREO

PROCESO DE RECARGA-DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ZONAS RECEPTORAS DE PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO, SIERRAS NEVADA Y LAS CRUCES - MÉXICO

LILIANA ANDREA PEÑUELA ARÉVALO

2007

TERRITORIO DE ESTUDIO



POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

$$\%error = \frac{\sum cationes + \sum aniones}{\sum cationes - \sum aniones} \times 100$$

Los cationes que generalmente se tienen en cuenta son el magnesio, calcio, sodio y potasio, por su parte, los aniones que se utilizan para el cálculo son el bicarbonato, nitrato, cloruro y sulfato. El porcentaje de error se determina usando unidades de meq/l y su resultado debe ser menor a 5 para considerar los datos confiables, no obstante, diversos investigadores consideran aceptable un error de hasta el 10 %.

En el presente estudio se aprecian valores que superan dicho porcentaje tolerable, es el caso de las muestras 265 Salvador V3, 214 El Salto, 22 Cuahutemoc, 18 Guadalupe 2 y Montealegre 02, sin embargo el nuevo cálculo de alcalinidad en laboratorio de esta última muestra permitió disminuir su porcentaje de error, por lo que posiblemente el valor de bicarbonato es el principal parámetro que afecta el cálculo, teniendo en cuenta que es la única de las variables que se mide directamente en campo y puede estar sujeta a mayor alteración debido a la calibración de los aparatos, o bien, error humano; en cambio los demás parámetros son medidos en laboratorio, con técnicas estandarizadas y es más difícil que se genere un error.

Una segunda prueba de alcalinidad se pretendía realizar en el laboratorio LAFQA para dichas muestras con un error > 10 %, sin embargo, se presentaron ciertos inconvenientes durante el primer envío de muestras al laboratorio de Canadá donde tuvo que enviarse nuevamente tres muestras, ya que se perdieron en el traslado (22 Cuahutemoc, 221 Tlalancalek y 18 Guadalupe 2), por lo que la nueva prueba de alcalinidad se realizó sólo a la muestra con mayor porcentaje de error debido a que la 214 El Salto presentaba una pequeña burbuja de aire, la cual alteraría los nuevos resultados. De esta manera, se obtuvo un nuevo valor de bicarbonatos de 74.26mg/l para la muestra 265 Salvador V3, cuyo cálculo de condición de electroneutralidad presenta un error del 6.2%.

Teniendo en cuenta esta notable disminución del error se cree que efectivamente el bicarbonato influye considerablemente en su cálculo, por lo que es necesario mejorar la técnica de campo para obtener la alcalinidad y bicarbonato, o bien, realizar la prueba tanto en campo como en laboratorio recién se tomen las muestras.

A pesar de esta problemática observada con respecto al porcentaje de error y su aparente correlación con el valor de bicarbonato, se considera que el análisis hidroquímico del presente estudio es válido debido a que se basa en diferentes elementos, revelando correspondencia con diversos aspectos tales como litología, geotermómetros, isótopos, entre otros; asimismo, no existe ningún análisis específico en el que sólo se emplee el bicarbonato como indicador.

Adicionalmente, los laboratorios requieren de un control de calidad, el cual consiste de hacer un número al azar de muestras por duplicado, haciendo de esta manera, los resultados aún más confiables; en la *Tabla No. 4.4* se aprecia un ejemplo de este proceso de duplicado. A pesar de no corresponder con la totalidad

de muestras que presentan un alto porcentaje de error, se cuenta con la muestra 214 El Salto, la cual tiene un error de los de mayor orden (11.97%) y Atotonilco 3, asimismo, se incluye una muestra adicional, correspondiente a la República de Argentina, que no está relacionada con el territorio de estudio pero que muestra la eficacia del equipo del laboratorio. Así, se tiene mayor seguridad en los datos suministrados por el laboratorio que en aquella medición de bicarbonato realizado en campo, técnica que debe ser revisada y mejorada para minimizar los posibles errores en el cálculo de la alcalinidad y bicarbonatos.

De acuerdo con lo anterior, en el *Anexo No. 3*, para la muestra 265 Salvador V3, se presenta el valor obtenido de bicarbonato por parte del laboratorio LAFQA y su respectivo cálculo de error.

*Tabla No. 4.4. Control de calidad por parte del laboratorio, datos de muestras duplicadas*

<b>Símbolo</b>	Na	Mg	K	Ca	F	Cl	NO <sub>2</sub> (as N)	Br	NO <sub>3</sub> (as N)	PO <sub>4</sub> (as P)	SO <sub>4</sub>
<b>Unidades</b>	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<b>Límite de detección</b>	5	1	30	700	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03
214 El Salto AC Rep Orig	5110	2980	1700	3700	--	--	--	--	--	--	--
214 El Salto AC Rep Dup	5240	3030	1720	3800	--	--	--	--	--	--	--
214 El Salto -fin	5170	3010	1710	3800	--	--	--	--	--	--	--
Atotonilco 3 Rep Orig	--	--	--	--	0.2	4.83	0.03	< 0.07	1.2	< 0.05	2.79
Atotonilco 3 Rep Dup	--	--	--	--	0.1	4.8	0.03	< 0.07	1.2	0.1	2.8
Atotonilco 3-fin	--	--	--	--	0.1	4.81	0.03	< 0.07	1.2	< 0.05	2.8
10 Rep Orig	--	--	--	--	0.98	71.3	< 0.02	0.2	5.58	< 0.05	251
10 Rep Dup	--	--	--	--	1	71.7	< 0.02	0.2	5.61	< 0.05	252

La temperatura del agua es considerada un trazador natural que permite la identificación de flujos de agua subterránea, correspondiendo las temperaturas más frías con flujos someros y las temperaturas altas con flujos profundos (Edmunds *et al*, 2002; Van-Lanen y Carrillo-Rivera, 1998). Así, se realizaron gráficos de diversos parámetros fisicoquímicos para determinar el funcionamiento del flujo de agua subterránea y delimitar grupos de agua.

En la *Tabla No. 4.5* se aprecia el tipo de agua correspondiente a cada muestra tomada según los resultados obtenidos a través del uso del programa AQUACHEM 3.70. Se observa cierta similitud entre las muestras que permite dar una primera idea en cuanto a los grupos posibles existentes, basados en la variación de la composición química, la cual posiblemente depende del grado de interacción entre agua y roca, así como de la composición misma de la litología presente en el territorio de interés.

La definición de grupos se basó en el análisis de las *Figuras No. 4.5 y 4.6*, obtenidas por medio del AQUACHEM 3.70. En cuanto a sólidos totales disueltos (STD), las muestras tomadas presentan contenidos que van de 18.6 mg/l en Montealegre 3 a 1534.7 mg/l en Atotonilco 3, como se aprecia se tiene una gran variabilidad en los valores de STD, los cuales aumentan con la temperatura del agua, que varía de 9.5°C en Montealegre 1 a 23.7°C en Atotonilco 3 (*Ver Figura No. 4.5 b*) indicando diferencias que permiten establecer la presencia de diversos grupos y diferentes sistemas de flujo de agua subterránea.



Tabla No. 4.5. Tipo de agua para cada muestra colectada en campo

<b>MUESTRA</b>	<b>TIPO</b>
208 Tetla	Mg-Na-Ca-HCO <sub>3</sub>
214 El Salto	Mg-Na-Ca-HCO <sub>3</sub>
22 Cuahutemoc	Mg-Na-Ca-HCO <sub>3</sub>
265 Salvador V3	Mg-Na-Ca-HCO <sub>3</sub>
Montealegre 3	Na-Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
16 Justina 2	Na-Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>
221 Tlalancalek	Na-Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>
Nativitas 3	Mg-Ca-Na-HCO <sub>3</sub>
Dam Tex 3	Ca-Mg-Na-HCO <sub>3</sub>
230 M Tlal 2	Mg-Na-HCO <sub>3</sub>
Atotonilko 3	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>
237 Panotla 2	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
Montealegre 1	Ca-Na-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
Montealegre 2	Ca-Na-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
18 Guadalupe 2	Mg-Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>

Con base en la composición química se diferenciaron tres grupos, éstos son:

Grupo 1: flujo local, muestras 214 El Salto, 265 Salvador V3, 22 Cuahutemoc, 230 M Tlal 2, Montealegre 1, 2 y 3; localizadas en las partes más altas del terreno de interés, prevalecen en las áreas de estudio (puntos más cercanos a los ejidos); en su mayoría corresponden con agua de manantial, con temperaturas que van de los 9.5 a los 17°C aproximadamente, y con concentración de sodio y cloruro de 3 – 11.2 mg/l y 0.5 – 1.9 mg/l respectivamente.

Grupo 2: flujo de mezcla (local e intermedio), muestras 208 Tetla, 18 Guadalupe 2, Dam Tex 3 y 237 Panotla 2; pozos localizados al este de la Cuenca de México, en el piedemonte de la Sierra Nevada, Estado de Tlaxcala. El agua de este grupo presenta mayor temperatura (17.7 – 19.1°C), y mayor concentración de sodio (16.1 – 29.2 mg/l) y cloruro (4.9 – 12.4 mg/l) que el grupo 1.

Grupo 3: flujo intermedio, muestras 221 Tlalancaleka, Atotonilko 3 (manantiales), Nativitas 3 y 16 Justina 2 (pozos), muestras localizadas al este de la Cuenca de México, en los Estados de Puebla y Tlaxcala. Este grupo se caracteriza por presentar los valores más altos de temperatura (19.9 – 23.7°C), y mayor concentración de sodio (42.2 – 120 mg/l) y cloruro (4.8 – 37.9 mg/l), parámetros que indican un tipo de agua con mayor recorrido que aquella de los grupos 1 y 2. A pesar de ser clasificadas las muestras en un mismo grupo, existen diferencias marcadas entre éstas, lo cual será discutido posteriormente.

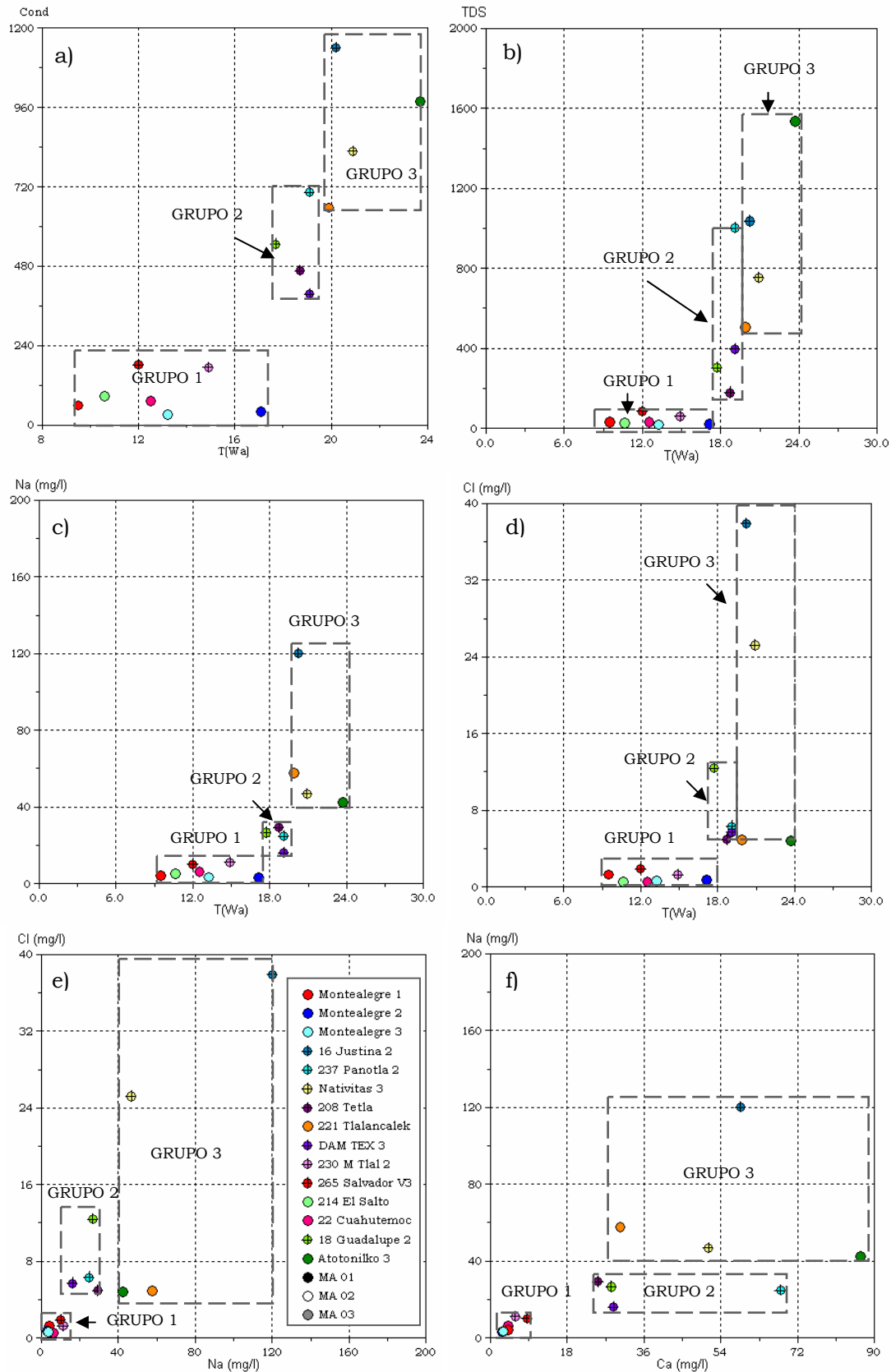


Figura No. 4.5. a) Relación temperatura (°C) y conductividad ( $\mu$ S) b) Relación temperatura (°C) y STD (mg/l); a) Relación temperatura (°C) y sodio; b) Relación temperatura (°C) y cloruro; c) Relación sodio y cloruro; d) Relación calcio y sodio;

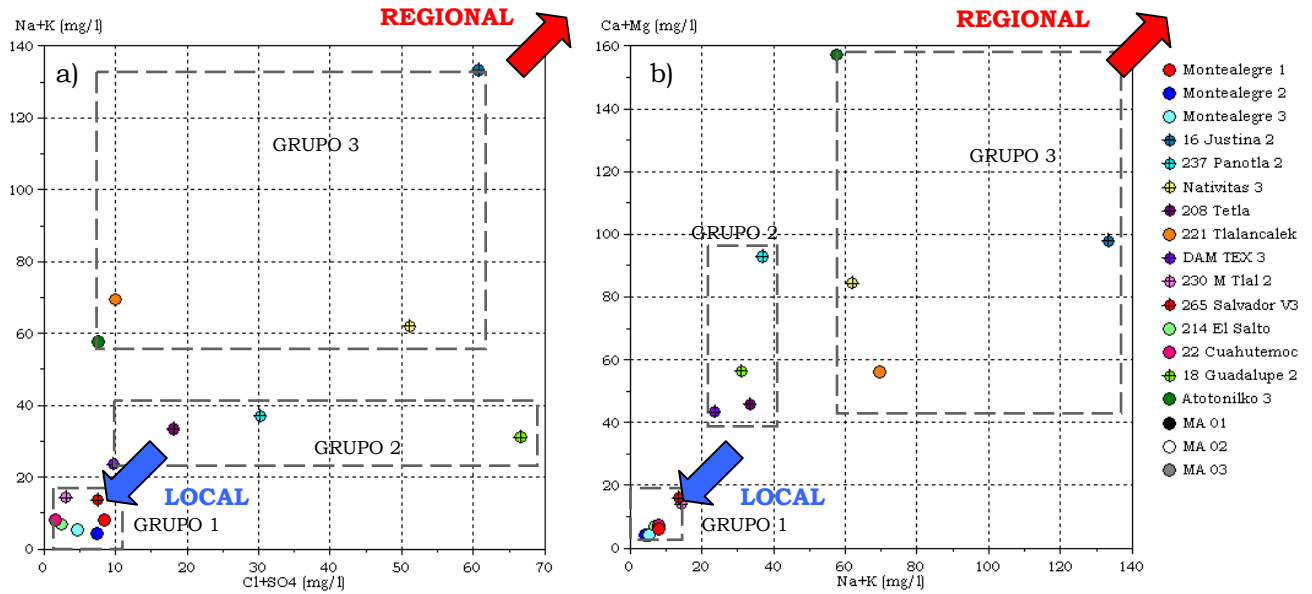


Figura No. 4.6. a) Relación  $(Cl+SO_4)$  y  $(Na+K)$ ; b) Relación  $(Na+K)$  y  $(Ca+Mg)$

La Figura No. 4.7 exhibe dos diagramas tipo Schoeller donde se aprecia la diferencia entre el grupo 1 y los restantes. En la Figura No. 4.7 a) se presentan las muestras pertenecientes al grupo 1 (flujo Local) y la Figura No. 4.7 b) muestra los grupos 2 y 3 (Flujo de mezcla e intermedio).

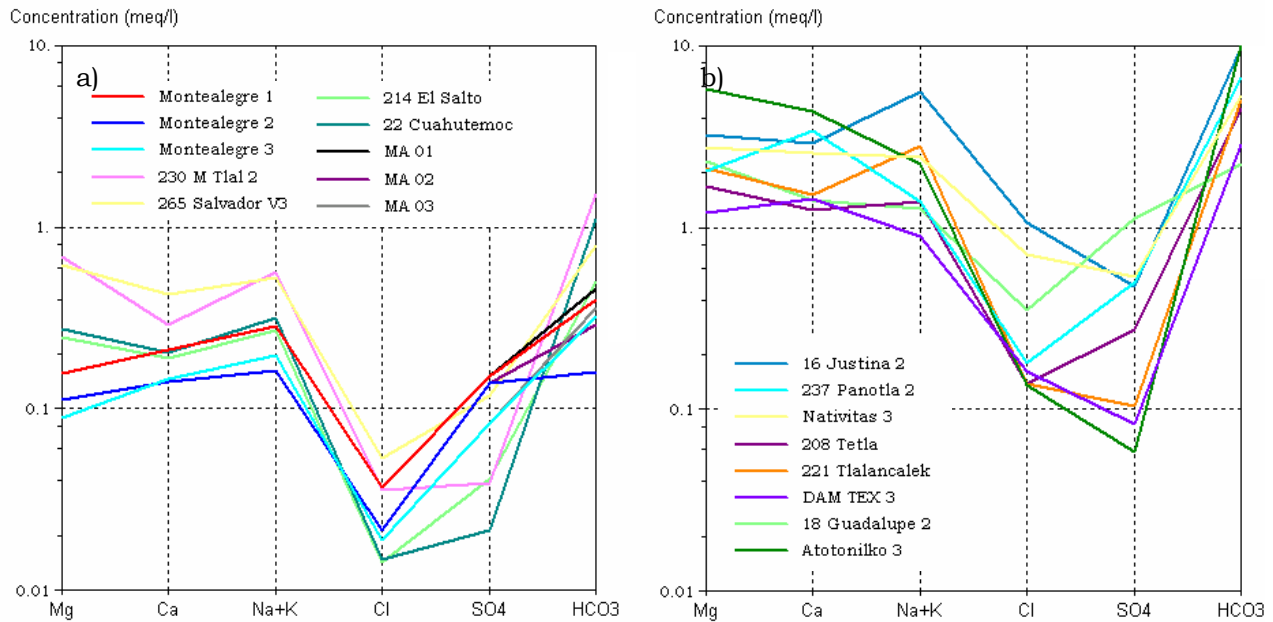


Figura No. 4.7. Diagramas Schoeller

En general, las aguas muestreadas son bicarbonatadas desde el punto de vista de los aniones (Ver Figura No. 4.8) con presencia de sulfatos en las muestras 18 Guadalupe 2 y las Montealegre 1 y 2. Con respecto a los cationes, el agua es de tipo mixto, donde no hay prevalencia de ningún catión. Adicionalmente, se tienen altas concentraciones de estroncio en las muestras 208 Tetla, 18 Guadalupe 2, Dam Tex 3, 237 Panotla 2, 16 Justina 2, Nativitas 3, 221 Tlalancalek y Atotonilko 3 (Ver Figura No. 4.9), lo que sugiere que estas muestras entraron en contacto con las calizas cretácicas a profundidad, ya que el estroncio se considera trazador en este sentido.

Así, se observa que las muestras anteriormente clasificadas como de flujo de mezcla e intermedio corresponden con aquellas con alta presencia de estroncio, por su parte, aquellas muestras definidas como de flujo local, cuyo contenido de estroncio es muy bajo, indica que su agua no alcanzó a interactuar con las calizas del Cretácico.

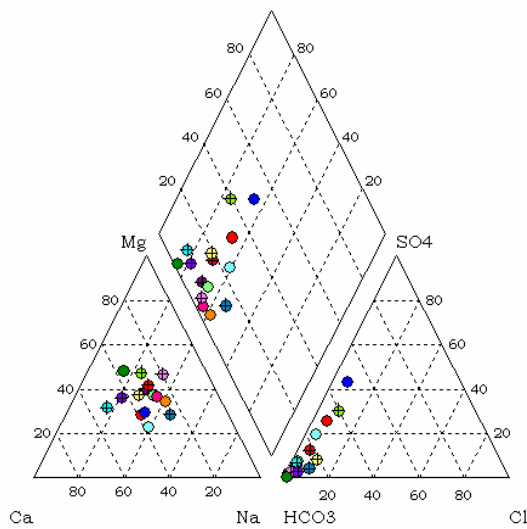


Figura No. 4.8. Diagrama Piper

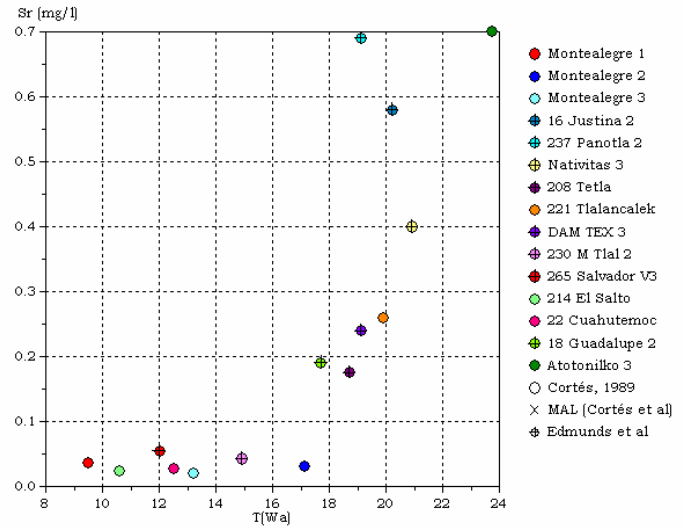


Figura No. 4.9. Relación temperatura y estroncio

El contenido de iones menores, como fluoruro y litio, está asociado principalmente con la interacción agua-roca y tiempo de residencia del agua respectivamente. La cantidad de fluoruro en el agua depende tanto de la litología por donde el agua circula, como de las características fisicoquímicas del agua, así, por ejemplo, un contenido bajo de calcio en el agua permitiría una mayor solubilidad de fluoruro (Carrillo-Rivera et al, 2002).

A pesar que las muestras del presente estudio no superan el límite máximo permisible de fluoruro para agua potable (1.5 mg/l), se aprecia una diferencia en los valores de fluoruro y Litio que permiten analizar y corroborar los grupos definidos previamente (Ver Figura No. 4.10). Los grupos I y II parecen corresponder con la clasificación realizada, sin embargo, las muestras del grupo 3 presentan diferencias significativas y contrastantes, por lo que no se incluye en la grafica el límite del grupo.

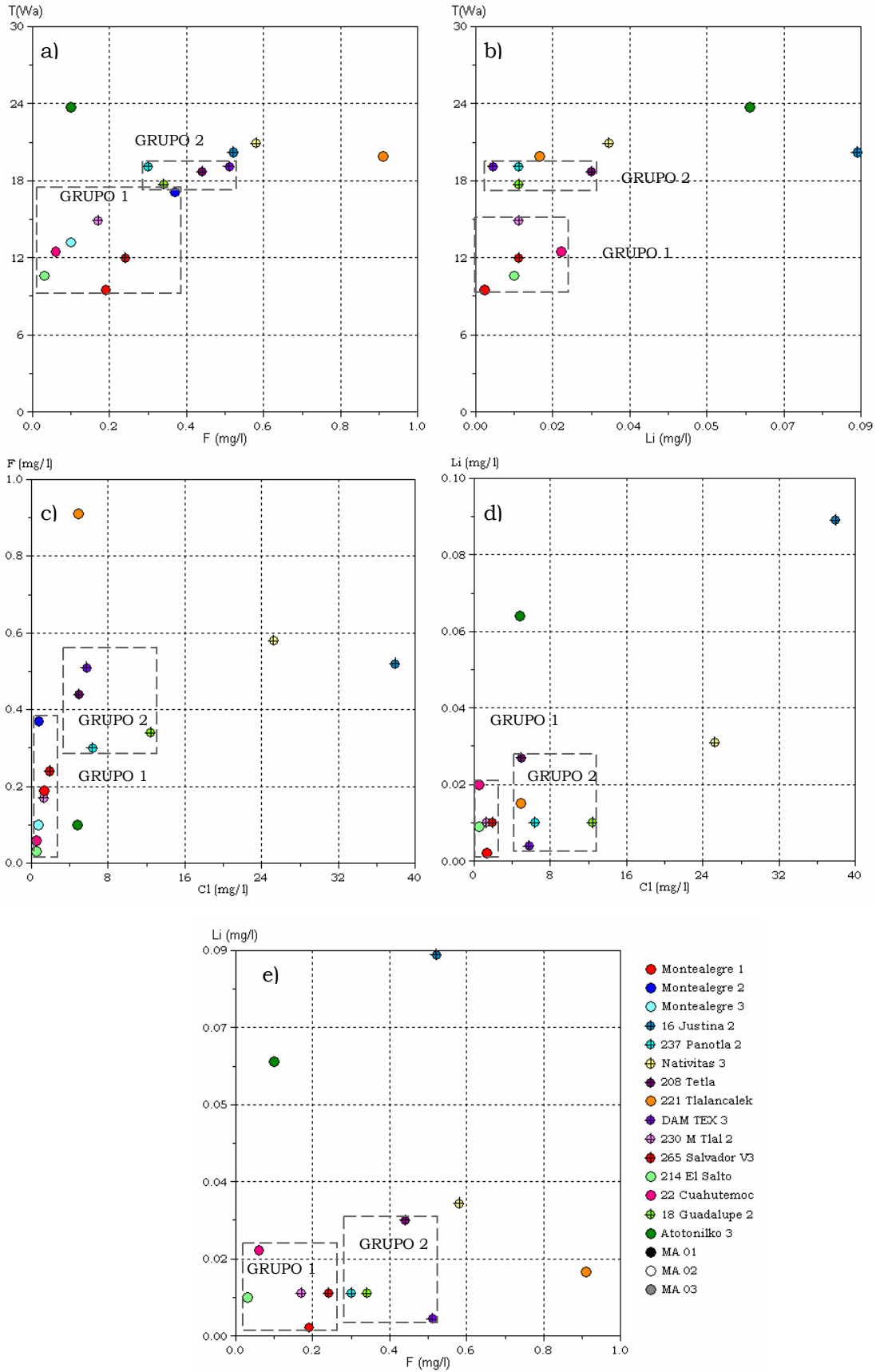


Figura No. 4.10. a) Relación fluoruro y temperatura (°C); b) Relación litio y temperatura (°C); c) Relación cloruro y fluoruro; d) Relación cloruro y litio; e) Relación fluoruro y litio

La muestra Atotonilko 3 presenta una alta concentración de litio pero valores muy bajos de fluoruro (similar al grupo 1), la muestra 221 Tlalancalek al contrario exhibe valores altos de fluoruro y bajos de litio, por su parte, las muestras 16 Justina 2 y Nativitas 3 presentan contenidos de fluoruro cercanos pero la primera presenta la mayor concentración de litio; estas diferencias que se encontraron con el uso de los iones menores permite apreciar diversas condiciones en los recorridos del agua en el subsuelo, lo cual deberá ser analizado para conocer la dinámica del agua subterránea.

### GEOTERMÓMETROS

El agua subterránea aumenta su temperatura a medida que desciende a través del subsuelo por efectos del gradiente geotérmico y/o una fuente de calor adicional que reacciona con la roca encajante. Para obtener los valores de la temperatura mínima de equilibrio, se emplean geotermómetros, los cuales se basan en la composición química y las diferentes reacciones teóricas que se generan, permitiendo determinar la última temperatura de equilibrio a profundidad y así, con base en ésta se puede deducir la profundidad mínima de recorrido del agua.

Existen diversos geotermómetros, los cuales pueden ser agrupados en dos tipos generales: 1) aquellos basados en la solubilidad del sílice y otros polimorfos del mismo (calcedonia, cristobalita y sílice amorfa) y 2) aquellos basados en las relaciones de dos o más constituyentes en solución (ej Na-K o Na-K-Ca).

Giggenbach (1988) propuso un índice de madurez (IM), el cual permite establecer la confiabilidad del uso de geotermómetros de cationes (Na-K-Mg). En la *Tabla No. 4.6* se presentan los índices de madurez para las muestras del presente estudio. Todas las muestras exhiben un índice de madurez menor a dos, por lo que, según Giggenbach (1988) y Gemici *et al* (2004), no es recomendable usar el tipo de geotermómetros de cationes ya que corresponden a aguas inmaduras que no han alcanzado un equilibrio con la roca.

En cuanto a los geotermómetros de sílice (SiO<sub>2</sub>), se escogió trabajar con el de calcedonia, ya que es uno de los más recomendados para agua de baja temperatura. Sin embargo, en el presente trabajo sólo se realiza el cálculo de la temperatura de equilibrio a las muestras de agua del grupo 1 y 3, pertenecientes posiblemente a flujo local e intermedio respectivamente, considerando el supuesto básico del uso de geotermómetros que se refiere a que el agua no debe ser de mezcla.

*Tabla No. 4.6. Índice de madurez calculado para cada muestra*

<b>MUESTRA</b>	<b>MI</b>
16 Justina 2	1.161
237 Panotla (2)	0.552
Nativitas (3)	0.753
208 Tetla	0.821
221 Tlalancalek	0.922
DAM TEX 3	0.517
230 M Tlal 2	0.578
265 Salvador V3	0.528
214 El Salto	0.477
22 Cuahutemoc	0.520
18 Guadalupe 2	0.728
Atotonilko 3	0.603
MONTEALEGRE 01	0.317
MONTEALEGRE 02	0.398
MONTEALEGRE 03	0.430

Asimismo, las tres muestras de Montealegre no son incluidas debido a que se considera que estas aguas no viajaron a profundidad.

En la *Tabla No. 4.7* se aprecian las temperaturas de equilibrio obtenidas a través del programa AQUACHEM. Como se indicó previamente, la temperatura calculada con geotermómetros, junto con el gradiente geotérmico existente en el área, permite el cálculo de la profundidad mínima alcanzada por el agua. Así, en este trabajo se empleó el gradiente geotérmico promedio de la corteza terrestre ( $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ), debido a que no se cuenta con un valor representativo de las áreas bajo estudio. El cálculo de la profundidad se realiza con base en la diferencia de temperaturas, aquella ambiental medida en el aprovechamiento y la calculada por geotermómetros; el resultado se presenta en la *Tabla No. 4.7*.

*Tabla No. 4.7. Resultados de temperatura de equilibrio y profundidad*

<b>MUESTRA</b>	<b>T (°C) Agua</b>	<b>T (°C) Ambiente</b>	<b>T (°C) Calc</b>	<b>Diferencia de T (°C)</b>	<b>Profundidad (m) calculada</b>
16 Justina 2	20.2	18	95	77	2,567
Nativitas (3)	20.9	18	89	71	2,367
221 Tlalancalek	19.9	18	93	75	2,500
230 M Tlal 2	14.9	20	74	54	1,800
265 Salvador V3	12	20	69	49	1,633
214 El Salto	10.6	20	61	41	1,367
22 Cuahutemoc	12.5	11	61	50	1,667
Atotonilko 3	23.7	19	111	92	3,067

El análisis de los resultados obtenidos de la profundidad mínima de flujo, contenido de litio y estroncio, y la litología de la cuenca, permite suponer que el bajo contenido de fluoruro de la muestra Atotonilko 3 que se indicaba con anterioridad se debe a que su flujo de agua subterránea asociado alcanza 3,067m, desplazándose por la caliza cretácica, que le atribuye a la muestra, el alto contenido de calcio y bajo fluoruro, ya que al mezclarse el fluoruro con el calcio, se precipita y por ende, la concentración de fluoruro en el agua se ve disminuida.

Para corroborar dicha hipótesis se realizó el cálculo del índice de saturación (IS) a través del programa Phreeqc for windows. A través del IS se determina el estado de equilibrio de la solución con relación a diversos minerales, en este caso, la fluorita ( $\text{CaF}_2$ ). Los resultados señalan que todas las muestras se encuentran subsaturadas (*Ver Figura No. 4.11*), lo que indica que no existe la posibilidad de precipitación de fluoruro, por el contrario, el agua estaría en capacidad de disolver la fluorita, lo que originaría un posible enriquecimiento de fluoruro. De esta manera, se descarta esta hipótesis y se cree que, simplemente el flujo de agua de las muestras 221 Tlalancalek, Nativitas 3 y 16 Justina 2 se realizó a través de rocas de carácter más ácido (dacítica a riolítica) que aquella litología asociada con el flujo de la muestra Atotonilko 3, exhibiendo así, diferencias en la composición litológica, que debe ser estudiada detalladamente para asegurar con mayor certeza tal suposición.

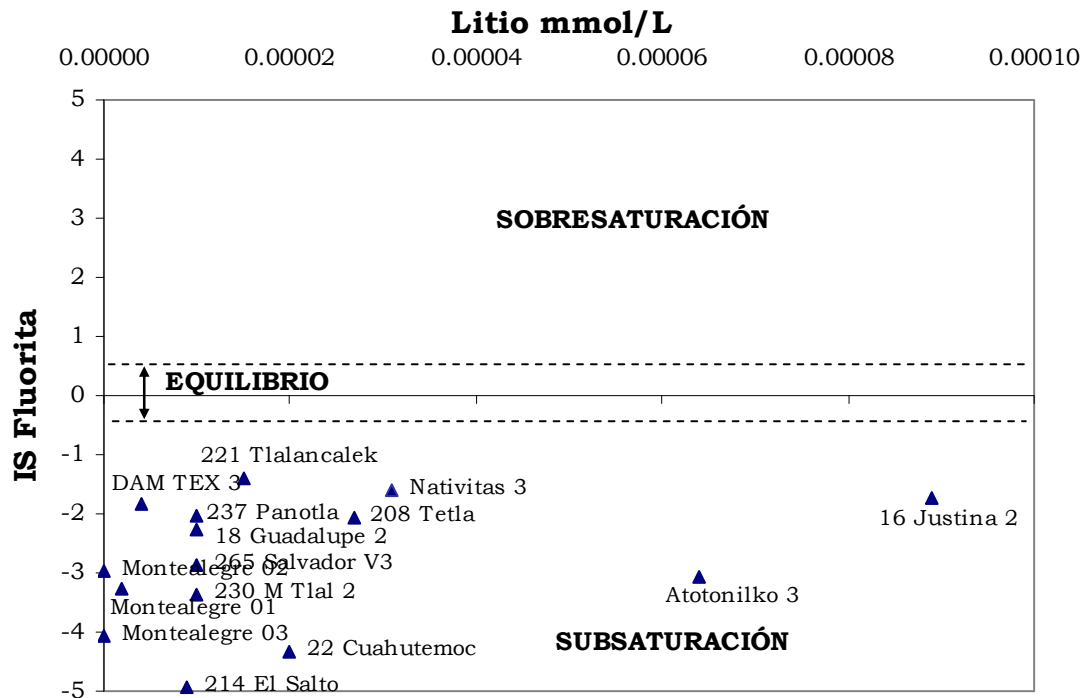


Figura No. 4.11. Índice de saturación de la fluorita en relación con la concentración de litio (mmol/L)

Es interesante ver que para el agua del pozo 16 Justina 2 se obtuvo una profundidad de 2,567 m y es una de las muestras (con excepción de la de Atotonilco 3) con valor más alto de temperatura, sólidos totales disueltos, estroncio y litio, pero aquella presenta una concentración elevada de fosfatos ( $PO_4$ , ver Anexo No. 3) a comparación de las demás muestras, lo que indica que seguramente el agua fluyó preferencialmente a través de rocas que contenían apatito ( $Ca_5[PO_4]_3$  (F, Cl, OH, O)), mineral presente en las rocas de la Formación Chichinautzin (Qc), Formación Las Cruces (Tpc), rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv) y rocas volcánicas del Oligoceno Tardío (Tomv), como se indica en el apartado de geología del presente documento y las cuales deben ser unidades litológicas continuas en buena parte del Cinturón Volcánico Transmexicano.

Por último, al usar geotermómetros, lo ideal es la comparación entre resultados de la aplicación de diversos métodos, sin embargo, como se mencionó anteriormente, el uso de geotermómetros de cationes no era recomendable por el bajo índice de madurez obtenido.

Por tal razón, los resultados obtenidos en este trabajo son preliminares y se realizaron para obtener una idea inicial de la posible temperatura de equilibrio y profundidad alcanzada por el agua, por lo que están sujetos a análisis y comprobación, tanto con otros estudios futuros similares como con resultados de diversos geotermómetros.



### ANÁLISIS COMPARATIVO REGIONAL

Como se ha indicado anteriormente, los estudios hidrogeológicos deben incorporar un análisis regional que facilite el entendimiento del comportamiento del agua en el subsuelo y relación con el ambiente, por lo que se realizó una comparación de datos de diferentes fuentes de la Cuenca de México (Edmunds *et al.*, 2002; Huizar *et al.*, 2004; Carrillo-Rivera *et al.*, 2004 y presente estudio), Cuenca Alta del Lerma (INEGI, 1983 y CONACYT-SEMARNAT, 2005) y del estado de Puebla (Galicia, en proceso)(*Ver Figura No. 4.12*). Dicha comparación se considera válida e instructiva, debido a que todas estas cuencas se localizan a lo largo del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano.

De acuerdo con la composición química global del agua subterránea y su temperatura se obtienen cuatro tipos básicos de agua (*Ver Figura No. 4.12 a,b,c*):

- Tipo I: que incorpora el agua más someramente obtenida de la cuenca de México
- Tipo II: cuyo miembro extremo es el agua del pozo del Peñón de los Baños
- Tipo III: está representada por aquella que tiene por miembro extremo al agua de Paraíso Escondido (manantial en la margen del Lago de Cuitzeo)
- Tipo IV: el cual está representado por los miembros extremos de los manantiales de La Pitaya (Cuenca del Lerma, Estado de Guanajuato)

Se aprecia que sólo algunas muestras de agua colectadas por Huizar *et al.*, (2004) y las de flujo regional reportadas en el trabajo de Edmunds *et al.*, (2002) presentan mayor contenido de Na, K y Cl, lo que indica que su agua ha viajado gran distancia por milenios. No obstante, existen ciertas muestras con alto contenido de Cl (335 mg/l, *Ver Figura No. 4.12 d*) reportadas por Huizar *et al.*, (2004), las cuales se encuentran relacionadas con una fuente de contaminación (infiltración de efluentes de agua residual).

En general, la calidad del agua y su componente de temperatura permite sugerir que los tipos de agua definidos representan sistemas de flujo con características particulares, obteniendo así, que la mayor parte del agua analizada corresponde con flujos de tipo local e intermedio, y por el contrario, un número menor se relaciona con flujo de tipo regional (*Ver Figura No. 4.12 e*).

Algunas muestras de la Cuenca Alta del Lerma, del estudio del CONACYT-SEMARNAT (2005), exhiben cantidades de sodio y cloruro semejantes a las de la Cuenca de México y Estado de Puebla, sin embargo, su temperatura es mayor comparada con la de las otras regiones, sugiriendo un grupo de agua diferente al reportado por Huizar *et al.*, (2004) y Edmunds *et al.*, (2002). La *Figura No. 4.12 e*, muestra que la mayoría de las muestras de agua de la Cuenca de México clasifican como flujos local e intermedio, y sólo el agua del pozo del Peñón de los Baños (Edmunds *et al.*, 2002) pertenece a flujo regional.

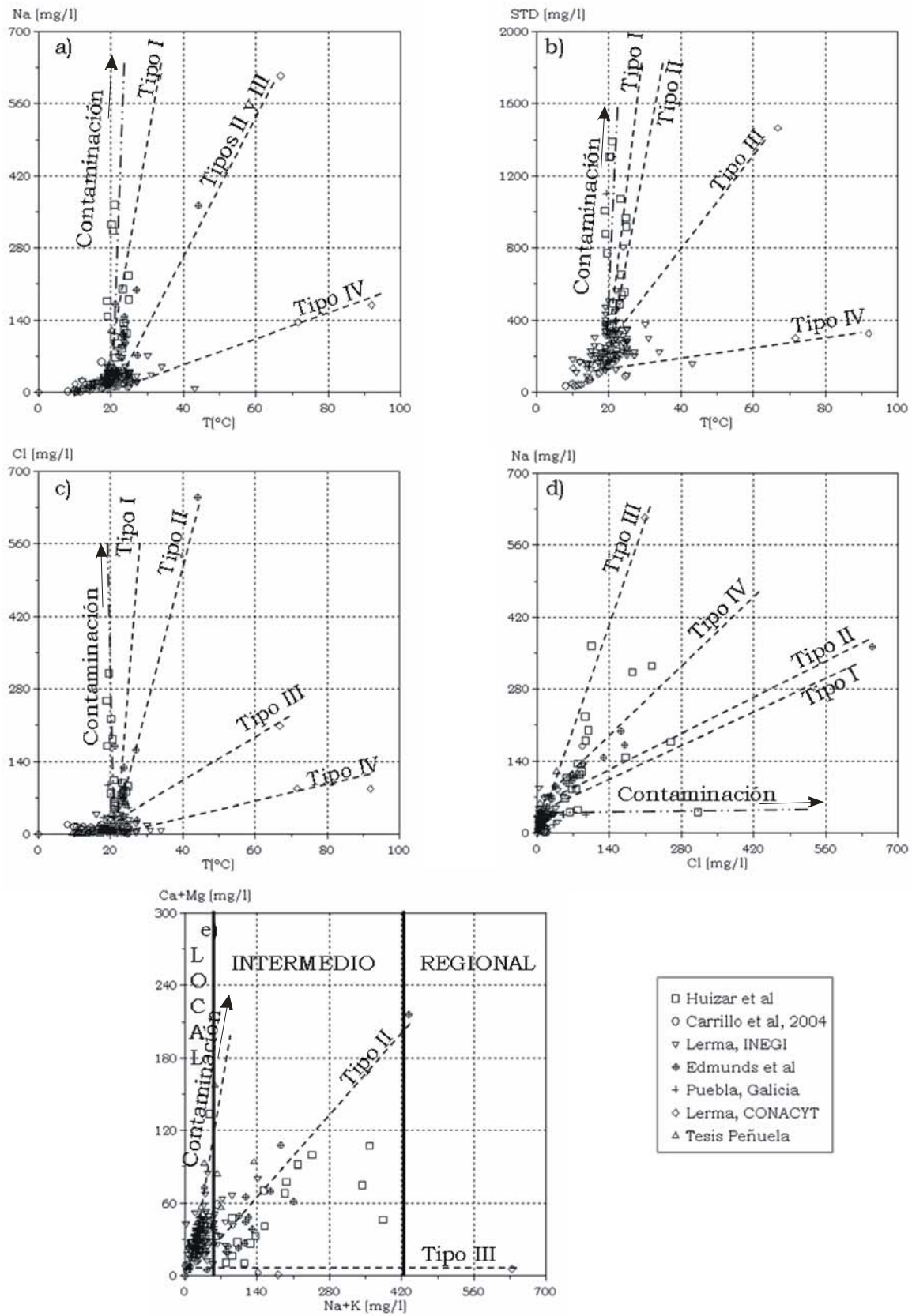


Figura No. 4.12. Comparación entre muestras de agua de la Cuenca de México (INEGI 1983, Edmunds et al, 2002; Huizar et al, 2004; Carrillo-Rivera et al, 2004); Puebla (Galicia, en proceso) y Cuenca Alta del Lerma (INEGI, 1983; CONACYT-SEMARNAT, 2005)

De igual manera, se realizó una segunda comparación incluyendo además de los anteriores datos, información de Aguascalientes (Maldonado-Molina, 1997) y San Luis Potosí (Carrillo-Rivera, 1992) (*Ver Figura No. 4.13*). Se observa que las muestras tomadas en el presente trabajo clasificarían en su mayoría como flujo local, las muestras 221 Tlalancalek y Nativitas 3, según la figura, clasificarían como flujo intermedio como se había previsto, sin embargo, el tipo de agua al que corresponde es difícil de establecer (posiblemente tipo de agua IV), por su parte, las muestras 16 Justina 2 y Atotonilco 3 son muestras pertenecientes a flujo intermedio, siendo la última representativa del tipo de agua IV y la primera probablemente asociada con el tipo de agua II o III.

Huizar *et. al* (2004) indican la presencia de los tres tipos de flujo (local, intermedio y regional) captados en la parte sureste de la Cuenca de México (municipios de Ixtapalapa, Ixtacalco, Chalco y Xochimilco) (*Ver Figura No. 4.14*). La gráfica de los datos de Huizar *et al.*, (2004) sugiere que las muestras del Grupo 1 del presente trabajo quedan localizadas más cerca al origen que las que presenta el estudio en referencia (*Ver Figura No. 4.14*), esta situación hace pensar que el área correspondiente a flujo local realmente debería ubicarse más hacia el punto de origen, adicionalmente, existen diferencias entre las muestras de los dos estudios, correspondiendo con agua de pozo aquellas del estudio de Huizar *et. al.* (2004) y en su mayoría con manantiales (del Grupo 1) del presente estudio, siendo posiblemente estas últimas más representativas de pequeños flujos locales.

El grupo 2 por su parte se ubica en lo que Huizar *et al* (2004) definen como flujo local, sin embargo, como se indicó con anterioridad existen diferencias en las características fisicoquímicas de los grupos 1 y 2 que permiten distinguir uno del otro grupo. Asimismo, las muestras del grupo 3 se ajustarían como flujo intermedio y regional, siendo este último casi improbable en esa ubicación teniendo en cuenta lo visto en la *Figura No. 4.13*, la cual permite una apreciación de las diferentes magnitudes de los flujos de agua subterránea.

De acuerdo con lo indicado, en el presente estudio se muestra una nueva propuesta de clasificación de tipos de flujo para la parte sur de la Cuenca de México (*Ver Figura No. 4.15*). La nueva propuesta incorpora un flujo de agua de mezcla (local e intermedio) y desplaza la posición del flujo regional en el gráfico a temperaturas mayores y/o contenido de sodio, considerando el análisis de comparación de datos de diversas regiones realizado previamente (*Figura No. 4.13*), resaltando a su vez la importancia de la comparación y análisis regional en este tipo de estudios.

Cabe resaltar que las muestras 2, 3, 7, 10 y 12 del estudio de Huizar *et al.* (2004) no son incluidas en el análisis de clasificación de tipos de flujo del presente estudio, teniendo en cuenta que son muestras contaminadas como se señaló previamente, donde los elevados valores de cloruro, hierro y níquel de las dos primeras muestras implican que los pozos reciben una entrada de agua residual del Canal de Chalco, localizado aproximadamente a 3 m de los aprovechamientos. Asimismo, el alto contenido de sólidos totales, sodio, cloruro, manganeso y estroncio de las muestras restantes sugieren que el agua subterránea es afectada por entrada de agua del acuitardo suprayacente, adicionalmente, las muestras 7

y 10 corresponden con agua contaminada, con alto contenido de sodio y cloruro, resultado de la carencia de drenaje municipal de las poblaciones asentadas en la Sierra de Santa Catarina (Huizar *et al.*, 2004).

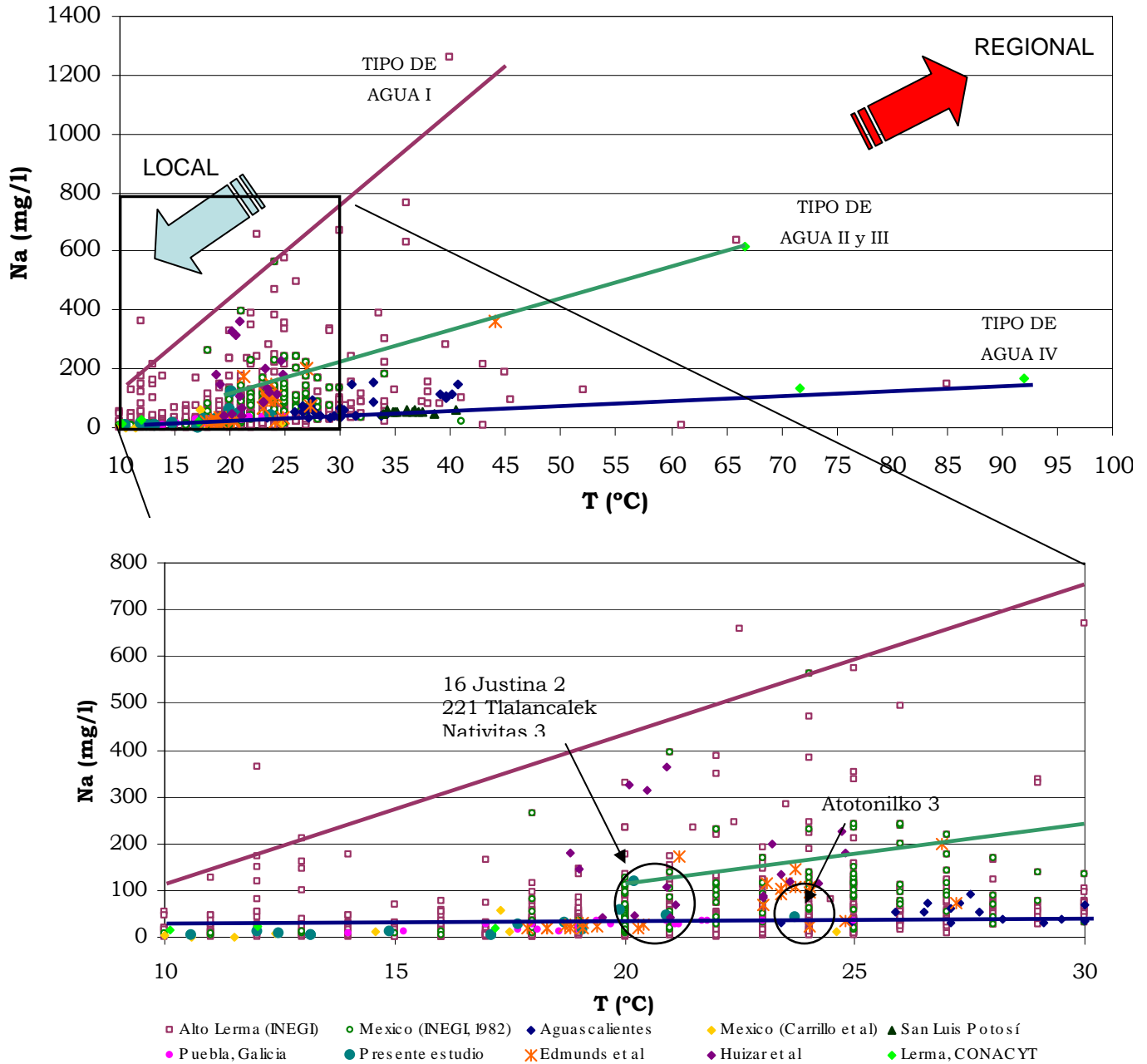


Figura No. 4.13. Comparación de temperatura y sodio entre muestras de agua de la Cuenca de México (INEGI, 1983; Edmunds *et al.*, 2002; Huizar *et al.*, 2004; Carrillo-Rivera *et al.*, 2004, presente estudio), Aguascalientes (Maldonado-Molina, 1997), San Luis Potosí (Carrillo-Rivera, 1992), Puebla (Galicia, en proceso) y Cuenca Alta del Lerma (INEGI, 1983; CONACYT-SEMARNAT, 2005)

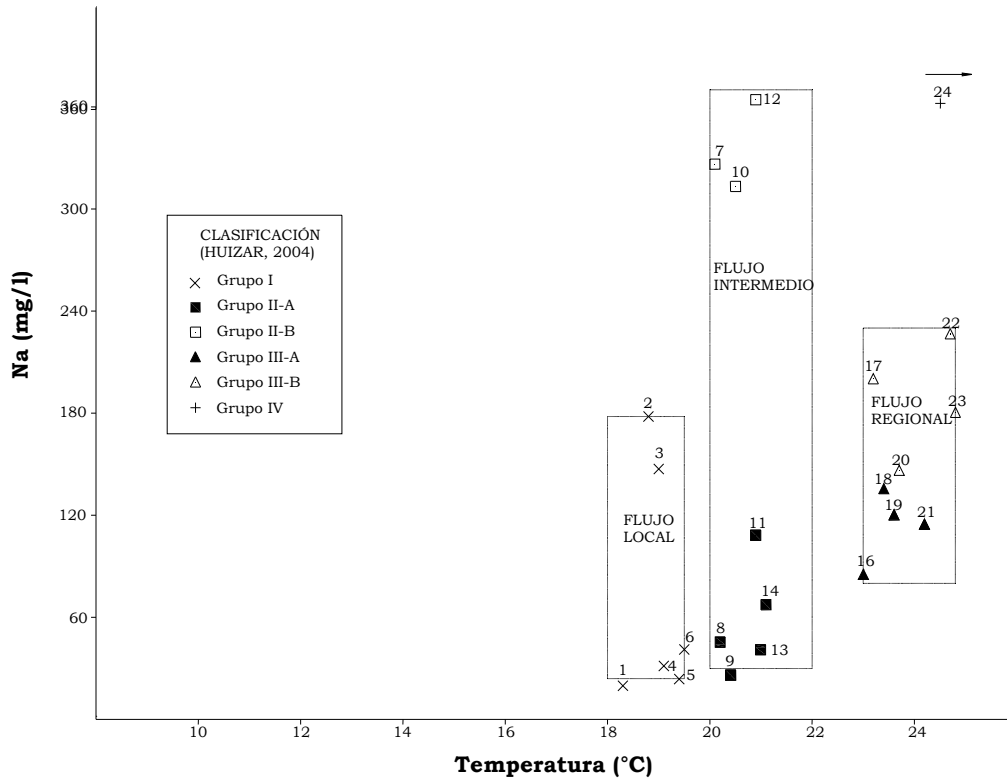


Figura No. 4.14. Clasificación de tipo de flujo según Huizar et al (2004)

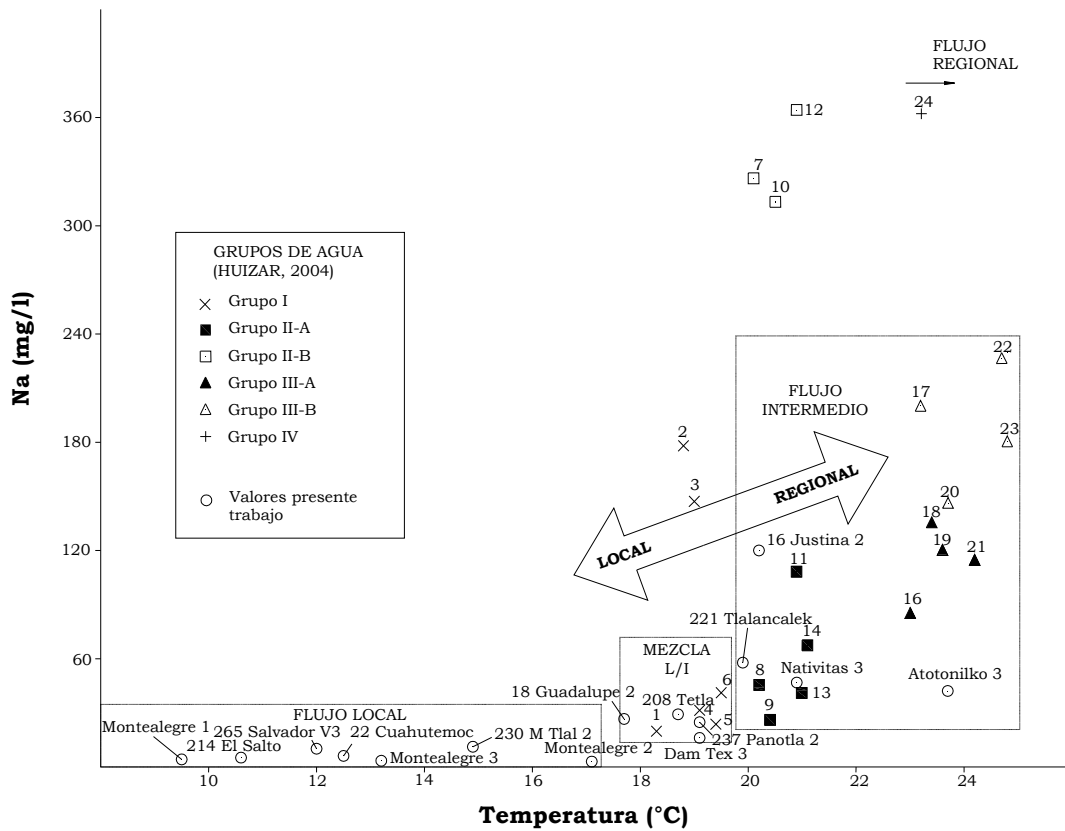


Figura No. 4.15. Clasificación de flujos propuesta en el presente estudio

CALIDAD DEL AGUA

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, referente a los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, se encontró que algunas muestras superan dicho límite (Ver Tabla No. 4.8), por lo que su consumo no es adecuado sin la realización de un previo tratamiento.

Tabla No. 4.8. Muestras que superan el límite permisible de calidad para agua potable.

PARÁMETRO	LÍMITE PERMISIBLE	MUESTRA NO POTABLE	VALOR OBTENIDO
pH	6.5 – 8.5	16 Justina 2	6.35
		Atotonilko 3	5.93
STD	1,000 mg/l	Atotonilko 3	1,534.1 mg/l
		16 Justina 2	1,035.7 mg/l
		237 Panotla 2	1,002.1 mg/l
Mn	0.15 mg/l	237 Panotla 2	1.05 mg/l
		16 Justina 2	0.38 mg/l
NO3 (como N)	10 mg/l	Nativitas 3	12.6 mg/l
		18 Guadalupe 2	12.5 mg/l

El alto contenido de nitratos en las muestras Nativitas 3 y 18 Guadalupe 2 indica un grado de contaminación en las mismas por efecto antrópico y una correspondencia con los valores relativamente altos de cloruro (Ver Figura No. 4.16).

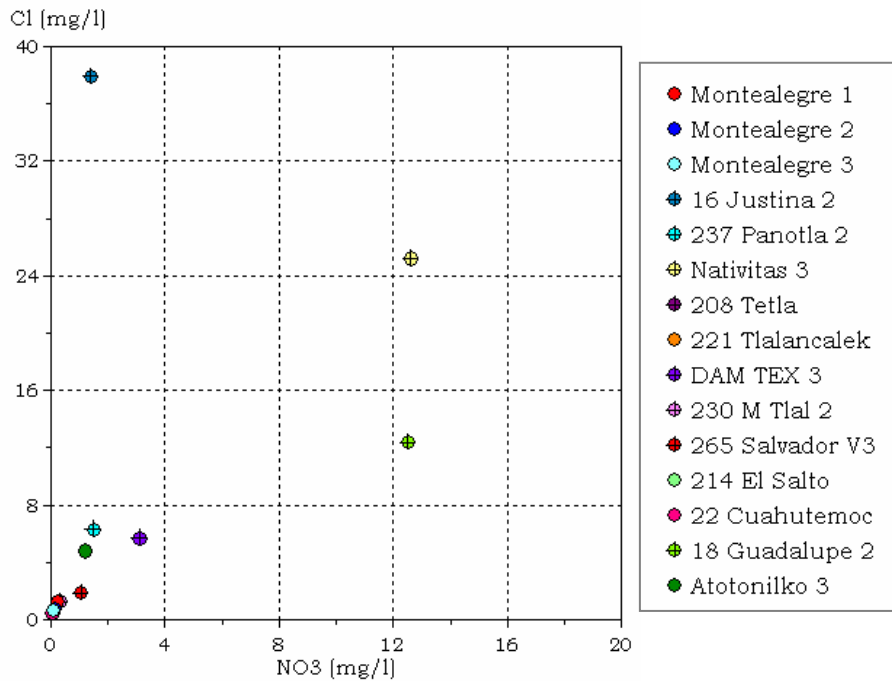


Figura No. 4.16. Relación de NO<sub>3</sub> con Cl<sup>-</sup> en las muestras colectadas

Anteriormente se indicó que el litio es un elemento trazador de la distancia de recorrido del agua subterránea y por ende de su edad relativa, debido a que no se precipita y por no existir una fuente adicional de éste en el territorio de estudio, por lo que este elemento es un indicador de cambio en la composición original del agua por factores externos.

Las muestras con alta concentración de nitratos contienen valores no muy importantes de litio, por lo que se asume que el alto valor de cloruro en el agua de dichas muestras se relaciona con el contenido de nitratos más que por procesos físicos y químicos durante interacción con la litología a lo largo de su trayectoria. Así, es relevante realizar más estudios relacionados con la fuente de contaminación de esta agua, para buscar soluciones y evitar su propagación.

#### **4.3.2. Isótopos Ambientales Estables**

El uso de isótopos ambientales estables es una parte esencial en la hidrogeoquímica, ya que son trazadores del origen del agua subterránea y se emplean para determinar procesos de recarga, reacciones geoquímicas y tasa de reacción, entre otros. Su importancia radica en que las relaciones entre los contenidos de isótopos estables pesados de oxígeno ( $^{18}\text{O}$ ) (ej. relación  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) y deuterio ( $^2\text{H}$  o D) son considerados constantes al entrar el agua al subsuelo, sin verse afectados por los diferentes procesos e interacción roca - agua.

No obstante, durante la fase de evaporación y condensación del agua, la concentración de los isótopos pesados cambia. Al precipitarse el agua, las gotas que descienden de las nubes presentan una mayor concentración en isótopos pesados y por ende, las nubes van perdiendo los mismos a lo largo de su trayecto hacia el continente, a su vez, el agua va adquiriendo poco a poco características propias del ambiente circundante.

Las muestras anteriormente descritas fueron adicionalmente enviadas a laboratorio para obtener las concentraciones relativas de isótopos estables ambientales ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) (Ver Tabla No. 4.9). Como se aprecia, los valores isotópicos son muy cercanos, lo que indica que las zonas de recarga deben tener una altitud similar. La precisión analítica de los resultados es  $\delta^2\text{H} \text{‰} = 0.9$  y  $\delta^{18}\text{O} \text{‰} = 0.08$ .

Los promedios para los isótopos calculados en el presente estudio son  $\langle\delta^{18}\text{O}\rangle = -10.4$  y  $\langle\delta^2\text{H}\rangle = -73.2$  incorporando todas las muestras de agua, sin embargo, aquellas de Montealegre exhiben diferencias importantes con los datos de Cortés *et al.* (1989) del mismo lugar (MAL 1:  $\delta^{18}\text{O} = -11.4$  y  $\delta^2\text{H} = -81$ ; MAL 2:  $\delta^{18}\text{O} = -11.5$  y  $\delta^2\text{H} = -82$ ), estas discrepancias pueden corresponder con el hecho que la temporada en que se tomaron las muestras era época de secas, el manantial se encontraba seco y el agua muestreada pertenece a un arroyo que se formaba aguas abajo pero que no era netamente del manantial que se buscaba, igualmente, las muestras Montealegre 2 y 3 corresponden a agua del Río Las Regaderas (Ver Anexo 3), no obstante, estas muestras corresponden con agua subterránea considerando la época de secas pero la composición isotópica que se obtiene es resultado de una mezcla de agua de diferentes manantiales, por esta razón no se consideran estas muestras representativas de un manantial a una

altura específica y en reemplazo se usan los valores isotópicos de los datos de Montealegre de Cortés *et al* (op cit), dando como resultado un nuevo promedio isotópico de -10.6 para  $\delta^{18}\text{O}$  y -75.2 para  $\delta^2\text{H}$ .

Tabla No. 4.9. Valores de isótopos ambientales para las muestras tomadas en campo

Muestra	$\delta\text{D}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰
16 Justina 2	-70	-9.7
237 Panotla 2	-65	-8.8
Nativitas 3	-72	-9.9
208 Tetla	-76	-10.9
221 Tlalancalek	-72	-9.9
Dam Tex 3	-71	-9.5
230 M Tlal 2	-75	-10.7
265 Salvador V3	-80	-11.7
214 El Salto	-81	-11.7
22 Cuauhtemoc	-80	-11.7
18 Guadalupe 2	-75	-10.7
Atotonilko 3	-72	-10.2
Montealegre 1	-72	-10.8
Montealegre 2	-64	-9.6
Montealegre 3	-72	-10.6

Los datos promedio obtenidos por Cortés *et al.* (1989) ( $\langle\delta^{18}\text{O}\rangle = -10.69$  y  $\langle\delta^2\text{H}\rangle = -73$ ) son valores muy cercanos a los obtenidos en el presente estudio, por lo que se puede atribuir una altitud, y muy probablemente localización geográfica, de zonas de recarga similar.

Al analizar los valores isotópicos del área de estudio, se obtuvo que las muestras de manantial y pozo del grupo 1 se aproximan en su mayoría a la línea meteórica local (LML;  $\delta^2\text{H}=7.95$   $\delta^{18}\text{O}+11.77$ ) determinada por Cortés y Farvolden (1989) y a la línea meteórica global (LMG;  $\delta^2\text{H}=8$   $\delta^{18}\text{O}+10$ ) (Craig, 1961, tomado de Clark and Fritz, 1997), por lo que el agua que se recarga pertenece a agua lluvia que seguramente no ha sufrido alteraciones por evaporación, por su parte, muchas de las muestras de agua de los grupos 2 y 3 se ubican sobre la línea de evaporación (LEV 1;  $\delta^2\text{H}=5.102$   $\delta^{18}\text{O}-21.12$  y LEV 2;  $\delta^2\text{H}=5.014$   $\delta^{18}\text{O}-23.95$ ), lo que permite formular que antes de la infiltración y percolación estuvo sujeta a dicho proceso (Ver Figura No. 4.17).

En la Figura No. 4.17, los valores de Cortés, 1989 corresponden al promedio, máximo y mínimo de los datos de dicha publicación, asimismo, aquellos denominados MAL (Cortés et al) son los valores isotópicos de las dos muestras de Montealegre del mismo trabajo.



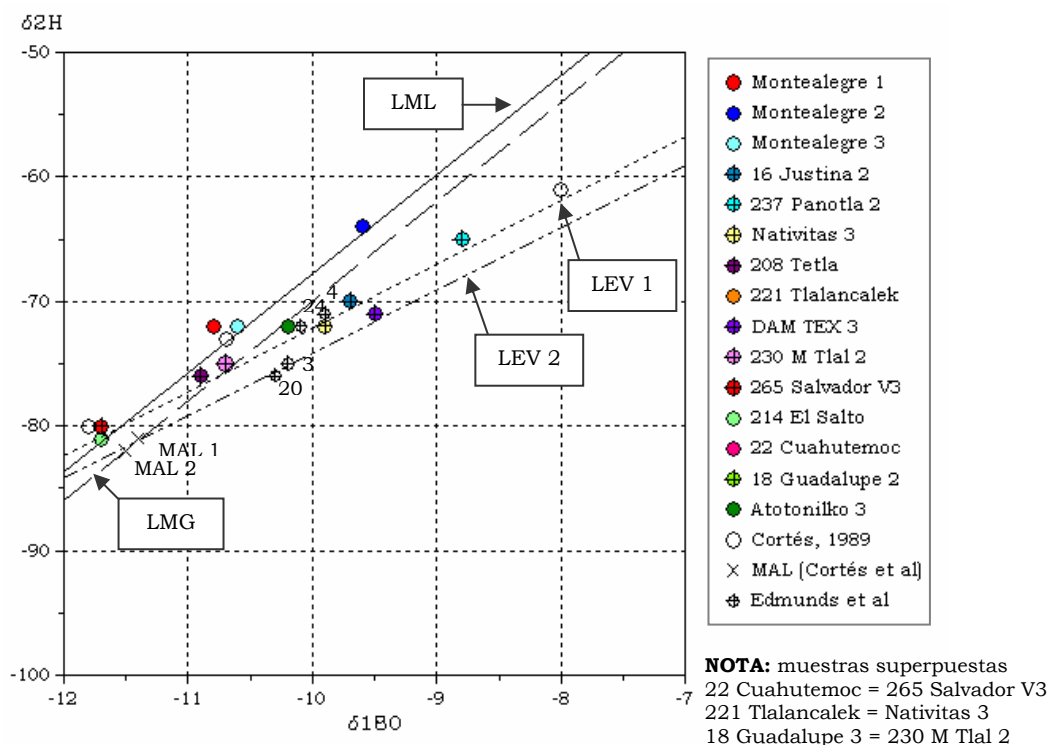


Figura No. 4.17. Distribución isotópica de las muestras del presente estudio y datos promedio, máximo y mínimo de Cortés (1989)

### CÁLCULO DE ALTITUD DE LA PRECIPITACIÓN

Cortés y Durazo (2001) establecieron que la concentración isotópica media del  $^{18}\text{O}$  (‰ *versus* Vienna-smow) de la precipitación está gobernada por un proceso de enfriamiento orográfico-adiabático tipo Rayleigh en la región montañosa de la parte central de México, y sólo depende de la elevación topográfica de la zona donde se produce la precipitación. Asimismo, los mismos autores determinaron que el efecto de altitud, para el centro de México, es una constante regional igual a  $-2.13$  ‰ por kilómetro de elevación y finalmente obtuvieron una ecuación que permite asignar un valor de concentración isotópica a la precipitación de determinado lugar, esta ecuación es:

$$\delta^{18}\text{O}^*(X,Y) = -2.13 Z(X,Y) - 3.2 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$4.72 \geq Z > 0.8 \text{ km snm}$$

donde:  $\delta^{18}\text{O}^*$  concentración isotópica de  $^{18}\text{O}$  de la precipitación (‰ *versus* Vienna-SMOW)  
 Z elevación topográfica (en km snm)  
 (X,Y) referentes espaciales

En la *Figura No. 4.17* se aprecian las muestras de agua que sufrieron alteración en sus valores isotópicos por causa de la evaporación, así como las que se

encuentran inalteradas y que sus valores isotópicos representan las propiedades del agua de precipitación, o sea  $\delta^{18}\text{O}^*$ .

De esta manera, es posible obtener la altitud del sitio que recibe la precipitación y las potenciales zonas de recarga para cada aprovechamiento de aquellas muestras de agua que no son afectadas por la evaporación, reemplazando simplemente el valor de  $\delta^{18}\text{O}^*$  en la ecuación 1.

Los resultados de este cálculo se presentan en la *Tabla No. 4.10*, en la cual se incluyen igualmente las altitudes obtenidas para las muestras de Edmunds *et al* (2002).

*Tabla No. 4.10. Resultados del cálculo de la altitud de la precipitación, zonas de recarga de agua subterránea*

MUESTRA	$\delta^{18}\text{O}^*$	Z (km snm)
<b>ESTE ESTUDIO</b>		
214 EL SALTO	-11.7	4.0
265 SALVADOR V3	-11.7	4.0
MONTEALEGRE 1	-10.8	3.6
MONTEALEGRE 3	-10.6	3.5
230 M TLAL 2	-10.7	3.5
208 TETLA	-10.9	3.6
18 GUADALUPE 2	-10.7	3.5
ATOTONILKO 3	-10.2	3.3
22 CUAHUTEMOC	-11.7	4.0
<b>CORTÉS <i>et al.</i> (1989)</b>		
1 Montealegre	-11.4	3.8
2 Montealegre	-11.5	3.9

MUESTRA	$\delta^{18}\text{O}^*$	$\delta^2\text{H}^*$	Z (km snm)
<b>EDMUNDS <i>et al.</i> (2002)</b>			
1	-10.3	-72	3.3
2	-10.2	-71	3.3
5	-10.4	-71	3.4
6	-10.2	-71	3.3
7	-10.5	-72	3.4
8	-10.4	-71	3.4
9	-10.3	-70	3.3
10	-10.2	-72	3.3
11	-10.6	-71	3.5
12	-10.4	-71	3.4
13	-10.2	-71	3.3
14	-9.6	-65	3.0
*15	-9.1	-59	2.8
16	-9.5	-62	3.0
17	-10	-70	3.2
18	-9.9	-67	3.1
19	-10	-69	3.2
21	-10.1	-70	3.2
22	-10	-69	3.2
23	-10.3	-70	3.3
25	-10	-68	3.2
26	-10	-69	3.2

\*A pesar que esta muestra no presenta efectos de evaporación (muestra Peñón de los Baños), la altitud de precipitación calculada puede no ser representativa debido a que es agua subterránea de carácter regional o mezcla de éste con otro tipo de flujo, lo que sugiere un recorrido significativo, parámetro divergente con el principio para la aplicación de la ecuación de Cortés y Durazo (2001), la cual debe usarse para agua relativamente reciente.

Para aquellas muestras de agua que son afectadas por evaporación, Durazo (2007) emplea una metodología que permite obtener la concentración isotópica de la precipitación a partir de la línea de evaporación (Ver Figura No. 4.18), ya que la pendiente es igual a:

$$m = (\delta^2H - \delta^2H^*) / (\delta^{18}O - \delta^{18}O^*)$$

Ecuación 2

donde se despeja y reemplaza  $\delta^2H^*$  (concentración isotópica de  $^2H$  de la precipitación). Durazo (2007) utiliza la ecuación  $\delta^2H^*=8 \delta^{18}O^*+11$  para la LMG, sin embargo, en este estudio se trabaja con aquella de Craig de 1961 y adicionalmente, se realiza el cálculo de la altitud con la LML, para ver diferencias y hacer comparaciones.

Así se tiene:

$$\delta^{18}O^* = (\delta^2H - m \delta^{18}O - 10) / (8 - m) \text{ para LMG y,}$$

Ecuación 3

$$\delta^{18}O^* = (\delta^2H - m \delta^{18}O - 11.77) / (7.95 - m) \text{ para LML.}$$

Ecuación 4

De esta manera, se obtiene  $\delta^{18}O^*$ , valor que finalmente puede ser reemplazado en la ecuación 1 y determinar la elevación topográfica en la cual se precipita el agua.

En la Tabla No. 4.11 se muestran los resultados de los diferentes cálculos para todas las muestras tomadas en el presente estudio debido a que se realizó una prueba utilizando los valores isotópicos de las muestras no afectadas por evaporación y sus respectivas altitudes calculadas previamente para determinar así la confiabilidad de los valores estimados, a través de la metodología de Durazo (2007), para las muestras afectadas por evaporación.

La comparación de datos permitió establecer el cálculo más apropiado para las muestras no afectadas por evaporación (celdas grises en la tabla, en el caso de 208 Tetla corresponde a la mitad entre los cálculos con LMG y LML), donde se observó que la posición del punto de muestreo con respecto a la LML y LMG es de gran relevancia en el cálculo, ya que el valor obtenido previamente de altitud de precipitación de las muestras que no son afectadas por evaporación, es más similar a la altitud obtenida a partir del nuevo cálculo basándose en la LML. De igual forma sucede con aquellas localizadas sobre las líneas de evaporación, cuyas altitudes obtenidas por los dos métodos son más semejantes con la LMG.

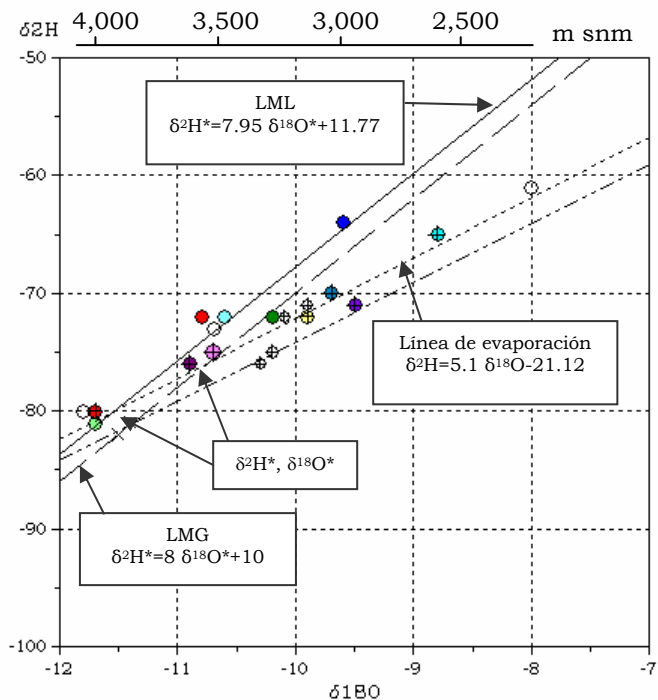


Figura No. 4.18. Ejemplificación para el cálculo de altitud de la precipitación, según metodología de Durazo (2007)

Tabla No. 4.11. Resultados del cálculo de elevación topográfica de la precipitación

Muestra	Altitud (msnm)	$(\delta^{18}\text{O})$	$(\delta^2\text{H})$	m	LMG		LML	
					P. inferida	Elev. Prec	P. inferida	Elev. Prec
16 Justina 2	2232	-9.7	-70	5.102	-10.611	3.5	-11.419	3.9
237 Panotla 2	2227	-8.8	-65	5.102	-10.447	3.4	-11.252	3.8
Nativitas 3	2206	-9.9	-72	5.102	-10.970	3.6	-11.784	4.0
208 Tetla	2260	-10.9	-76	5.102	-10.488	3.4	-11.294	3.8
221 Tlalancalek	2321	-9.9	-72	5.102	-11.042	3.7	-11.857	4.1
Dam Tex 3	2267	-9.5	-71	5.102	-11.349	3.8	-12.170	4.2
230 M Tlal 2	2416	-10.7	-75	5.102	-10.472	3.4	-11.277	3.8
265 Salvador V3	2403	-11.7	-80	5.102	-10.516	3.4	-11.322	3.8
214 El Salto	3103	-11.7	-81	5.102	-10.656	3.5	-11.464	3.9
22 Cuauhtemoc	2900	-11.7	-80	5.102	-10.288	3.3	-11.091	3.7
18 Guadalupe 2	2232	-10.7	-75	5.102	-10.469	3.4	-11.275	3.8
Atotonilco 3	2321	-10.2	-72	5.102	-10.215	3.3	-11.016	3.7
4 (Edmunds <i>et al</i> )		-9.9	-71	5.102	-10.521	3.4	-11.327	3.8
24 (Edmunds <i>et al</i> )		-10.1	-72	5.102	-10.514	3.4	-11.320	3.8
1 Montealegre *	~3475	-11.4	-81	5.014	-11.333	3.8	-12.129	4.2
2 Montealegre *	~3475	-11.5	-82	5.014	-11.500	3.9	-12.299	4.3
3 (Edmunds <i>et al</i> )		-10.2	-75	5.014	-11.339	3.8	-12.134	4.2
20 (Edmunds <i>et al</i> )		-10.3	-76	5.014	-11.506	3.9	-12.304	4.3

\* Datos tomados de (Cortés *et al.*, 1989), correspondientes a MAL 1 y 2.

Teniendo en cuenta que las muestras de agua afectadas por evaporación se encuentran más cerca de la LMG que la LML, y la definición de la primera se basa en un número mayor de datos, se consideran los resultados de la LMG como valores más representativos. Adicionalmente, la altitud calculada para la precipitación de las muestras de Montealegre (~3475 msnm) son valores muy altos (4.2 – 4.3 km snm) que pueden no corresponder con la realidad teniendo en cuenta que es agua de flujo local y las elevaciones topográficas cercanas (Volcán Ajusco, sierras Chichinautzin y Las Cruces) no alcanzan ni superan esta cota.

En un enfoque regional, se aprecia un comportamiento similar entre los datos de concentraciones isotópicas de la Cuenca de México de diferente fuente y otras de diversos territorios tales como Valle de Bravo, Lerma, Toluca y Puebla, indicando que la elevación topográfica de la precipitación de todos estos territorios es semejante (Ver Figura No. 4.19). En general, se puede decir que existe un promedio isotópico de  $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle = -10.35$  y  $\langle \delta^2\text{H} \rangle = -72$  y una altitud de precipitación promedio de 3.4 km snm, elevación que en muchas ocasiones corresponderá con la zona de recarga de agua subterránea cuando no exista alteración en el agua por efectos de evaporación.

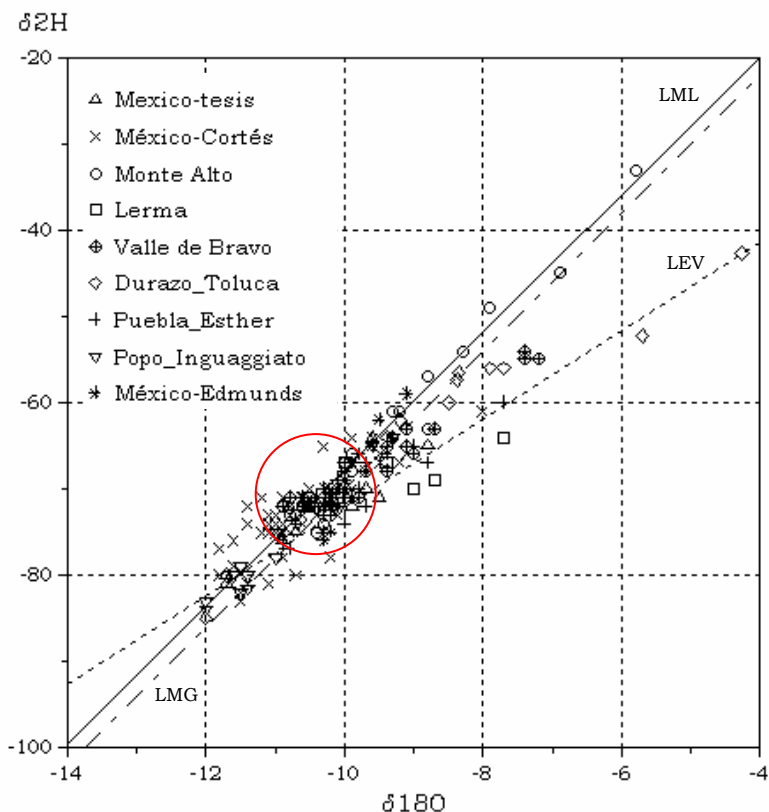


Figura No. 4.18. Concentraciones isotópicas para la Cuenca de México y diversos territorios cercanos.

En relación con la evaporación, sería relevante la ejecución de estudios e investigaciones que permitan establecer sus posibles procesos y de alguna manera cuantificar sus efectos sobre el agua restante, para finalmente obtener zonas de recarga de agua subterránea para aquellos casos donde las muestras se ven afectadas por ésta.

Algunas situaciones que facilitan la evaporación del agua antes de ocurrir la recarga al subsuelo son 1) el tipo de tormenta, debido a que si es un evento torrencial puede saturar el suelo, provocando encharcamientos y la segunda situación 2) el escurrimiento, que mantendrá el agua sobre superficie, predispuesta a sufrir efectos por evaporación, esta situación no sólo depende de la tormenta, sino de diversas variables como tipo de suelo, vegetación, relieve, etc., 3) barreras litológicas semi o impermeables en el subsuelo que no permitan el flujo directo vertical descendente al subsuelo sino que por el contrario genere un flujo condicionado con la dirección del límite, que en ocasiones puede salir a superficie en forma de manantial y ya sea que allí mismo o a una menor altitud se infiltre y percole hasta el agua subterránea.

Asimismo, la litología del terreno es un factor importante en aspectos de evaporación, ya que en el caso de arenas o material muy poroso y clima árido o alta temperatura, al estar el agua en la zona no saturada (interfase nivel freático y superficie del terreno) o en el mismo nivel freático puede ocurrir evaporación.

#### **4.4. SISTEMAS DE FLUJO**

El referente geológico permite postular un medio de gran espesor (> 3,000 m) con una distribución regional sin rocas de importancia que limiten el flujo de agua subterránea. Asimismo, el análisis físico-químico permitió establecer la presencia de sistemas de flujo de tipo local e intermedio en el territorio de interés, no obstante, otros estudios mencionan la presencia de zonas de descarga de flujo regional en el Lago de Texcoco, en el pozo del Peñón de los Baños (Edmunds *et al*, 2002). Cabe resaltar que el agua de este aprovechamiento sirve como referente del flujo regional pero no es un flujo representativo de éste debido a que realmente corresponde a una mezcla de diversos flujos teniendo en cuenta que el mecanismo de bombeo puede absorber agua en diferentes direcciones y generar la entrada de agua subterránea de diferentes tipos de flujo.

La hipótesis sobre la existencia de flujo regional en la cuenca no se desmiente en el presente estudio debido a que no se tomaron muestras en esa región que permita su corroboración y porque adicionalmente se está de acuerdo sobre la existencia de flujos regionales teniendo en cuenta el gran espesor de la columna estratigráfica, así como la continuidad y extensión litológica a lo largo del Cinturón Volcánico Transmexicano como se menciona al inicio de este capítulo.

La altitud de precipitación de las muestras de agua del presente estudio y aquellas de Edmunds *et al* (2002) fue calculada en el apartado anterior, obteniendo a su vez las zonas de recarga de las muestras que no fueron afectadas por evaporación o en poca medida. La localización de la zona de recarga se estimó considerando principalmente este valor de altitud, la topografía y pendiente del terreno.

En la *Figura No. 4.20* se presenta la altitud de precipitación calculada y el posible trayecto de diferentes sistemas de flujo asociados con los aprovechamientos muestreados en el presente trabajo y con poca a nula afectación por evaporación, asimismo, en la *Figura No. 4.21* se incorporan aquellos aprovechamientos estudiados por Edmunds *et al* (op cit) con su posible zona de recarga y trayecto del flujo. Por su parte, las zonas de recarga potenciales de aquellas muestras que son afectadas por evaporación no han podido ser definidas como se indicó anteriormente, sin embargo, en la *Figura No. 4.22* se señala la altitud calculada de precipitación, la cual proporciona una idea inicial sobre la posible dirección de flujo en el territorio, no obstante, se recalca que éstas no corresponden con zonas de recarga ya que el agua posiblemente escurrió antes de infiltrarse, por lo que la altitud de la zona de recarga no corresponde con aquella de precipitación. Cabe resaltar que las altitudes representadas en las figuras corresponden con aquellas calculadas para las muestras de agua tomadas en el presente estudio, por lo que no se descarta la posibilidad de incorporar otras elevaciones topográficas asociadas con zonas de recarga de agua al subsuelo de otros aprovechamientos.

En la *Figura No. 4.23* se presenta una sección hidrogeológica esquemática regional junto con la interpretación de los posibles sistemas de flujo asociados con diversos aprovechamientos del terreno de interés y sus características más relevantes. Asimismo, las *Figuras No. 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27* corresponden con secciones hidrogeológicas esquemáticas para las dos áreas de estudio con su

correspondiente interpretación de sistemas de flujo. La localización de las secciones se muestra en la *Figura No. 4.4*.

La profundidad de la caliza Cretácica de las secciones hidrogeológicas es una aproximación y proyección de la sección geológica de Mooser *et al.* (1996). Por su parte, Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) divide la caliza en diferentes formaciones en las secciones geológicas, sin embargo, en el presente estudio se trabaja con aquella definida por Mooser *et al.* (1996) debido a que presenta una mayor continuidad (*Ver Figuras No. 3.2 y 3.3*), especialmente bajo las Sierras de Río Frío y Ajusco, y ya que para fines de este estudio es suficiente el conocimiento de la existencia de calizas en general.

En las secciones D-D' y E-E' se incorpora la unidad litológica Ts(Ti), la cual no es definida en el capítulo de geología por encontrarse fuera del territorio de interés, así como del de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989). Esta unidad es referida en la cartografía geológica del INEGI (1983) como “toba intermedia; unidad constituida por tobas de composición intermedia con algunos constituyentes silícicos. Las tobas están formadas por fragmentos piroclásticos, generalmente escoráceos, en tamaño de ceniza y lapilli. Estos líticos tienen textura merocristalina porfídica y se caracterizan por presentar plagioclasas zoneadas y matriz vítrea, frecuentemente silícica”.

Existen ciertas discrepancias en cuanto a la descripción litológica de fuentes como INEGI y Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), ya que por ejemplo, el INEGI considera para el volcán Iztaccíhuatl una composición andesítica de edad Terciario superior y por su parte, la fuente última le atribuye una composición andesítica-basáltica a dacítica de edad cuaternaria. El presente estudio respeta la clasificación de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) por tener una mayor escala de trabajo, por lo que los límites entre unidades de los perfiles D-D' y E-E' son menos precisos que los demás. Esta problemática nuevamente conduce a ver la importancia de la investigación de parámetros físicos, los cuales se creen ya han sido estudiados y discutidos pero que realmente continúan sin una definición clara.

A pesar de estas diferencias en la descripción litológica de la región, se cree que dichas no implican un cambio drástico en la composición química ni en la interpretación hidrogeoquímica realizada ya que se ha observado cierta tendencia de homogeneidad en resultados de análisis hidrogeoquímico de flujos intermedio y regional, sin tener relación directa con la litología presente de determinada región. Un ejemplo es la analogía estudiada por Carrillo-Rivera *et al.* (2007) entre una cuenca *sedimentaria* de Hungría y otra cuenca *volcánica* de San Luis Potosí – México, donde se obtuvo que en ambas cuencas, cerca de la superficie, la variabilidad en el contenido de sólidos disueltos es significativa, pero pasando los 100 m de profundidad aproximadamente, la composición química del agua subterránea se vuelve más homogénea y la cantidad de compuestos disueltos es baja, asimismo, disminuye la concentración de bicarbonato y cloruro con la profundidad. Por lo que se considera que este comportamiento similar en las cuencas es independiente del ambiente geológico existente. No obstante, no se discute sobre la importancia del conocimiento litológico para análisis particulares como los flujos locales, el cálculo de tasas de infiltración y otros.

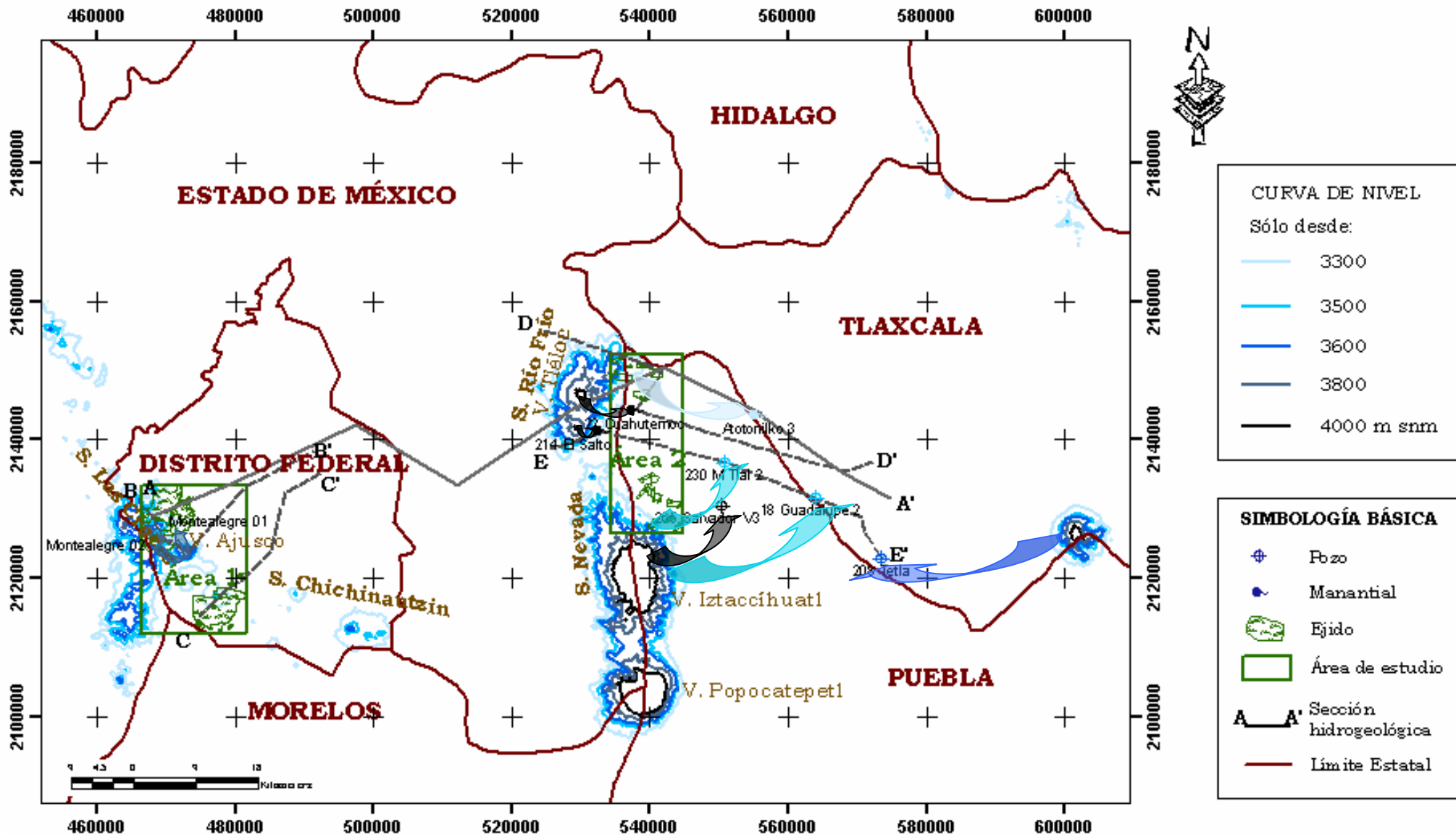


Figura No. 4.1. Altitud de precipitación (según color de curva de nivel) y posibles zonas de recarga; flujo (mismo color de altitud de la precipitación) para muestras con poco a nulo efecto de evaporación



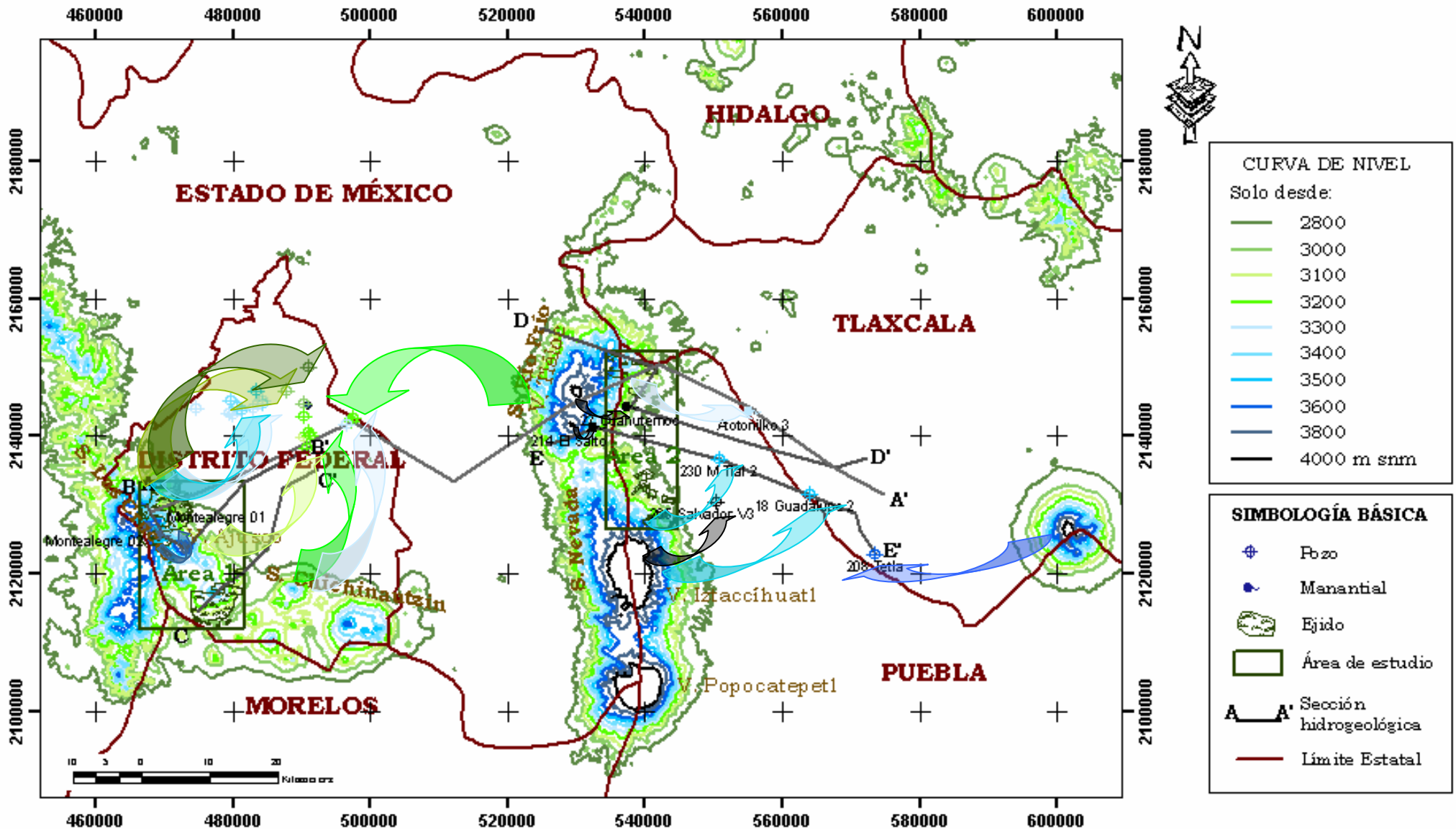


Figura No. 4.2. Altitud de precipitación (según color de curva de nivel) y posibles zonas de recarga; flujo (mismo color de altitud de la precipitación) para muestras del presente estudio y de Edmunds et al. (2002) con poco a nulo efecto de evaporación

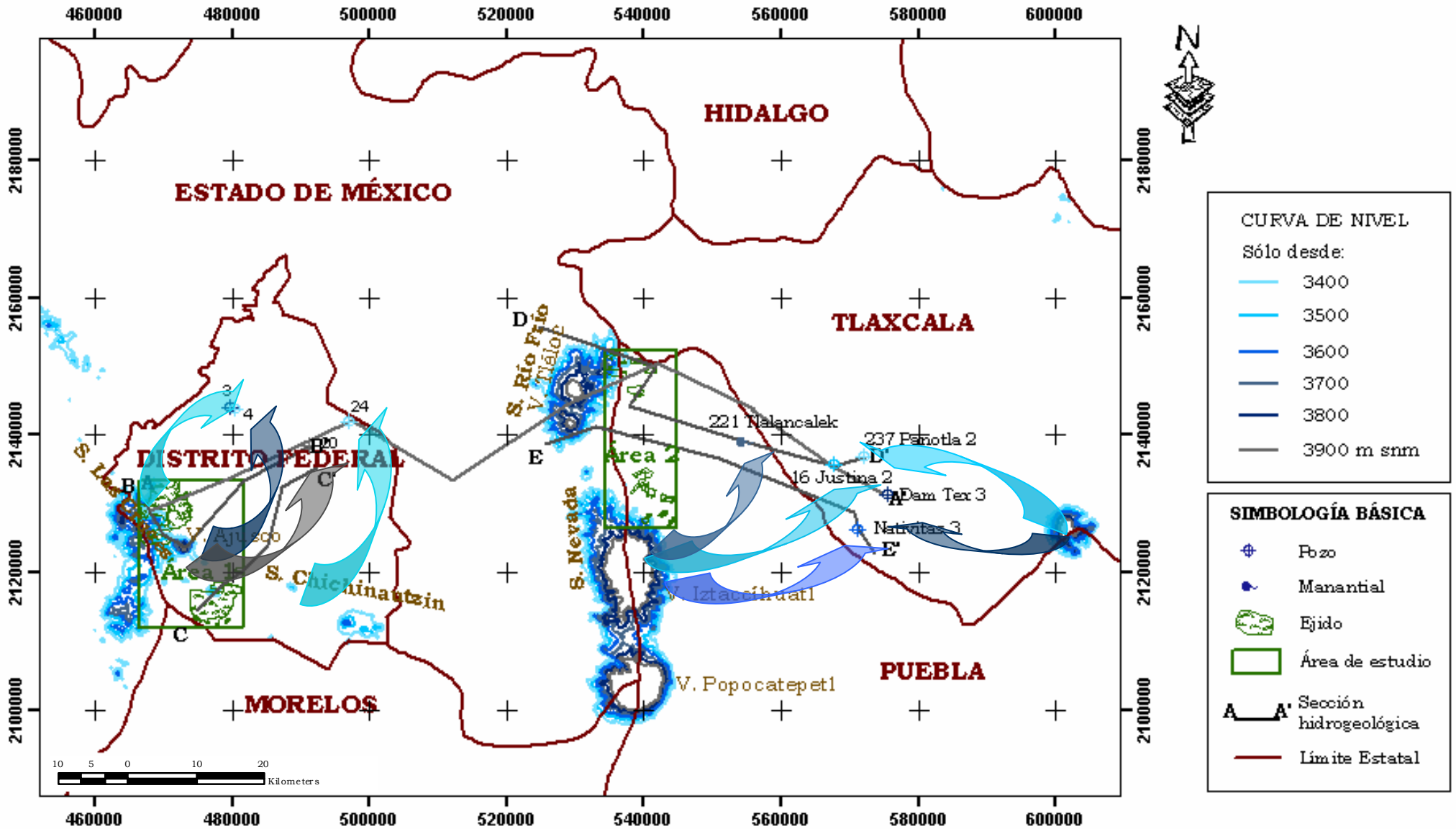


Figura No. 4.3. Altitud de precipitación (según color de curva de nivel) y posible dirección de flujo (mismo color de altitud de la precipitación) para muestras del presente estudio y Edmunds et al (2002) afectadas por evaporación

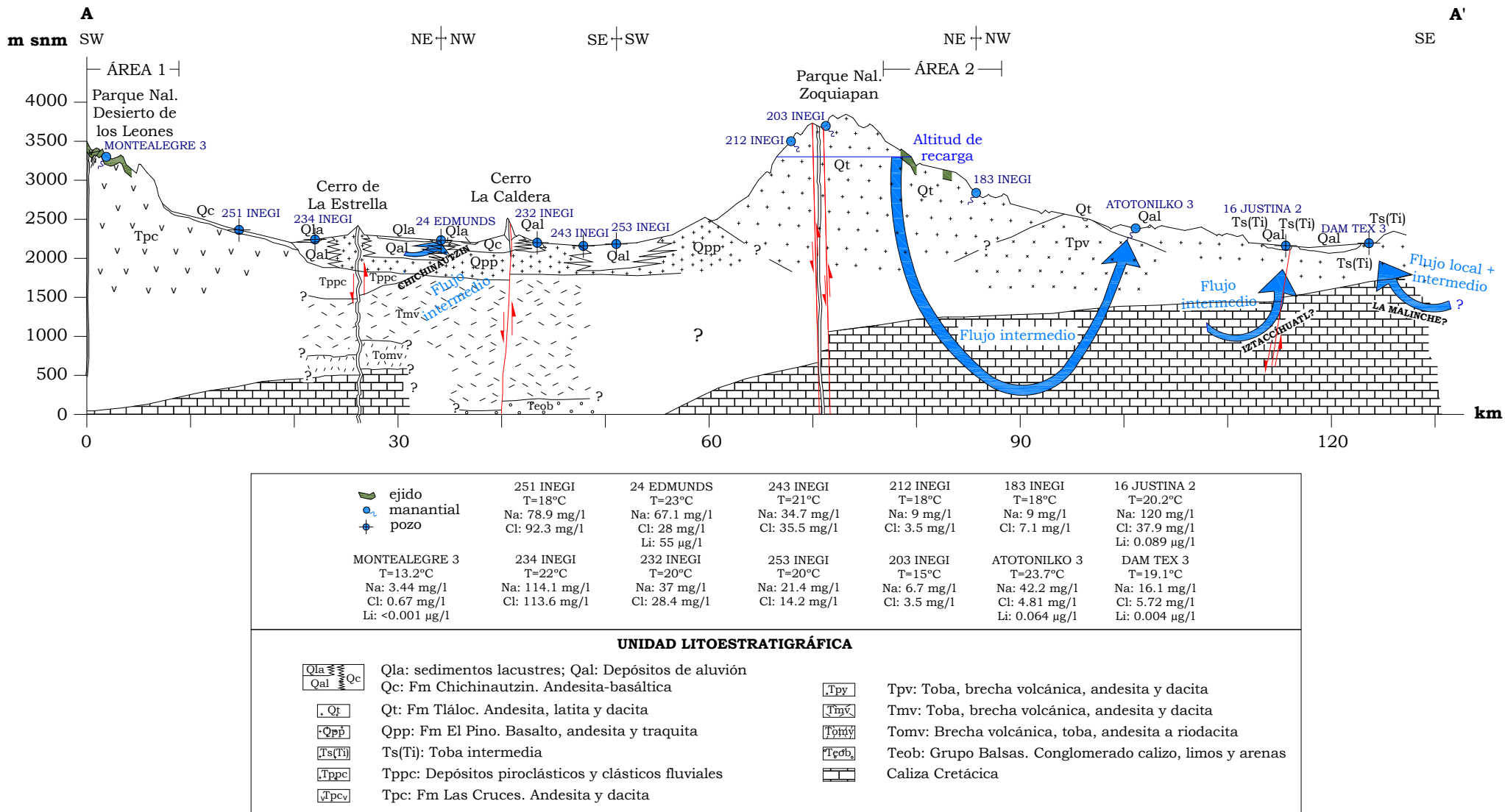


Figura No. 4.4. Sección hidrogeológica esquemática regional A-A'

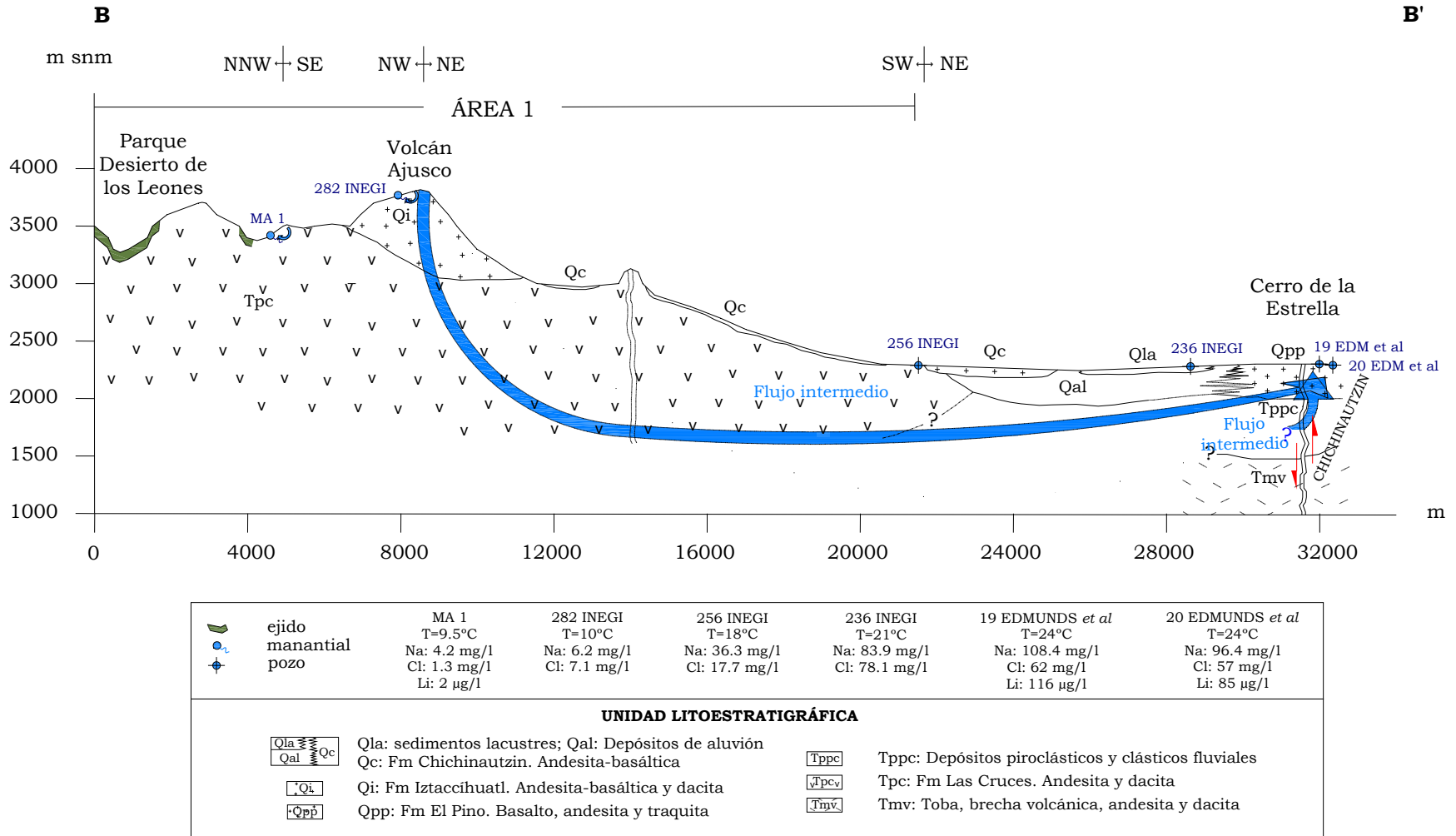


Figura No. 4.5. Sección hidrogeológica esquemática B-B', parte norte área de estudio 1

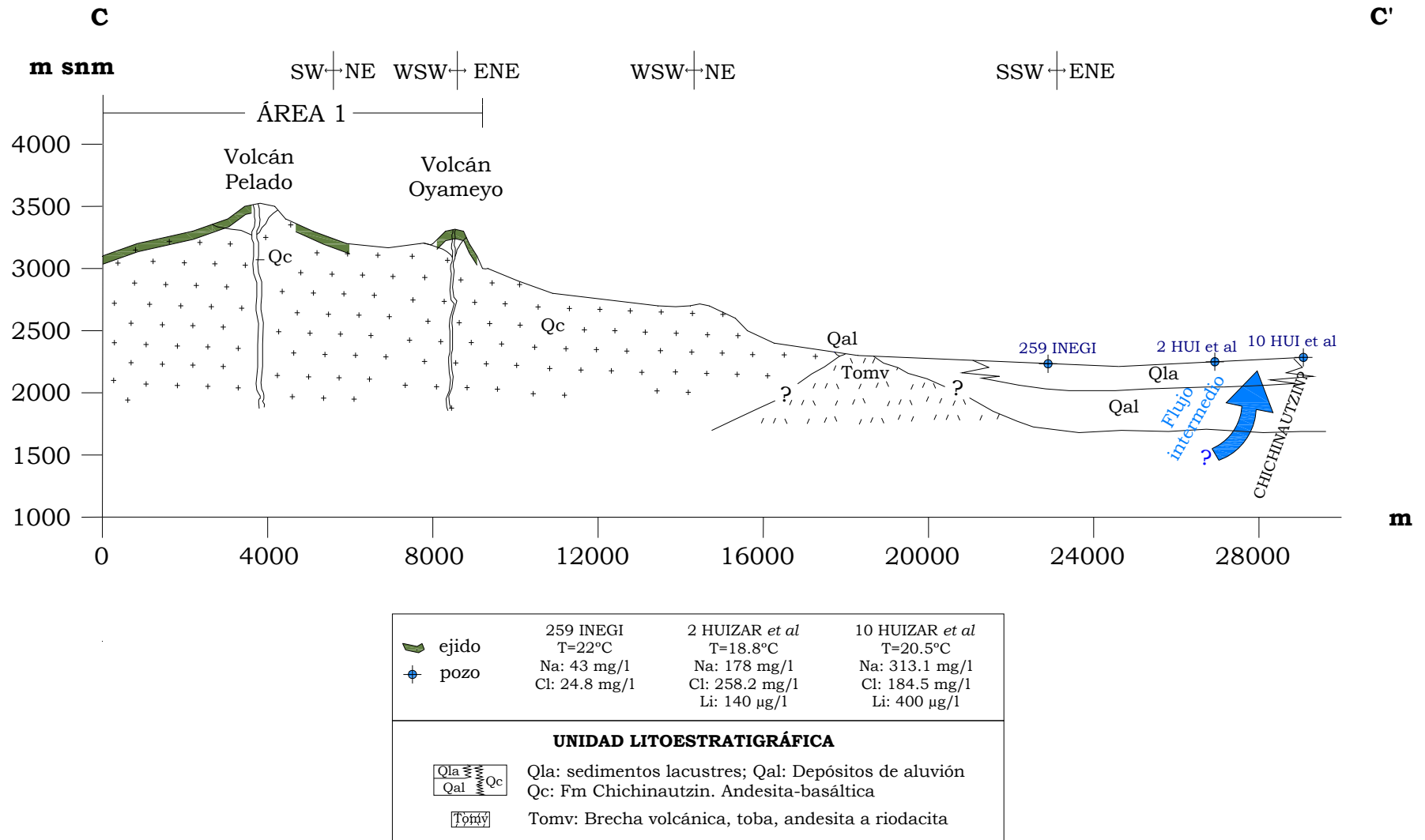


Figura No. 4.6. Sección hidrogeológica esquemática C-C', parte sur área de estudio 1

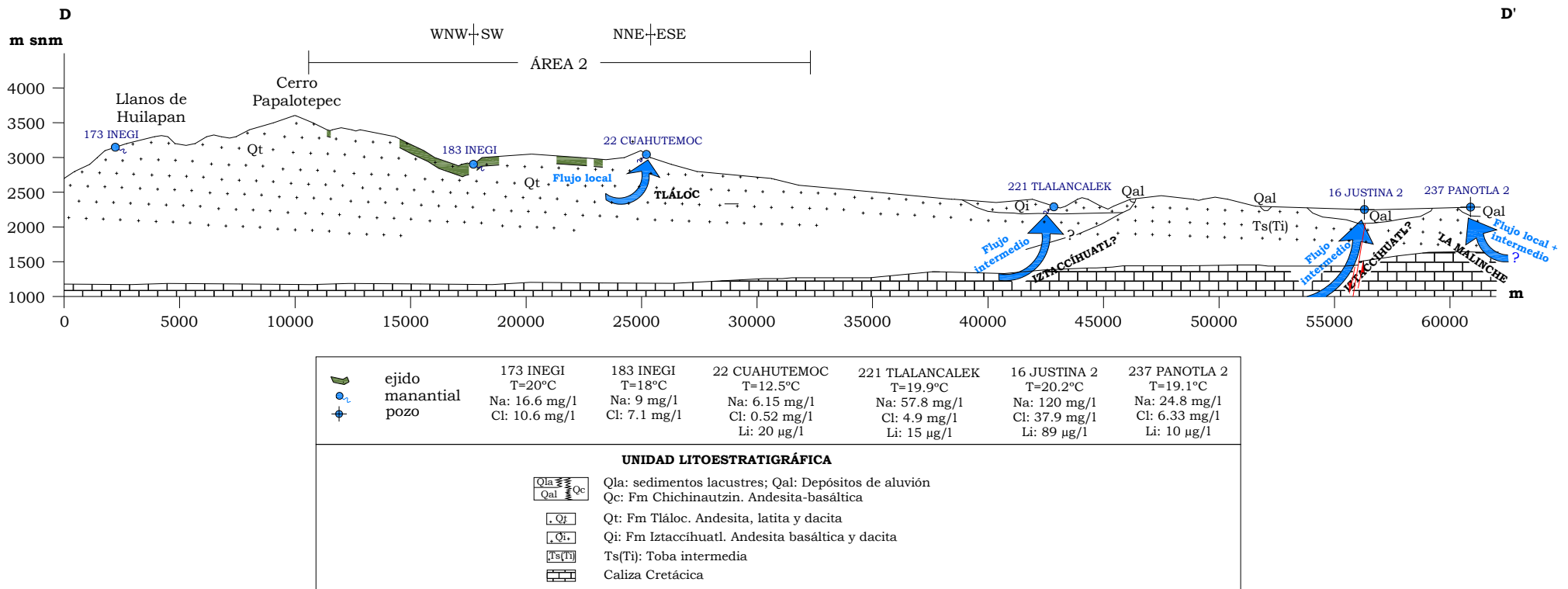


Figura No. 4.7. Sección hidrogeológica esquemática D-D', parte norte área de estudio 2

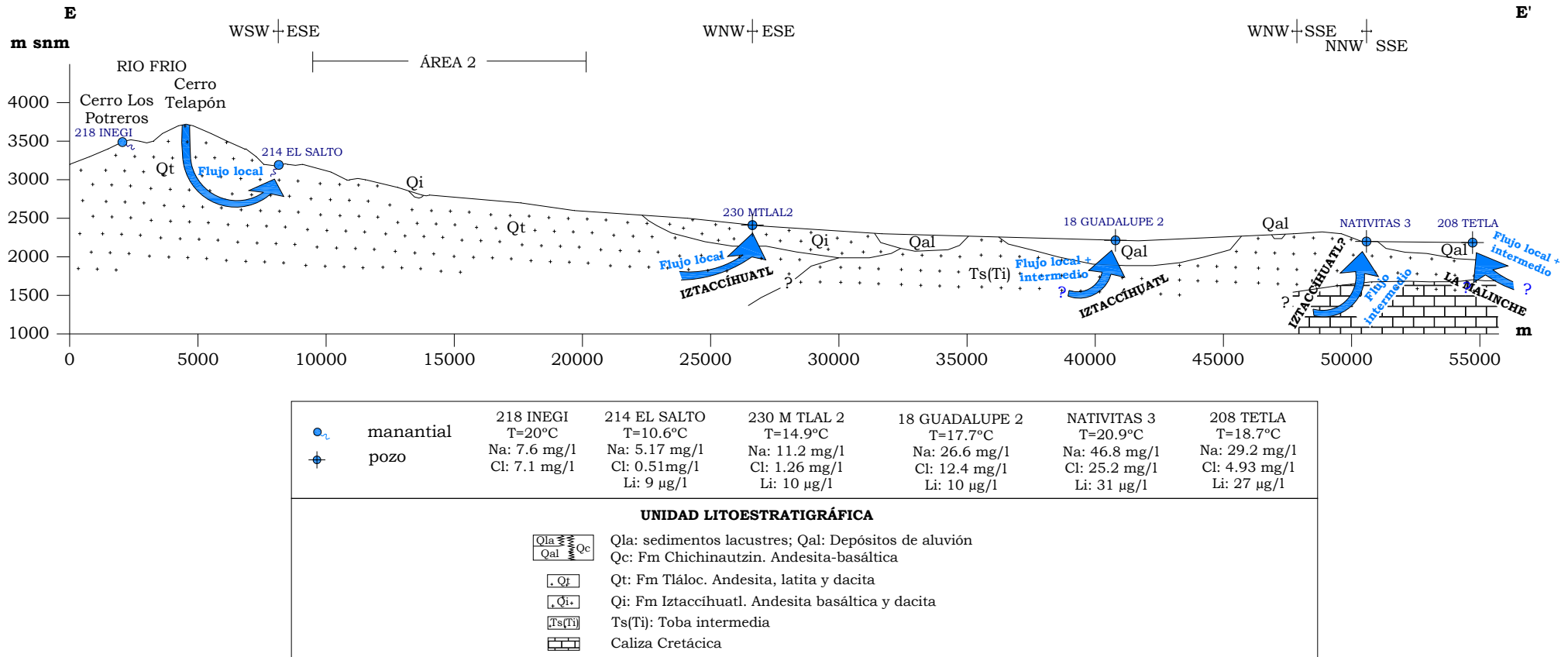


Figura No. 4.8. Sección hidrogeológica esquemática E-E', parte media área de estudio 2

## **5. PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL E IMPACTO AL AMBIENTE**

### **5.1. PROBLEMÁTICA DEL PAGO POR SERVICIO AMBIENTAL**

La implementación de los programas de pago por servicio ambiental ha originado una gran polémica mundial, muchas personas están en contra debido a que se considera el agua como un derecho, incorporando valores éticos y moralistas, donde no se debería pagar a alguien por la protección del agua sino que cada persona sea conciente de su importancia y valor propio.

Obviamente lo ideal sería que se materializara ese pensamiento, sin embargo, es claro que existen personas inescrupulosas, patrocinadas muchas veces por individuos del gobierno, que no buscan el beneficio común sino por el contrario realizan actividades lucrativas sin importar las consecuencias y efectos tanto ambientales como socioeconómicos, es el caso de taladores ilegales, que a pesar de ser reconocidos por la población no les afecta la normatividad vigente ya que cuentan con ayuda de algún alto mando del gobierno que los protege del castigo a los que deberían ser sometidos y al contrario, ya sea por temor o simplemente por desaliento de saber que no les ocurrirá nada, se les permite continuar con la actividad.

En vista que esta problemática continuará, generalmente en países en desarrollo caracterizados por su alto índice de corrupción, es importante aplicar algún tipo de programa que permita realmente la conservación y protección de la naturaleza. El pago por servicios ambientales es un primer intento, el cual no cabe duda debe ser reestructurado, bien definido, difundido, mejorado y lo más importante, que las instituciones encargadas de su gestión sean confiables e incorruptibles.

#### **5.1.1. Relación Bosque - Agua**

Como se menciona antes, el PSAH considera que las cuencas hidrográficas cubiertas de bosques son sistemas hidrológicos excepcionalmente estables, sin embargo, se resalta la dependencia del bosque en las condiciones de la precipitación, en tiempo y espacio. Se cree que una cobertura boscosa saludable y sin desarrollo alguno:

- influye considerablemente en el volumen de agua obtenida de las cuencas hidrográficas debido a que favorece la precipitación
- descarga agua de máxima calidad
- permite reducir el volumen máximo y total del caudal de agua resultante de la precipitación
- modera la variación entre los caudales máximos y mínimos a lo largo del año
- garantiza una mayor estabilidad del suelo, asimismo, frenan su desplazamiento, la erosión superficial y en cárcavas
- exporta el menor volumen de sedimentos aguas abajo

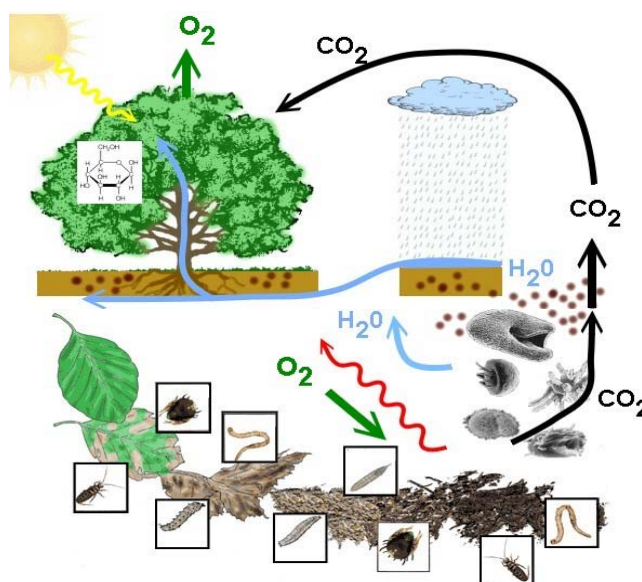


Por lo que cualquier alteración que se haga sobre el bosque, se cree afectará a su vez cualquier parámetro de la lista anterior. No obstante, esta relación bosque-agua no ha sido aún comprobada científicamente, menos la relación bosque-agua subterránea; muchos de los resultados alcanzados por numerosos estudios respecto a la producción de agua de áreas con diferente uso de suelo y tipo de vegetación son muy contradictorios, pero en su mayoría están de acuerdo en que la deforestación provoca un aumento de un 5% a 8% de la escorrentía superficial; por lo que las observaciones que permiten inferir la relación bosque-agua puede deberse simplemente a algunas concordancias sujetas a las condiciones de cada lugar y lo más conveniente es continuar el estudio no sólo de esta relación sino de aquella entre todas las componentes del ambiente para cada lugar en particular.

Considerando todas las variables involucradas, no es recomendable realizar extrapolaciones de información en este sentido, máxime cuando el agua subterránea no ha sido incorporada.

Adicionalmente, existe otro parámetro importante en el pago de servicios ambientales por captura de carbono del cual no se hace referencia alguna en los documentos de las conferencias y convenciones internacionales. Los bosques y selvas son considerados relevantes en la captura de carbono, ya que a través de la fotosíntesis las plantas absorben  $\text{CO}_2$  y generan  $\text{O}_2$  (Ver Figura No. 5.1), si bien es cierto este funcionamiento, se ha ignorado que este proceso fotosintético es dependiente de la energía del sol, no hay que olvidar que en la noche, las plantas solo respiran (absorben oxígeno y exhalan  $\text{CO}_2$ ) y al morir se descomponen, produciendo  $\text{CO}_2$ , por lo que queda en duda su potencial de capturar  $\text{CO}_2$ .

No obstante, no cabe duda sobre la importancia de los bosques y selvas para el buen funcionamiento y equilibrio del sistema terrestre y desde la perspectiva de paisaje, por lo que deben ser protegidos y preservados.



FUENTE: ACCENT Online Magazine

Figura No. 5.1. Ciclo del  $\text{CO}_2$  con energía solar, al no haber esta fuente el ciclo se invierte, las plantas absorben  $\text{O}_2$  y exhalan  $\text{CO}_2$

### 5.1.2. Efectividad del programa

Como se mencionó anteriormente, el programa de PSAH se inicia en México en el 2003 pretendiendo proteger cuencas hidrográficas, reducir desastres hídricos y recargar acuíferos, entre otros, sin embargo, según resultados del estudio de

Carrillo-Rivera *et al*, 2004, se señalan diversos problemas, corroborados en el presente estudio, éstos son:

- falta de control del agua (manantiales que toman agua para abastecimiento de localidades cercanas o apropiamiento de los mismos)
- falta de vigilancia y control sobre la tala de bosques en parques y reservas naturales
- incumplimiento de la Ley de Aguas Nacionales
- se carece de protección de aquellas zonas de recarga de agua subterránea asociadas con las zonas beneficiadas correspondientes

#### FALTA DE CONTROL DEL AGUA

Es importante conocer la localización, caudal, calidad de agua, etc., de manantiales y pozos con el fin de llevar un control, evitar la apropiación del agua y contar con datos históricos para estudios posteriores que permitan mejorar el desempeño del ser humano sobre el agua. No es tolerable que existan individuos que almacenen agua de un río o del subsuelo sin importar afectar a alguien más.

#### FALTA DE VIGILANCIA Y CONTROL SOBRE LA TALA DE BOSQUES EN PARQUES Y RESERVAS NATURALES

La idea de crear parques y reservas naturales radica en la protección y conservación del ambiente en determinados sitios, por lo que no debería existir tala de bosque ni ninguna otra actividad que afecte los ecosistemas y naturaleza o en caso tal de aceptar la tala debería ser con la condicionante de reforestar, esto con cierto cuidado, teniendo en cuenta que no se conoce aún los efectos ambientales positivos ni negativos por la reforestación o regeneración de vegetación, lo cual debe ser estudiados con detalle. Por último, de acuerdo a lo observado en campo y en acuerdo con el estudio de Carrillo-Rivera *et al* (2004), es importante aumentar la seguridad en bosques y parques para que realmente se cumplan los objetivos ambientales.

#### INCUMPLIMIENTO DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES

Según la Ley de Aguas Nacionales, capítulo II, artículo 6 en lo que compete al Ejecutivo federal, se menciona en el punto III que se requiere “La instalación de los dispositivos necesarios para la medición de la cantidad y calidad de las aguas nacionales y en general para la medición del ciclo hidrológico”, asimismo, en el Artículo 7 bis se declara de interés público en el punto VII “El control de la extracción y de la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas superficiales y del subsuelo”.

En el apartado *Ensayos para determinar parámetros hidráulicos*, en 1.4.2. Fase de trabajo de campo del capítulo 1 del presente documento, se hace referencia a la falta de dispositivos medidores de flujo o condiciones adecuadas para la realización de pruebas de bombeo en muchos de los pozos visitados en el trabajo de campo. Surge la inquietud en cuanto al control que tiene el Gobierno Mexicano sobre la cantidad de extracción de agua subterránea en el territorio nacional.

De igual manera, se aprecia entonces la validez de los datos que maneja la CNA en sus balances hídricos, siendo no aptos ni representativos de la condición actual del agua en el país. Es importante que la legislación mexicana se haga cumplir para beneficio de toda la población, así como para el ambiente, ya que a través del control, registro y manejo de datos de este tipo se podrán realizar investigaciones que permitan una mejor gestión de los elementos naturales.

PROTECCIÓN REAL DE ZONAS DE RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA

En el capítulo anterior se apreció con más detalle que el programa de PSAH tiene falencias en cuanto a la definición de proveedor – usuario del agua debido a que no se han establecido los sistemas de flujo que permitirían establecer con mayor precisión esta relación. De acuerdo con los perfiles realizados se obtiene que las zonas seleccionadas para pago realmente no corresponden con las zonas más potenciales de recarga de agua subterránea por lo que ese objetivo del PSAH no se está cumpliendo realmente.

Adicionalmente se tiene la problemática en cuanto a si EL PAGO QUE SE REALIZA CORRESPONDE REALMENTE CON EL COSTO DEL SERVICIO AMBIENTAL QUE SE OFRECE.

El bajo precio económico que se ofrece por proteger los bosques es otra dificultad a tener en cuenta en el PSA en general, ya que si la población no obtiene mayor provecho del bosque, no va a querer dejar su labor que le deja mayor ventaja monetaria. En las áreas de estudio predominan los bosques de pino, oyamel y pino-encino, cuyo valor comercial es descrito en la Tabla No. 5.1.

Tabla No. 5.1. Valor comercial de los tipos de bosque existentes en las áreas de estudio

<b>BOSQUE</b>	<b>VALOR COMERCIAL</b>
Pino	Mayor importancia económica en la industria forestal del país Actividades forestales como aserrío, resinación, obtención de pulpa para celulosa, postería y recolección de frutos y semillas.
Oyamel	Alto valor comercial de su madera, utilizada para leña, aserrío, construcciones rurales y urbanas, así como pulpa para papel. El tronco de los árboles jóvenes presenta gran cantidad de trementina (aceite de palo o trementina de oyamel), sustancia muy apreciada en la industria de barnices y pintura, como agente aromatizante de jabón, desinfectante, desodorante y perfume; también se utiliza como bálsamo con fines medicinales. En algunos lugares las ramas sirven de ornato en ceremonias religiosas y el árbol joven es usado como árbol de navidad.
Pino-Encino	Uso forestal y comercial. Suministra una variedad de materias primas de gran importancia económica como son pulpa para papel, celulosa, madera para la elaboración de varios productos, resina para la fabricación de brea, pinturas y aguarrás, además de proporcionar leña, madera para aserrío, para construcción, puntales, postes y durmientes.

FUENTE: Descripción del sistema de clasificación de vegetación de la cartografía de Uso del Suelo y Vegetación, INEGI; tomado de página web CONAFOR.

Uno de los fines del programa de PSA es hacer participe a las comunidades, impulsar la relación comunitaria y estrecharla, crear una conciencia de cuidado y protección hacia el ambiente, y que las comunidades comprendan que ellos son los principales encargados del bienestar de la cuenca y el entorno, y por último, que entiendan los beneficios de los PSA. No obstante, el lograr dicho fin es casi improbable si no se pagan tarifas justas y apropiadas.

En algunos estudios de PSA se menciona que este tipo de programas contribuyen a reducir la pobreza, lo cual es discutible y no está comprobado aún. Por tal afirmación y debido a que en muchas ocasiones concuerda que las áreas a proteger son habitadas por una parte de la sociedad sumamente pobre, los programas de servicios ambientales en México se están desviando de su objetivo inicial de preservar áreas naturales de interés.

Recientemente, la selección de ejidos beneficiados por el pago se desvía más a aspectos sociales, como índices de pobreza y marginación, que a la dinámica misma de la naturaleza, por lo que es indispensable impulsar una nueva metodología de selección y aplicación de PSAH para que realmente se cumpla con el objetivo de preservar áreas de interés ambiental más no socioeconómico. Es aquí donde surge la inquietud de si el PSAH es verdaderamente un programa diseñado para proteger y fomentar el cuidado ambiental o si simplemente es otra forma de crear mercados o herramientas que camuflan acciones de corrupción.

### **5.1.3. Intereses económicos ligados**

Una publicación titulada *“El CO<sub>2</sub> y el efecto invernadero: un mito para confundir al mundo”* de la Fundación Planeta Vivo (2006), señala que *“la teoría del “efecto invernadero” propagada a costa de muchos millones de dólares, tiene por objeto, entre otros, de ocultar la causa real del cambio climático global, la bien planificada eliminación de los bosques tropicales del mundo. Todo ello responde a muy mal concebidos intereses financieros y geoestratégicos”*. En el documento se hace una crítica en cuanto a la metodología de cálculo de los valores porcentuales de incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, que como se menciona en el capítulo 2 en el apartado de cambio en la cobertura boscosa, se pueden manipular los datos de diversas maneras, mostrando resultados no muy acordes con la realidad pero sí muy oportunos para determinados individuos con diferentes intereses, es así como en el documento se señala que el “efecto invernadero” principalmente se debe a la deforestación y en más bajo porcentaje al incremento en radiación UV de alta energía y otros gases, entre otros múltiples posibles factores, considerando que el aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha sido en baja proporción con respecto a todos los gases componentes y su efecto no se ha probado que puede ser tan devastador como los efectos que se presentan en la actualidad (sequías, inundaciones, etc).

En el mismo artículo se mencionan algunas razones que según los autores, están detrás del mito del “efecto invernadero” y el verdadero interés en los bosques, entre las cuales se encuentra la venta de energía nuclear (difamación del cambio climático por el incremento de CO<sub>2</sub>, búsqueda de nuevas fuentes de energía), identificación de armamentos a través de satélites (los bosques son un obstáculo

para los satélites), sociedad de consumo (insuficiencia de minerales, nuevas prospecciones y explotación en selvas), entre otros.

De igual manera, es posible que el programa de pago por servicios ambientales sea un medio que oculte los reales intereses de empresas de diversos países. Con el protocolo de Kyoto se inicia el mercado de captura de carbono, sin embargo, ya se vio que esta captura es incierta y puede ser una simple estrategia de países desarrollados que sólo pretenden aparentar su contribución con el ambiente, dando cierta cantidad de dinero para la “captura” de gases sin que esto afecte la producción de sus industrias y fábricas.

El PSAH puede ser un medio por el cual se busca asignar un valor monetario al agua para beneficio de cierto número de personas, un medio de privatización. Con esto se relaciona posiblemente el uso de palabras confusas (escasez, disponibilidad, sobre-explotación, recurso) que pretenden crear en la población pensamientos equívocos y generar una alerta referente a la cantidad de agua, calidad del agua y la creencia de posibles guerras futuras por el líquido, entre otros.

Al incorporar el concepto “escasez” de agua en la gente y la falta de información clara y precisa, facilita el incremento del precio del agua, crecimiento de industrias y negocios relacionados con el líquido y demás actividades ligadas al mismo para provecho de algunos pocos, un ejemplo claro es la venta de agua embotellada, la cual empezó como una moda de salir a la calle con la botella de agua y lo que se hizo fue vender la idea que el agua de la canilla era de mala calidad, siendo que en muchas ocasiones el agua embotellada viene del grifo y sin ningún tipo de tratamiento.

Asimismo, la publicidad ha creado un mercado de agua baja en sales, calorías y minerales, dirigida a aquella fracción de la sociedad interesada en cuerpos delgados, divulgándose que este nuevo tipo de agua no engorda y que ayuda a conseguir una figura esbelta, lo cual es falso. Al contrario, en la edad adulta es importante tomar agua con sales y minerales para alcanzar una buena hidratación y un buen funcionamiento del organismo; el agua baja en sales se recomienda a niños, personas de la tercera edad o individuos con problemas en los riñones e hipertensión arterial, entre otros.

Es válida la incorporación al mercado de agua baja en sales, donde cada quien sea autónomo de seleccionar lo más conveniente para sí mismo, el problema radica allí, en la imposibilidad de elección por parte de la población debido a que actualmente sólo se encuentra agua baja en sales en supermercados y tiendas, igualmente, se incluye en la problemática la falta de información por parte del consumidor sobre los efectos y consecuencias por el uso del producto y tener así finalmente criterios para realizar la mejor elección de acuerdo con las condiciones físicas de cada individuo y las propiedades del agua acorde con los elementos que contenga.

Se aprecia entonces como la manipulación de información a través de los medios (los cuales muchas veces los dueños son a su vez dueños de otras empresas) y la desinformación de la gente contribuye a que la gente adinerada cada vez aumente

sus ingresos y por el contrario, los pobres sean cada día más pobres, puesto que el costo asignado a la botella de agua es muy elevado y no vale la pena comprar agua embotellada puesto que el líquido que llega a las casas es por lo regular de buena calidad, sólo se requiere tener en buenas condiciones de aseo los tinacos donde se deposita el agua, ya que si no se limpian podrían encontrarse bacterias y elementos que afecten la salud.

El precio de una botella de agua de un litro en el mercado es de aproximadamente 10 pesos mexicanos, comparado con los dos pesos por metro cúbico (2 pesos por mil litros, La Jornada, 2007) que cuesta a través del suministro de agua de la ciudad, surge la inquietud del por qué el costo tan elevado del agua embotellada y si vale la pena pagar ese precio, ya que muchas veces es agua que proviene del sistema de abastecimiento de la ciudad sin tratamiento previo.

Cabe resaltar que no todas las regiones de la Ciudad de México cuentan con agua potable, existen zonas que se abastecen de agua de pozo, la cual puede tener elementos que por su alto contenido en el agua es perjudicial para los humanos, es el caso del agua de Iztapalapa que presenta alto contenido de hierro y manganeso. Teniendo en cuenta esta problemática sería de gran utilidad la elaboración de una zonificación de la ciudad que permitiera la definición de áreas que requieran de técnicas de potabilización y así evitar el negocio del agua para beneficio de unos pocos.

La privatización del agua generaría, entre otros, un alto precio del líquido y alimentos, lo que a su vez ocasionaría una disminución o desaparición del cultivo artesanal por la baja tasa de recuperación que no haría rentable el negocio, abriendo paso a la agricultura tecnificada, implicando una necesidad de mayor capital de inversión y ocasionando pérdida de trabajo de agricultores y campesinos, sin considerar los altos precios que se deberán pagar por los víveres y alimentos. Es importante el no permitir este tipo de acciones que sólo llevarán a mayor pobreza, hambruna y miseria a muchos, y por el contrario, mayor riqueza a algunos pocos. Así, los programas para fomentar la conservación de la naturaleza que incluyen un pago o retribución alguna a ejidatarios son de suma importancia para lograr disminuir la depredación y degradación de los elementos ambientales.

A pesar que la difusión de información referente a una futura falta de agua es alarmante, trae efectos positivos en la sociedad debido a que la inquietud que se genera hace que la población cuide y valore más el preciado líquido, cosa que no sucedería si se mencionara que realmente hay agua suficiente para determinado número de décadas o siglos, por lo que cualquier tipo de afirmación relativa al líquido debe ser analizada minuciosamente previamente a su publicación para evitar así efectos negativos tanto para el ambiente como para la sociedad.

## **5.2. IMPACTO AL AGUA Y AMBIENTE**

El PSAH, al ser bien aplicado, es una herramienta útil para preservar el ambiente y prevenir impactos sobre el mismo. Establecer zonas de recarga, tránsito y

descarga de agua subterránea, permite asignar actividades aptas para cada área según sus condiciones y servicios que presta a ecosistemas y seres humanos.

Asimismo, el conocimiento del funcionamiento del entorno natural, junto con la definición de procesos involucrados al flujo de agua subterránea, permite comprender los beneficios y ventajas que conllevan el conservar el ambiente para provecho de todos los elementos formadores del sistema, incluyendo el beneficio por conservar la cantidad y calidad del agua. Los principales procesos beneficiosos para el agua subterránea son su recarga y descarga.

### **5.2.1. Zona de recarga**

Esta zona es sumamente importante en cuanto a generación de algún tipo de impacto en el agua. Existen diversas actividades relacionadas con el uso del suelo que desencadenan problemas con respecto a la cantidad y calidad del agua, éstas son:

- Agricultura
- Reforestación
- Tala de bosque
- Pastoreo
- Expansión del área urbana, etc.

#### AGRICULTURA

Esta actividad es muy importante de considerar en zonas de recarga de agua subterránea debido a que su ejecución puede generar problemas relacionados con la compactación del terreno y pérdida de nutrientes del suelo, haciendo que el suelo se vuelva inútil para cultivo, con propiedades de suelo degradado y lo peor, que su regeneración sea nula o muy lenta. Por último, la compactación causada hará que el terreno se comporte como una barrera impermeable deshabilitando la posibilidad de filtración del agua de lluvia hacia el subsuelo, en otras palabras, desaparecerá la zona de recarga y por ende, se reducirá la cantidad de agua subterránea.

A su vez, el uso de plaguicidas y pesticidas contribuye a la contaminación del agua subterránea, afecta ecosistemas, la economía de una región, la calidad de los alimentos, y uno de los factores más importantes, la salud humana. Es importante ser concientes que la contaminación generada en la zona de recarga no sólo afecta ésta sino que también las zonas de tránsito y descarga.

#### REFORESTACIÓN

Ya se mencionó previamente que aún no existe sustento científico sobre la relación bosque-agua y su importancia en cuanto a la cantidad y calidad de agua (Apartado 5.1.1), igualmente, no se sabe a ciencia cierta que sucede con el agua al reforestar determinada región, si causa un efecto positivo o negativo, considerando que las nuevas especies podrían consumir mayor cantidad de agua para su desarrollo y crecimiento, pero que probablemente esto también

contribuya con un mejor funcionamiento y renovación de elementos y procesos en el sistema.

Un caso que si se ha estudiado y que se ha visto trae efectos más negativos que positivos es la reforestación y forestación con vegetación exógena o exótica a un territorio, donde se modifica y altera casi por completo la dinámica natural de determinado lugar.

#### TALA DE BOSQUE

Existen teorías contradictorias en cuanto a la tala de bosques, algunas investigaciones mencionan que es recomendable cortar bosques y ya sea sembrar unos nuevos o permitir la regeneración natural, con la teoría que los árboles jóvenes son más productivos para generación de oxígeno y agua. Otras investigaciones por su parte, consideran que no debe realizarse ningún tipo de actividad en los bosques. En el caso del programa de PSAH, no se incorporan posibles actividades asociadas con las características de cada terreno sino que se prefiere dejar tal como están los bosques, haciendo más difícil la aceptación del programa en las comunidades rurales. Por último, esta actividad puede crear problemas de erosión, alterando el paisaje, morfología y por supuesto la dinámica de la región. Otro punto de gran importancia es la falta de estudios donde se establezca la relación entre bosque y agua subterránea.

#### PASTOREO

El continuo traslado de animales a tierras fértiles con pastos y la forma de arrancar la vegetación de los animales al alimentarse, puede afectar el suelo del terreno, y al igual que por la agricultura, la zona de recarga podría verse disminuida por efectos de compactación. A su vez, esta actividad puede crear problemas de erosión, que como se mencionó previamente modifica el paisaje, morfología y por ende, la dinámica natural de la región.

#### EXPANSIÓN DEL ÁREA URBANA

La sola creación de nuevas áreas urbanas, muchas veces ubicadas hacia la zona montañosa de la Cuenca de México y del Río Balsas, genera una invasión de las zonas de recarga. Las construcciones realizadas en su mayoría con cemento y material impermeable no permite la infiltración del agua al subsuelo, por lo que afecta directamente la cantidad de agua que se recarga. Aunado a la construcción se encuentra la contaminación durante la misma y posteriormente, al usar las viviendas, ya que en ocasiones las nuevas viviendas no cuentan con los servicios básicos de saneamiento y las aguas negras son arrojadas al aire libre sin ningún tratamiento por no existir ninguna infraestructura de alcantarillado, alcanzando muchas veces el nivel freático y contaminando el agua subterránea.

#### **5.2.2. Zona de descarga**

A pesar que cualquier actividad que se realice en esta zona no afecta de manera directa el agua subterránea, teniendo en cuenta que se presenta flujo vertical ascendente que impedirá entrada de contaminantes por ejemplo, la zona de



descarga es importante para la realización de estudios científicos investigativos, ya que a partir del análisis de agua de descarga se pueden hacer interpretaciones que llevan a su punto de origen, o sea a la posible zona de recarga, fuentes de contaminación, disminución o aumento de cantidad de agua, etc. Por tal razón, no sólo debe ser considerada la preservación del zona de recarga en estudios hidrogeológicos y ambientales sino también el de descarga.

Por último, es recomendable la incorporación y realización de campañas educativas tanto para la población rural como la urbana, buscando promover y difundir la relevancia de las zonas de recarga y descarga de agua subterránea así como la importancia de visualizar la naturaleza como un sistema en el cual los seres humanos estamos incorporados y tan sólo somos un pequeño elemento formador del mismo, los cuales debemos ajustarnos a las condiciones de nuestro entorno y no lo que hacemos actualmente, que queremos ajustar lo que nos rodea a nuestra complacencia sin tener en cuenta todos los demás elementos formadores del sistema.

## 6. DISCUSION Y RESULTADOS

### 6.1. ¿RELACIÓN BOSQUE-SUELO-AGUA?

En el capítulo 2, apartado 2.5.2, se presenta la descripción de vegetación para las áreas de estudio, donde predominan los bosques de pino, oyamel, encino y pino-encino, comunidades cuya presencia es aparentemente influenciada por la altitud, entre otros factores. En la Tabla No. 6.1 se señala el intervalo de altitud correspondiente para cada tipo de bosque de acuerdo con la clasificación de los tipos de vegetación de la cartografía de uso del suelo y vegetación del INEGI (escala 1:250,000), y según la descripción de Mendoza-García (1994). En la misma tabla se exhibe una estimación de altitud de los bosques mediante el uso del SIG (ArcGIS) con base en la cartografía temática y curvas de nivel del territorio estudiado.

Tabla No. 6.1. Altitud asociada con comunidad de vegetación

BOSQUE	INEGI	Mendoza-García, 1994	Estimado con SIG
Oyamel	2,000 – 3,400 m	2,000 – 3,000 m	2,800 – 3,500
Pino	300 – 4,200 m	2,350 – 4,000 m	2,600 – 4,000
Encino	casi n.m. – 3,000 m	2,300 – 3,000 m	2,400 – 3,200
Pino-Encino	No especifica	No especifica	2,500 – 3,200

En esta tabla se aprecia cierto grado de similitud de los intervalos de altitud de las diferentes fuentes, donde el INEGI representa valores desde una perspectiva regional, aquellos de Mendoza-García (1994) corresponden con datos más específicos de la zona de la Delegación Magdalena Contreras y los valores estimados con SIG representan el territorio de estudio. No cabe duda que estos últimos son datos iniciales, usados simplemente para este ejercicio, que deben ser corroborados y mejor clasificados para obtener resultados de mayor calidad.

Respecto al bosque de pino-encino ninguna de las dos fuentes seleccionadas establecen su intervalo de altitud, el INEGI tan sólo señala que es la comunidad que ocupa mayor parte de la superficie forestal de las porciones superiores de los sistemas montañosos del país, y Mendoza-García (1994) menciona que por lo general, el bosque de pino-encino representa una vegetación de transición entre encinar y pinar, lo que ecológicamente equivale a un ecotono. Asimismo, diversos estudios que incorporan la descripción de bosques señalan un amplio intervalo de altitud donde es posible encontrar este tipo de relación pino-encino (desde 600 hasta 4,000 m snm), por lo que la elevación topográfica asociada a dicho bosque es sumamente variable y depende de cada lugar.

En el capítulo 4, apartado 4.3.2, se calculó la elevación topográfica de la precipitación inicial del agua de los manantiales y pozos muestreados en el presente estudio, correspondiendo algunas con zonas de recarga, donde se manifiesta la influencia de evaporación en las muestras (Ver Tabla No. 4.11). A esta elevación calculada de zona de recarga es posible atribuirle comunidades vegetales de acuerdo con los intervalos de altitud para bosques indicados previamente, principalmente aquellas estimadas en el presente estudio y en Mendoza-García (1994) (Ver Tabla No. 6.2).

En este sentido, no se incorpora el parámetro suelo ya que no existe un patrón que defina su presencia como en el caso del bosque, pues son diversas variables las que influyen para el desarrollo de un suelo como se describe en el capítulo 2. No obstante, la relación suelo-vegetación-agua fue evidente a escala regional y no se discrimina la posibilidad de su existencia a escala local, la cual debe ser estudiada minuciosamente.

Tabla No. 6.2. Posible vegetación asociada a zonas de recarga según la elevación topográfica en km (Z) del sitio muestreado

SITIO	Z	VEGETACIÓN
<b>PEÑUELA</b>		
214 EL SALTO	4.0	Pino
265 SALVADOR V3	4.0	Pino
MONTEALEGRE 1	3.6	Pino
MONTEALEGRE 3	3.5	Pino, oyamel
230 M TLAL 2	3.5	Pino, oyamel
208 TETLA	3.6	Pino
18 GUADALUPE 2	3.5	Pino, oyamel
ATOTONILKO 3	3.3	Pino, Oyamel
22 CUAHUTEMOC	4.0	Pino
<b>CORTÉS et al, 1989</b>		
1 Montealegre	3.8	Pino
2 Montealegre	3.9	Pino

SITIO	Z	VEGETACIÓN
<b>EDMUNDS et al, 2002</b>		
1	3.3	Pino, Oyamel
2	3.3	Pino, Oyamel
5	3.4	Pino, Oyamel
6	3.3	Pino, Oyamel
7	3.4	Pino, Oyamel
8	3.4	Pino, Oyamel
9	3.3	Pino, Oyamel
10	3.3	Pino, Oyamel
11	3.5	Pino, oyamel
12	3.4	Pino, Oyamel
13	3.3	Pino, Oyamel
14	3.0	Pino, Oyamel, encino, pino-encino
15	2.8	Pino, Oyamel, encino, pino-encino
16	3.0	Pino, Oyamel, encino, pino-encino
17	3.2	Pino, Oyamel, encino, pino-encino
18	3.1	Pino, Oyamel, encino, pino-encino
19	3.2	Pino, Oyamel, encino, pino-encino
21	3.2	Pino, Oyamel, encino, pino-encino
22	3.2	Pino, Oyamel, encino, pino-encino
23	3.3	Pino, Oyamel
25	3.2	Pino, Oyamel, encino, pino-encino
26	3.2	Pino, Oyamel, encino, pino-encino

Los resultados de la Tabla No. 6.2 exhiben una probable relación de bosque con zona de recarga de agua al subsuelo; se considera posible la asociación teniendo en cuenta que no se comprobó la vegetación en campo, de todos los sitios de muestra de agua incorporados en el análisis, sino que la información utilizada proviene de la cartografía del INEGI, la cual se encuentra a una escala muy pequeña y no muy detallada. Por tal razón, es recomendable realizar estudios específicos que permitan establecer con mayor claridad procesos involucrados y el efecto que tiene el bosque sobre la recarga de agua, en sí, definir la relación bosque-agua, ya que hasta el momento se tienen dos hipótesis contradictorias, de las cuales una señala que los bosques son favorables para el agua subterránea

debido a que es capaz de disipar la energía más que los cultivos, por ejemplo, un árbol es capaz de disipar de unas 6 a 7 veces más energía que diez plantas de maíz. A su vez, se cree que cuando hay sólo plantas pequeñas (como en cultivos), el suelo y la atmósfera se calientan más que cuando hay árboles, adicionalmente, el cambio de temperatura en las partículas de suelo al caer la lluvia es más brusco y aumenta la probabilidad de quebramiento, se producen partículas más finas, causando la impermeabilidad del terreno y por ende, un aumento en el escurrimiento (López, 1994). Cabe resaltar, que la realización de este tipo de estudios requiere de un período de observación continua (10-30 años) de las variables involucradas.

La otra hipótesis se refiere a la cantidad de agua que necesita el bosque para su subsistencia, ya que se consideran como pozos que extraen notables cantidades de agua de manera constante. De la misma forma, en el estudio de López (1994), se menciona también que cuando existen plantas de cultivo, se presenta menor evaporación, lo que lleva a una disminución de la humedad de la atmósfera, pero teniendo en cuenta la mayor temperatura del aire en presencia de un cultivo, se generará una disminución considerable de la humedad relativa, generando un cambio microclimático, el cual será dependiente del tamaño del cultivo.

La posible relación bosque-agua existente, obtenida previamente, permite reflexionar sobre el manejo de áreas boscosas e incidencia de la deforestación y uso del suelo sobre la recarga de agua al subsuelo, teniendo en cuenta que según el Centro Universitario para la Prevención de Desastres Regionales (CUPREDER, 2002; página web, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) en los últimos 20 años en la región de los volcanes (Izta-Popo) se ha deforestado alrededor de 10 mil hectáreas; esto es, una tasa promedio anual de 500 ha. Además en esos 20 años, la superficie erosionada fue de 1,666 hectáreas.

Del mismo modo, en el capítulo 2, se indicó de una disminución en la superficie de cobertura boscosa en el territorio de estudio, entre los años 1976 y 2000 de casi 15,000 Ha, incluyendo bosque primario y aquel con vegetación secundaria, el bosque primario fue el realmente afectado, disminuyendo aproximadamente 25,000 Ha en el mismo período. Como se indicó en el apartado de cambio en la cobertura boscosa del capítulo 2, se presentó un aumento de superficie de bosque con vegetación secundaria de más de 9,500 Ha. Es evidente la disminución de bosque primario en el territorio de estudio, por lo que deben realizarse acciones que detengan y desaceleren este proceso que afecta directamente áreas de recarga de agua subterránea, así como su cantidad y calidad.

A pesar que no ha sido comprobada científicamente la relación “mayor agua por mayor presencia de bosque”, como se menciona con anterioridad, se acepta la importancia que tiene el bosque, ya que de manera cualitativa se aprecia mayor retención de humedad y en general se considera al bosque como un agente importante en el funcionamiento y equilibrio del sistema terrestre (más no como productor de agua o retenedor de gases).

Por su parte, el parámetro suelo mostró ser un indicador a escala regional de zonas de recarga y especialmente de descarga de flujo intermedio y regional, ya

que por ejemplo, los grupos de suelo Solonchak, Fluvisol, Histosol y Gleysol, por sus rasgos hidromórficos tales como: moteado y concreciones de Fe-Mn, colores gley, elevado contenido de sales y/o sodio, entre otros, sugieren una asociación con zonas de descarga de agua subterránea. Asimismo, el agua del pozo del Peñón de los Baños, correspondiente con una zona de descarga de flujo regional, a pesar de encontrarse en la Ciudad de México, parece estar asociado al suelo Solonchak gleyico, característico del Lago de Texcoco, por lo que se ratifica lo indicado previamente sobre la relación del tipo de suelo con zona de descarga de agua subterránea.

Por último, los grupos de suelo señalados como indicadores de zona de descarga, se localizan en la parte más baja y hacia la planicie de la Cuenca de México, factor correspondiente con la Teoría de Tóth (2000), que considera las partes con menor elevación topográfica como zonas de descarga.

## **6.2. TIPOS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUS ZONAS DE RECARGA**

Los resultados del análisis hidrogeoquímico (incluye isotópos) del presente estudio, capítulo 4, demuestran que en las áreas de estudio prevalecen flujos local e intermedio. Cabe resaltar que no se excluye la presencia de flujo regional en el territorio, teniendo en cuenta que en estudios previos (Durazo y Farvolden, 1989; Edmunds *et al*, 2002) se evidencia este tipo de flujo (antes manantial y hoy pozo Peñón de Los Baños, principalmente) y como se indicó en el capítulo 2 (2.5.1 tipos de suelo), se encuentra en el territorio de estudio suelos de los grupos Solonchak, Fluvisol Histosol y Gleysol, los cuales están asociados con zonas de descarga de agua subterránea y precisamente se localizan hacia el lago de Texcoco y antiguos lagos de la planicie de México, confirmando así la posibilidad de encontrarse flujo regional en la Cuenca de México.

Algunos resultados importantes del presente estudio son: 1) la obtención de la elevación topográfica de la precipitación donde se recargan aquellos manantiales muestreados cuya agua no se ve afectada por evaporación y 2) la profundidad mínima que alcanza el agua en el subsuelo, determinada mediante el geotermómetro de calcedonia. Estos resultados hicieron factible la interpretación de los sistemas de flujo e información contenida en las secciones hidrogeológicas del presente estudio.

Asimismo, la posible trayectoria de los flujos de agua subterránea asociados con las muestras de agua tomadas fue determinada en el presente estudio, obteniendo que la muestra de Atotonilco 3, perteneciente a un tipo de flujo intermedio, el cual presenta mayor recorrido en el subsuelo que un flujo local y alcanza mayor profundidad, a su vez registró la mayor temperatura, concentración de estroncio y sólidos totales disueltos a diferencia de las demás muestras tomadas.

Otras de las muestras tomadas en campo pertenecientes a posible flujo intermedio son: 16 Justina 2, Nativitas 3 y 221 Tlalancalek, de las cuales, se destaca la alta presencia de fosfato en la primera, a diferencia de todas las muestras tomadas, que indica la posible preferencia de flujo a través de rocas con presencia de apatito. En la literatura se reporta este mineral en las formaciones

Chichinautzin (Qc), Las Cruces (Tpc), en las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv) y rocas volcánicas del Oligoceno Tardío (Tomv), unidades litológicas que deben tener continuidad lateral en buena parte del CVT. El flujo de agua subterránea de la muestra 221 Tlalancalek presenta un bajo contenido de estroncio, que permite estimar que el agua tiene poca interacción con la caliza, de acuerdo, a su vez, con el valor de litio y profundidad mínima de recorrido del agua de dicha muestra.

El cálculo de la altitud de la precipitación inicial se realizó mediante la ecuación de Cortés y Durazo (2001) para las muestras de agua tomadas en campo y aquellas de Edmunds *et al* (2002). Las Figuras No. 4.20 y 4.21 exhiben un mapa en planta con la elevación topográfica de la precipitación inicial obtenida pero que a su vez corresponden con zonas de recarga de agua que no es afectada por evaporación según el análisis isotópico, adicionalmente las figuras exhiben la posible trayectoria de los flujos asociados con los manantiales y pozos muestreados para este estudio y aquellos de Edmunds *et al* (2002).

La aplicación de la ecuación de Cortés y Durazo (2001) está basada en datos de agua de lluvia reciente, por lo que se considera que puede usarse en agua relativamente joven; teniendo en cuenta que el agua muestreada en el presente estudio corresponde a sistemas de flujo local e intermedio se estima que la altitud de precipitación inicial calculada en el capítulo 4 es válida. La altitud de precipitación estimada para las muestras tomadas en el presente estudio, que corresponden con zonas de recarga por no presentar efectos por evaporación, varían de 3.3 a 4.0 km snm; para aquellas muestras de Edmunds *et al* (2002) (excepto la muestra 15) se obtuvieron altitudes menores (3.0 – 3.5 km snm).

La altitud de la precipitación inicial del agua que es afectada por evaporación antes de recargarse se exhibe en la Figura No. 4.22, correspondiendo con una elevación topográfica que va de los 3.4 hasta los 3.9 km snm, a pesar que el efecto de evaporación no permite la correspondencia entre estas alturas y sus zonas reales de recarga, se considera que éstas se localizan en proximidades de la altitud estimada para la precipitación, ya que al parecer sufre poco efecto por evaporación, por lo que en la Figura No. 4.22 se señala la posible dirección de flujo de agua de acuerdo con la topografía del sitio.

Según los resultados obtenidos, se puede argumentar que las zonas de recarga del territorio de estudio se encuentran dentro de un intervalo de altitud de 3.0 – 4.0 km snm, incluyendo los resultados obtenidos de las muestras de Edmunds *et al*. (2002), sin embargo, no sólo es importante establecer zonas de recarga sino sus zonas de descarga asociadas, con el fin de proteger aquellas zonas de mayor interés, ya sea ecológico o socioeconómico.

En la Tabla No. 6.3 se realiza una comparación de algunas características relevantes entre los grupos de agua definidos en el presente estudio, destacándose la posible relación entre la altitud de recarga y el tipo de flujo, donde el flujo local parece estar asociado a una mayor altitud de recarga (3.5 – 4.0 km snm) que el flujo intermedio (3.3 – 3.7). Cabe resaltar que la mínima altitud del grupo 3 corresponde con la muestra Atotonilco 3, única del flujo intermedio que no presenta efectos de evaporación, por lo que se considera como

el valor más representativo de altitud de recarga, confirmando aún más esta posible reciprocidad altitud recarga - flujo.

No obstante, es importante tener en cuenta la diferencia de tiempo de recarga, esto es, el agua de flujo regional se recargó en otro periodo que el local e intermedio, con otro tipo de clima, posiblemente más frío (6°C menos que la temperatura actual, hace 20,000 años, según Vázquez-Selem L, 2007), factor que puede afectar la altitud de recarga estimada, considerando que el fraccionamiento de isótopos se debe a la temperatura, y que la línea meteórica mundial es una representación del comportamiento isotópico con base en el clima actual.

Tabla No. 6.3. Principales características por grupo de agua

<b>GRUPO</b>	<b>Posible altitud de recarga (km snm)</b>	<b>Cl (mg/l)</b>	<b>Li (mg/l)</b>
Grupo 1 - Local	3.5 - 4.0	0.5 - 1.9	<0.001 - 0.020
Grupo 2 - Mezcla	3.4 - 3.8	4.9 - 12.4	0.004 - 0.027
Grupo 3 - Intermedio	3.3 - 3.7	4.8 - 37.9	0.015 - 0.089

Por otra parte, se aprecia una variación en el contenido de fluoruro de las muestras catalogadas como de flujo intermedio, que puede deberse posiblemente a diferencias en la composición de la litología por la que se desplaza el agua subterránea. La muestra Atotonilco 3 presenta el valor más bajo de fluoruro con respecto a las demás correspondientes a flujo intermedio, cuyas concentraciones son más similares entre sí.

Asimismo, se aprecia en las Figuras No. 4.20 y 4.22, la posible trayectoria del flujo subterráneo para las muestras del presente estudio, donde precisamente la zona de recarga del agua de la muestra Atotonilco 3, parece estar ubicada en la Sierra de Río Frío; por su parte, la posible zona de recarga del agua de las muestras Nativitas 3, 16 Justina 2 y 221 Tlalancalek, corresponde con la Sierra Nevada. Así, la causa de la diferencia en la cantidad de fluoruro de las muestras, puede deberse realmente a la diferencia en la composición de las rocas por donde el agua subterránea se desplaza, mencionada previamente, ya que se observa contraste en las zonas de recarga y por ende, en su desplazamiento. No obstante, debe ser estudiada más detalladamente la estratigrafía y litología a profundidad.

Con base en los análisis físico-químicos e isotópicos, el uso del geotermómetro de sílice, relieve, vegetación, suelo y zonas de descarga o puntos de control (pozos y manantiales muestreados en el presente estudio), se realizaron cinco secciones hidrogeológicas, de las cuales una representa la dinámica regional (Figura No. 4.23) y las otras cuatro corresponden con las áreas de estudio (dos secciones por área, Figuras No. 4.24 a 4.27), en las cuales se exhiben las posibles trayectorias de sistemas de flujo del territorio estudiado.

La Figura No. 6.1 resume de manera general las principales contribuciones del presente estudio, exhibiendo la altitud de precipitación de flujo local e intermedio calculada correspondiente a posibles zonas de recarga en el territorio de estudio,

la profundidad mínima de recorrido del agua subterránea determinada con geotermómetros y las correspondientes zonas de descarga, igualmente, proponen que en el intervalo de 3.5 a 3.7 km snm puede ocurrir recarga de los dos tipos de flujo.

De esta manera, el presente estudio pretende contribuir a la sociedad en particular, con el conocimiento del funcionamiento del agua subterránea, al igual que con una primera definición de jerarquías de sistemas de flujo. Asimismo, a pesar que este tipo de programas de pago por servicio ambiental se implementa a nivel nacional e internacional, se aprecia en los resultados de diversas investigaciones y el presente estudio, que el pago que actualmente se realiza a través del programa de PSAH parece no corresponder con las zonas reales de recarga de interés o que prestan un servicio ambiental y benefician a comunidades en particular. Es evidente así, que aún no existe una metodología que permita identificar con precisión la red proveedor SA – usuario, por lo que el presente estudio es un avance en este sentido.

### **6.3. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL GENERAL**

A pesar de existir numerosos estudios que alertan sobre el cuidado del entorno, organizaciones y grupos interesados en solucionar problemas ambientales, no han logrado avanzar mucho en la cultura y política ambiental del país. En muchas ocasiones, los estudios realizados son archivados sin llevar a cabo recomendaciones planteadas en ellos; o en otras, se proponen prácticas inadecuadas debido a falta de información y de estudios que permitan definir y tener mayor conocimiento de la dinámica ambiental (poca inversión en investigación ambiental); es el caso de la zona lacustre de Tláhuac, donde se incorporó agua residual de la ciudad de México con el fin de conservar un nivel aceptable de humedad en los terrenos de labor, sin embargo, la inyección de esta agua de calidad no adecuada generó problemas de salinización del suelo, pérdida de fertilidad, plagas y enfermedades en la flora y fauna, incluyendo al hombre (Jiménez, 1990 tomado de Vela, 1996).

Por lo tanto, es necesario que el Gobierno Federal y las autoridades locales aumenten sus esfuerzos para dar cumplimiento riguroso a la legislación mexicana. Ya desde 1988, un estudio del Departamento del Distrito Federal (DDF) reveló que para ese entonces, en el DF se había perdido el 99% del área lacustre y el 73% de la superficie con bosque, de igual manera, el 71% del suelo se encontraba en avanzado proceso de degradación (Vela, 1996). Asimismo, en otro estudio se menciona que en cercanías del Ajusco, en los años 1987 a 1989 “surgió de manera crónica el asentamiento irregular conocido como Lomas de Seminario, que alcanzaba una dimensión de 400 hectáreas ubicado en el kilómetro 5.5 de la carretera Picacho-Ajusco, donde se depredó indiscriminadamente flora y fauna local. Esta escalada invasión alcanzó a sumar cerca de 3 mil familias que pretendían consolidarse en conglomerados como Cueva Grande, Periodistas, La Cruz, Haeckel, Moyers y El Pajar. Esta población que se instaló ilegalmente en el Ajusco medio, provocó daño no estimado a la ecología, poniendo en riesgo el agua subterránea por la acumulación de desechos orgánicos que se generaban. Además se ubican en áreas topográficamente muy



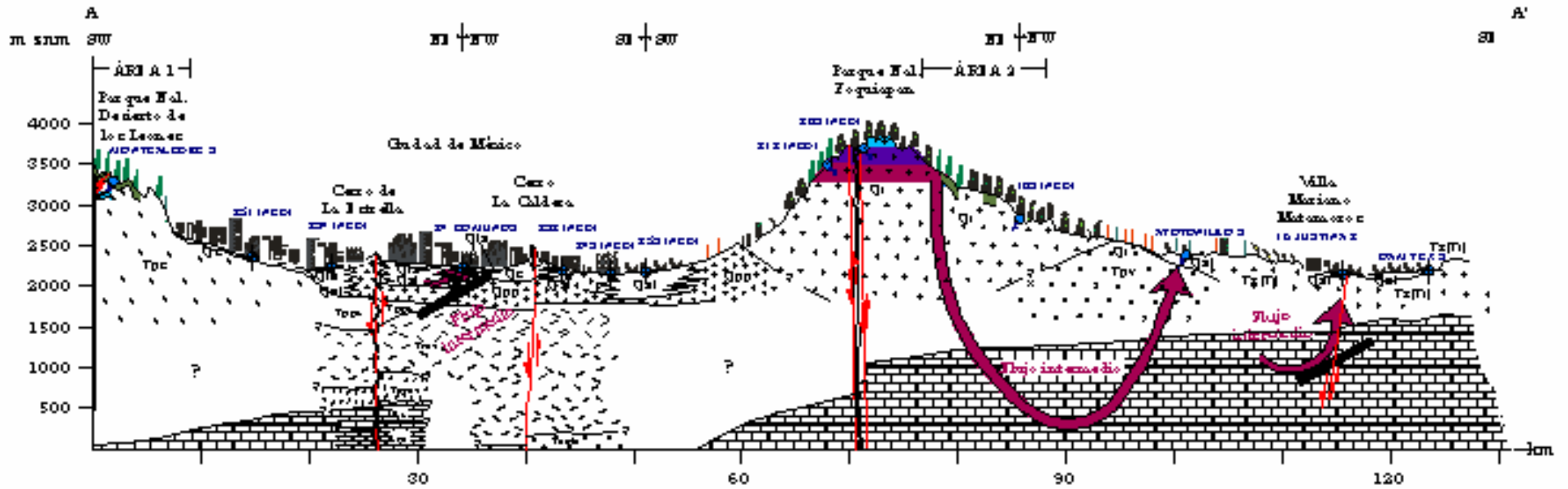
accidentadas que son difíciles de urbanizar” (Monografía de Tlalpan, México, DDF, 1996, p. 65. tomado de Quintino, 1998).

Quintino (1998) menciona la importancia de conservar la zona del Ajusco ya que el agua que se consume en la delegación de Tlalpan se obtiene principalmente de los manantiales ubicados en el cerro de esta zona. De igual manera, señala algunas posibles consecuencias ecológicas por la invasión de la Sierra del Ajusco, éstas son:

- 1) Degradación de la naturaleza; ejemplificando este asunto con los problemas ecológicos generados en Xochimilco, Lerma y otros. También señala la escasa eficacia de los mecanismos de control para lograr la conservación del área del Ajusco (mencionado también en Carrillo-Rivera *et al*, 2004), factor importante y que debe ser reforzado para alcanzar los objetivos de cualquier programa ambiental
- 2) Desequilibrio ecológico; movilización o desaparición de fauna y flora, alterando los ecosistemas y modificando la dinámica de la naturaleza
- 3) Degradación del hombre; el desequilibrio ecológico puede originar enfermedades gastrointestinales, del aparato respiratorio, tensiones nerviosas, etc.

De esta manera se aprecia que los resultados de estos estudios que exponían la problemática existente desde tiempo atrás, no fueron valorados y lo que es más grave, increíble y preocupante, que hasta la fecha (2007) se continúa con la ejecución de prácticas inadecuadas que permiten la consecuente degradación del entorno y elementos naturales. Es triste pensar que la mayoría de la humanidad sólo se dará cuenta de la importancia del ambiente cuando ya no existan posibilidades de dar vuelta atrás, cuando se dé cuenta de la presencia de los procesos irreversibles que tanto se habían mencionado en diferentes publicaciones anteriores.

Así, se aprecia que es importante y de carácter urgente, involucrar las investigaciones realizadas, tanto en las universidades como en entidades privadas, en investigaciones, proyectos y programas futuros para lograr efectivamente la conservación del ambiente. De igual modo, los programas deben manejar un lenguaje sencillo, ser lo más claro posible y difundido en la sociedad, para evitar cualquier tipo de manipulación que permita obtener beneficio sólo para un cierto grupo como se menciona en el capítulo 5, se requiere que los objetivos de cualquier programa realmente se cumplan, buscando el bien para toda la población, ecosistemas y ambiente en general.



Vegetación	Unidades litológicas	Simbología
Bosque de pino	Qla: sedimentos lacustres; Qal: Depósitos de aluvión	pozo y número
Bosque de Oyamel	Qc: Fm Chichimutzin. Andesita-basáltica	manantial
Bosque de encino	Qt: Fm Tláloc. Andesita, latita y dacita	ejido
Bosque de pino-encino	Qpp: Fm El Pino. Basalto, andesita y traquita	asentamiento humano
Vegetación secundaria	Tx(Ti): Toba intermedia	Altitud de recarga de flujo local
Agricultura de temporal (CP y S)	Tpc: Depósitos piroclásticos y clásticos fluviales	Altitud de recarga de flujo local e intermedio
Agricultura de temporal (CA)	Tpc: Fm Las Cruces. Andesita y dacita	Altitud de recarga de flujo intermedio
Partizal Inducido	Tpv: Toba, brecha volcánica, andesita y dacita	Dirección de flujo
Agricultura de riego	Tmv: Toba, brecha volcánica, andesita y dacita	Falla geológica
Plantación forestal	Tomv: Brecha volcánica, toba, andesita y dacita	
	Teob: Grupo Belizac. Conglomerado calizo, limon y arenas	
	Kc: Formación Ousutla. Caliza fósilífera	
	Kc: Formación Ousutla. Caliza fósilífera	
	Profundidad aproximada de la corteza cretácica (Mooser et al., 1996)	

Nota: Sección ubicada en la Figura No. 4.4

Figura No. 6.1. Sección hidrogeológica esquemática regional, incluye vegetación y los intervalos de altitud de precipitación (posibles zonas de recarga) de flujos local e intermedio.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La evaluación de diversas variables analizadas en el presente estudio corroboran la afirmación que las sierras Nevada y Las Cruces son zonas de recarga de agua subterránea de flujos que se han identificado en su mayoría como locales, no obstante, es relevante realizar investigaciones que permitan definir la trayectoria del flujo y así obtener un mayor conocimiento del funcionamiento del agua subterránea y su relación con la naturaleza, para finalmente definir las zonas más adecuadas para recibir pago por SAH, realizar una mejor gestión del líquido en beneficio de todos (seres vivos, humanos y componentes del ambiente) y minimizar o evitar impactos negativos al agua.

A continuación se señalan las principales características de las sierras que permiten afirmar de manera cualitativa su asociación con zonas de recarga:

Clima: son las partes más frías del territorio, factor atribuido en gran parte por su elevación topográfica (alcanzando el volcán Popocatepétl los 5,452 m snm), donde la precipitación alcanza los 2,000 mm al año.

Suelo: los grupos de suelo predominantes son el andosol, leptosol y cambisol, los cuales de acuerdo con sus propiedades físicas se relacionan más con zonas de recarga que descarga. El andosol se caracteriza por ser un suelo derivado de material volcánico y presenta alta capacidad de retención de agua, el leptosol es un suelo somero, gravoso y pedregoso, el cual permite la infiltración de agua de lluvia; y el cambisol, por su parte, es un suelo poco desarrollado. No obstante, se indica nuevamente sobre la importancia de realizar estudios específicos de suelos que permitan determinar y establecer la relación suelo-zona recarga/descarga.

Relieve: son las partes más altas de las cuencas de México y Río Balsas (Puebla-Tlaxcala), factor de suma importancia de acuerdo con la Teoría de los Sistemas de flujo (Tóth, 2000).

Vegetación: Predominan los bosques de pino, oyamel, encino y pino-encino, los cuales según la Tabla No. 6.2, se sugiere que están asociados con zonas de recarga para este territorio en particular.

De manera cuantitativa, según la ecuación de Cortés y Durazo (2001), la altitud estimada en el presente estudio como zona de recarga para las muestras tomadas en campo son de 3,3 a 4,0 km snm, para las muestras de Edmunds *et al* (2002) (sin incluir la muestra 15, perteneciente al Peñón de los Baños) son de 2,8 a 3,5 km snm. En la *Tabla No. 7.1* se señala el intervalo de altitud para las áreas de estudio para apreciar cualitativamente la posible cantidad de superficie asociada con zonas de recarga según los resultados reportados anteriormente.

Tabla No. 7.1. Intervalo de altitud de las áreas de estudio

Área de estudio	Altitud (km snm)
Norte área 1	2,7 – 3,7
Sur área 1	3,0 – 3,5
Norte área 2	2,9 – 3,7
Sur área 2	2,8 – 3,6

En el capítulo 4, se muestra un mapa con la elevación topográfica obtenida para la precipitación inicial de las muestras del presente estudio y aquellas de Edmunds *et al* (2002) (*Ver Figuras No. 4.20 y 4.21*), pero que a su vez corresponde con posibles zonas de recarga de agua que no es afectada por evaporación según el análisis isotópico, adicionalmente las figuras exhiben la posible trayectoria de los diferentes flujos.

En cuanto a las áreas de estudio, de acuerdo con los resultados en el capítulo 4 (*Ver Figuras No. 4.23 a 4.27*), al parecer no son las más apropiadas para recibir el pago por servicio ambiental hidrológico puesto que las zonas de recarga determinadas para las muestras de agua tomadas en este estudio se encuentran ubicadas en otros sitios que no corresponden con los ejidos seleccionados para el pago (*Ver Figuras No. 4.20 a 4.22*). Sin embargo, es posible que sean zonas de recarga, sólo que no se ha establecido su correspondiente zona de descarga y mucho menos la trayectoria de su flujo. De esta manera, se aprecia que el objetivo del PSAH no se está logrando, debido a que hasta el momento no se han definido zonas de recarga, la correspondiente trayectoria del agua infiltrada, su zona de descarga y la dirección de los diferentes sistemas de flujo del territorio, que permitan establecer con precisión el beneficiario directo por la conservación de un área que presta un servicio ambiental hidrológico.

La mayoría de estudios de agua subterránea e hidrología en el territorio nacional se limitan al uso del balance hídrico, metodología que fue discutida en el apartado de referente teórico del capítulo 1 y la cual presenta problemas en cuanto a la obtención de los diversos parámetros que componen la ecuación. La aplicación del balance hídrico se considera válida como técnica de cuantificación, siempre y cuando se cuente con una densa red de estaciones localizadas en sitios estratégicos, se realicen cálculos bajo supervisión y se tenga un mayor conocimiento físico del área (vegetación, clima, latitud, viento y demás parámetros que puedan afectar las variables de la ecuación), asimismo, debe existir una base de datos histórica confiable y conocer los límites físicos de la cuenca hidrológica (laterales y profundidad), para así incorporar todas las posibles entradas y salidas de agua al sistema.

El presente estudio considera no apropiado emplear el balance hídrico de acuerdo con el objetivo principal del PSAH, teniendo en cuenta que las áreas de estudio hacen parte de una cuenca hidrográfica de grandes dimensiones (sin contar que la Cuenca de México está conectada subterráneamente con otras cuencas hidrográficas, lo que realmente conformaría la cuenca hidrológica), la cual no presenta una red confiable de estaciones hidrométricas y climatológicas, ni datos históricos de diversas estaciones localizadas dentro de la cuenca hidrológica; así como el hecho que el balance hídrico no involucra procesos e interrelación entre

los diferentes elementos del ambiente. Por el contrario, la aplicación de la Teoría de Tóth (2000), incorporando suelo, vegetación, relieve y otros parámetros ambientales, junto con el análisis hidrogeoquímico de las muestras de agua tomadas en campo, permitió establecer con menor grado de incertidumbre las zonas relacionadas con recarga de agua al subsuelo y su respectiva zona de descarga, principal objetivo de esta investigación.

La definición de zonas de recarga y descarga, es necesaria y relevante para cualquier estudio hidrológico y ambiental, ya que cualquier afectación durante el proceso de recarga, tránsito o descarga de agua, generará un impacto (ya sea positivo o negativo) en el ambiente y por supuesto, en la calidad y/o cantidad del agua superficial y subterránea, teniendo en cuenta que la descarga es una manifestación en superficie de la recarga.

La zona de recarga es considerada de mayor interés ambiental para su conservación que aquella de descarga debido a que es allí donde se infiltra el agua y se puede presentar problemas de contaminación o disminución de volumen de agua, sin embargo, es de suma importancia el incorporar en programas de protección ambiental zonas de descarga teniendo en cuenta que son la expresión del agua subterránea en superficie, cuyas características fisicoquímicas y su análisis espacial relacionado con las diversas componentes del ambiente, permite la comprensión de la dinámica del agua.

Durante la recarga de agua al subsuelo pueden existir actividades asociadas principalmente con el uso del suelo que afectan de manera negativa el agua, algunas de éstas son la agricultura, reforestación, tala de bosque, pastoreo y expansión urbana, las cuales a su vez, pueden desencadenar problemas de erosión, afectando directamente el proceso de recarga y adicionalmente generar problemas de estabilidad de suelo y talud.

En cuanto a la descarga, es un proceso que debe ser igualmente estudiado debido a que en muchas ocasiones es el responsable de ciertas condiciones ambientales, como presencia de un humedal en alguna región, la cual por más que se realicen acciones para su acondicionamiento con determinado fin, regresará a sus condiciones originales; un ejemplo claro es cuando se presentan suelos salinos, correspondientes a una zona de descarga, los cuales desean ser modificados para su aprovechamiento para agricultura, por lo que se realizan acciones para disminuir su salinidad como regar con agua dulce; sin embargo, lo que realmente se está ocasionando es un ascenso adicional del nivel freático, induciendo a que el agua con alto contenido de sales salga más a superficie, inundando y afectando mayor terreno que antes.

La determinación de zonas de recarga y descarga debe ser a través de un estudio sistemático donde se consideren todas las posibles variables existentes y no sólo por medio de alguna por separado, ya que como se indica en el presente trabajo todas las variables son parte de un sistema relacionadas entre sí, donde el relieve por ejemplo (sin incluir altitud y longitud), atribuye el factor clima, el cual a su vez, junto con la litología del área (en este caso, rocas volcánicas andesíticas a basálticas en general) ayudan a la formación de determinado tipo de suelo (sin

olvidar los demás factores formadores de suelo), lo que se liga también con el tipo de vegetación que se puede desarrollar en el mismo.

El análisis de los cambios en la cubierta forestal y uso del suelo, un objetivo específico inicial, se realizó usando la cartografía existente del INEGI (1976) e Inventario Nacional Forestal (2000), revelando una problemática relacionada con la disminución de superficie de bosque primario y un aumento de bosque secundario, asimismo, se observa una tendencia de crecimiento de áreas de cultivo y urbanas hacia elevaciones topográficas más altas, acercándose cada vez más a las zonas de recarga, y otras actividades (reforestación, tala de bosque, pastoreo) que hacen más susceptible al agua subterránea de algún impacto ambiental, ya sea por contaminación o disminución del caudal, relacionado con alguna modificación en el uso del suelo.

No obstante, debido a que la información corresponde a períodos anteriores a la implementación del programa de PSAH, es conveniente realizar un análisis para visualizar algún posible efecto en el uso del suelo por el programa, surge aquí la cuestión de la actualización de información cartográfica y temática, la cual ya no se realiza por parte de las instituciones públicas y que como se aprecia realmente son de suma importancia. Otro mecanismo para actualizar o monitorear dicho efecto es a través de imágenes de satélite recientes, no obstante, esto sería para estudios específicos sobre el tema, ya que el presente pretendía identificar posibles impactos al agua subterránea por cambios en la cobertura forestal y uso del suelo, sin mencionar lo referente al presupuesto y tiempo para desarrollar la investigación, sin embargo, de acuerdo con el objetivo, se considera satisfactoria la evaluación de impactos realizada.

Algunos de los principales resultados del presente trabajo, incluyen una primera aproximación del funcionamiento del agua subterránea, definición de posibles zonas de recarga y jerarquías de sistemas de flujo, a partir de: 1) la obtención de la elevación topográfica de la precipitación donde se recargan aquellos manantiales que no se ven afectados por evaporación, 2) profundidad mínima que alcanza el agua en el subsuelo y 3) localización de zonas de descarga de agua subterránea ligadas a su respectiva zona potencial de recarga. Por lo que la hipótesis planteada en el presente estudio fue verificada, comprobando así que la aplicación de la Teoría de Tóth, análisis hidrogeoquímicos y uso de isótopos ambientales, son herramientas útiles para la obtención de un mayor conocimiento de la dinámica del agua subterránea, asimismo, por tal razón, se propone que la metodología empleada en el presente estudio es de gran importancia para análisis hidrogeológicos, y en un sentido amplio, en estudios ambientales, por ende, es una contribución a la sociedad y específicamente al programa de PSAH.

Una apreciación del presente estudio, es que a pesar de encontrarse las áreas de estudio sobre diferente tipo de suelo y formaciones geológicas, la composición general de las rocas es similar, variando de andesítica-basáltica a dacítica, a su vez, la geomorfología, clima, vegetación y uso del suelo es semejante. Por su parte, los resultados de química del agua no señalan diferencias significativas, desde la perspectiva de su funcionamiento, entre una área y la otra, no obstante, se consideran pocos datos de referencia para afirmar tal suposición y se

considera que deben realizarse más estudios que permitan ver posibles discrepancias entre las áreas de estudio.

Uno de los objetivos específicos de esta investigación fue definir los límites físicos naturales del acuífero, lo cual no se cumplió cabalmente debido a las dimensiones del sistema, no obstante, se tiene la hipótesis de la continuidad del sistema como una unidad acuífera continua a lo largo del Cinturón Volcánico Transmexicano; y se tiene también, la problemática aún no resuelta del espesor total de la columna estratigráfica, potencialmente acuífera (estimada en más de 3,000m de espesor) bajo la Cuenca de México, por lo que la acción de identificar los límites físicos del sistema acuífero queda todavía pendiente. Cabe señalar sobre la ventaja del uso de metodologías como la aplicada en el presente estudio, ya que a pesar de no conocer estos límites naturales del sistema, el análisis hidrogeoquímico realizado es válido por no presentar dependencia alguna con esta variable, por el contrario, en el caso del balance hídrico si es necesario establecer las dimensiones del sistema para identificar toda posible entrada y salida de agua a una cuenca.

Como se menciona en diversas partes del estudio, la metodología a emplear en estudios ambientales e hidrogeológicos debe incorporar un análisis regional, que abarque mayor extensión territorial del área específica de análisis, con el fin de visualizar los elementos que interactúan en el sistema y así, obtener un mayor entendimiento de la dinámica de la naturaleza en general; esto permitirá incorporar variables de carácter regional que posiblemente no se identificarían con un simple análisis local, de ahí radica la importancia de iniciar un estudio de manera sistemática y regional para finalizar de forma puntual y detallada.

Queda clara la importancia de realizar estudios sistemáticos para cada sitio, teniendo en cuenta la variabilidad de las diferentes componentes del mismo y más aún que los resultados de estas investigaciones sean considerados e implementados en futuros proyectos y programas. A su vez, el estudio de elementos ambientales debe ser continuo en espacio y tiempo, teniendo en cuenta los cambios que ocurren a lo largo del tiempo por la misma dinámica de la naturaleza.

A pesar que la presente investigación es un gran avance del conocimiento del flujo de agua subterránea de la Cuenca de México, donde se definen altitudes más que zonas de recarga, es claro que la continuación de estudios relacionados con el tema es relevante, ya que permitirán corroborar resultados anteriores, los presentes, así como optimizarlos para lograr establecer y delimitar con mayor precisión las zonas de recarga y la red usuario-proveedor para el pago por servicio ambiental. Un buen ejemplo de estudio a seguir después de los resultados del presente estudio es el uso de ciertos isótopos, tales como  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  y  $^{13}\text{C}$ , los cuales permiten obtener la edad media del agua y calcular a su vez la trayectoria del agua subterránea de acuerdo con la conductividad hidráulica, porosidad y gradiente, asimismo, es importante hacer junto con el muestreo de agua uno de vegetación para identificar la actividad de carbono en la zona de recarga.

Según las observaciones y análisis realizados en el presente estudio, se aprecia que es menos difícil la identificación de suelos asociados con zonas de descarga

de agua subterránea de flujos intermedio y regional que aquella relacionada con suelo de recarga, por lo que deben realizarse investigaciones más específicas al respecto.

Otro aspecto que se debe estudiar con más detalle es aquel relacionado con la cobertura vegetal, si realmente contribuye con la recarga de agua al subsuelo o si por el contrario la afecta, lo que permitiría ver alguna posible dependencia del agua a bosques y vegetación, ya que en el presente estudio se aprecia de manera cualitativa una asociación entre los bosques de pino, oyamel, encino y pino-encino con zonas de recarga para el territorio analizado, lo cual debe analizarse.

Igualmente, sería útil investigar sobre la influencia de la geomorfología en la recarga de agua al subsuelo, esto se refiere a analizar por ejemplo una altitud de las obtenidas de recarga y hacer una comparación entre la infiltración generada en un sitio plano y otro con pendiente, teniendo en cuenta que mucha de la superficie de las áreas de estudio corresponde con ladera de montaña surge la inquietud; parece obvio pensar que la recarga se generará más en lo plano, sin embargo, esto no ha sido objeto de estudio y podría contribuir a delimitar con mayor facilidad zonas de recarga asociadas con pequeñas planicies.

Asimismo, se requiere crear y hacer cumplir las diferentes leyes que pretenden proteger el ambiente, evitando así la tala ilegal de madera, asentamientos humanos en áreas naturales protegidas, uso del suelo no acorde con su aptitud, acciones de forestación sin control, etc. A su vez, la Ley de Aguas Nacionales debe ser revisada para incorporar el funcionamiento del agua subterránea, asimismo, debe ser respetada y es necesario hacer ver la importancia del uso de dispositivos medidores de flujo para llevar un control de cantidad y calidad del agua, tanto para fines investigativos como para los beneficiados por determinado aprovechamiento.

A pesar que se tiene conocimiento sobre el entubamiento y aprovechamiento de diversos manantiales para abastecimiento de parte de la zona metropolitana de la Ciudad de México y localidades vecinas (según observaciones de diferentes salidas de campo), cuyo volumen extraído no es conocido ni reportado a ninguna entidad gubernamental, esta acción no es contemplada en la problemática de la subsidencia de la ciudad ni con aspectos ambientales, ya que dicho volumen probablemente corresponde con recarga de agua al subsuelo (aguas abajo), por lo que disminuye la recarga adicional potencial, afectando la dinámica y cantidad de agua subterránea.

Así, los estudios de subsidencia no sólo deben estar enfocados en la extracción de agua subterránea a través de pozos, sino incorporar la mayor cantidad posible de variables; para esto, nuevamente se señala la relevancia sobre la realización de estudios previos que permitan establecer procesos y el funcionamiento de cualquier aspecto que se desee analizar para después aplicar una solución eficaz. Asimismo, los requerimientos de agua de la fauna, flora y ecosistemas (caudal ecológico) no son considerados, por lo que se desconoce cómo se ha roto el equilibrio y mecanismo del sistema natural, lo cual puede repercutir progresivamente con la dinámica del ambiente.



Por otra parte, las industrias e individuos que contribuyan a la degradación del ambiente deben ser fuertemente castigados, igualmente, no debe continuar la política de “desarrollo” donde se involucre un mayor consumo de agua y menor costo, al contrario, se sabe que por ejemplo la agricultura es gran consumidor de agua, aunado tal vez al bajo precio o nulo del agua, posiblemente si su costo fuera más elevado se tendría una mayor conciencia de cuidado y ahorro. Pero esto debe ser incorporado a los principales usuarios del líquido, más no a la población que consume menos cantidades que empresas que gracias a la legislación mexicana incrementan cada vez más su ganancia. En efecto, el problema no es sólo del costo del agua, esto incluye componentes sociales, económicos y políticos, donde el agua por lo general es el último factor de interés en la actuación y el primero en discusión.

La realización de campañas educativas a la población en general es recomendable, incluyendo aquella rural y urbana, para promover y difundir la relevancia de las áreas de recarga y descarga de agua subterránea, así como la importancia de visualizar la naturaleza como un sistema, del cual el ser humano hace parte y más que modificar el entorno, él debe en lo posible ajustarse a sus condiciones para así no afectar todos los demás elementos formadores del sistema y alcanzar el equilibrio y armonía con la vocación de la naturaleza.

En cuanto a los intereses económicos que se han generado con el agua, discutido en el capítulo cinco, es importante difundir la información concerniente al agua embotellada, la cual es sumamente costosa y su venta se ha incrementado por trucos publicitarios que sugieren que su consumo induce a cuerpos delgados y sanos, lo cual es falso debido a que cada individuo y sus requerimientos físicos son diferentes; como se discute en dicho capítulo debería existir la posibilidad de seleccionar agua baja en sales o alta, pero esto no existe en el mercado actual.

Asimismo, es conveniente realizar una investigación que permita identificar las zonas de la ciudad, cuya agua del abastecimiento público no requiera de técnicas de potabilización, para así fomentar el consumo de agua del grifo, a un bajísimo precio comparado con el que se paga por botella, evitar el negocio del agua y por último, aportar con el cuidado ambiental mediante la disminución del volumen de basura y contaminación por plástico.

El conocimiento del funcionamiento del agua subterránea y procesos relacionados con los componentes ambientales, junto con la concienciación de la población sobre la importancia del cuidado de la naturaleza, la creación, cumplimiento y rigor de las leyes, que lleve a mayor equidad y finalización de la corrupción, permitirá vivir de manera adecuada en el planeta, aprovechando los elementos naturales sin afectar el equilibrio ecológico, clave para la supervivencia humana.

## **LIMITACIONES**

Un objetivo específico inicial del presente estudio era realizar e interpretar pruebas de bombeo que permitieran obtener las propiedades hidráulicas de las diferentes formaciones geológicas, tales como porosidad, conductividad hidráulica, entre otras, las cuales servirían de herramienta para establecer con

mayor exactitud la trayectoria del flujo de agua subterránea, así como de alguna manera cuantificar un volumen de agua más acorde con las propiedades de la litología existente en el subsuelo. Sin embargo, no fue posible la elaboración de dichas pruebas por las condiciones en que se encuentran los pozos en el territorio de estudio, como se comenta en el apartado de fase de trabajo de campo (1.4.2) del capítulo 1, los cuales no cuentan con dispositivos de medición de flujo ni orificio que permita la introducción de alguna sonda eléctrica, por lo que nuevamente se recalca sobre la urgencia de hacer cumplir la Ley de Aguas Nacionales para la elaboración de futuras investigaciones.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Aceves F, 1996. Geología y geomorfología del Volcán Nevado de Toluca. Tesis, Maestría en Ciencias (Geología). Instituto de Geofísica, UNAM.
- Ángeles-Serrano G, 2001. El funcionamiento de los sistemas de flujo y su manejo a través de pozos para controlar la calidad del agua subterránea obtenida: Iztapalapa, Ciudad de México. Tesis, Maestría en Ingeniería (Ambiental). Facultad de Ingeniería, UNAM
- Ángeles-Serrano G, en proceso. Elementos para analizar la transformación ambiental de áreas de recarga y zonas de descarga de la Ciudad de México. Hacia una “construcción social” de los espacios del agua subterránea. Tesis, Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM
- Aréchiga Córdoba E, 2004. El desagüe del Valle de México, siglos XVI-XXI. Una historia paradójica. *Arqueología Mexicana* Vol. XII Num. 68 Lagos del Valle de México, 60-65. Julio-Agosto 2004. México.
- Arnold J R, Libby WF, 1951. Radiocarbon Dates. *Science*, 113(2927) 111-120.
- Bloomfield K, 1975. A Late-Quaternary Monogenetic Volcano Field in Central Mexico. *Geol. Rundschau*, Vol 64, 476-497.
- Braña Varela J, 2005. El papel de la negociación en el desarrollo de mercados para el pago de servicios ambientales. Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental-Instituto de Nacional de Ecología INE.
- Burstein J, Chapela y Mendoza G, Aguilar J y León E, 2002. Informe sobre la Propuesta de Pago por Servicios Ambientales en México. Realizado en el marco del proyecto “Pago por Servicios Ambientales en Las Américas” auspiciada por la Fundación FORD y ejecutado por Fundación PRISMA.
- Cantagrel JM and Robin C, 1979. K-Ar dating on eastern MExican Volcanic rocks – relations between the andesitic and the alkaline provinces. *J. Volc. Geothermal Res.*, 5, 99 – 114.
- Carballal M y Flores M, 2004. Elementos hidráulicos en el Lago de México- Texcoco en el Posclásico. *Arqueología Mexicana* Vol. XII Num. 68 Lagos del Valle de México, 28-33. Julio-Agosto 2004. México.
- Cardoza Vázquez R, 2005. La conservación y restauración de suelos forestales y la generación de servicios ambientales en las cuencas de montaña de México – experiencias de la Comisión Nacional Forestal.

- Carrillo-Rivera JJ, 1992. The hydrogeology of the San Luis Potosi area, Mexico. Thesis, Doctor of Philosophy (Hydrogeology). Department of Geological Sciences. University of London. United Kingdom.
- Carrillo-Rivera JJ, Cardona A, Hergt T, Huizar R y Kobr M, 1999. Marco geológico, hidrología subterránea, hidrogeoquímica, análisis geomorfológico y registros de temperatura en la subcuenca del río de las Avenidas. Final Report, Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales - CAASIM, Hidalgo, México, 268 p.
- Carrillo-Rivera JJ, Huizar R, Hergt T, Medellín P, Cardona A, Angeles G y Osorio M, 2002. Control de la concentración de fluoruro en el agua extraída en pozos de las ciudades de San Luis Potosí SLP y Aguascalientes AGS. Informe Final. Conacyt-Sistema de Investigación "Miguel Hidalgo" SIHGO. Instituto de Geografía UNAM. México.
- Carrillo-Rivera JJ, Perevochtchikova M, Táutiva M, Godoy A, Peñuela L, Hergt T, 2004. Definición de indicadores de impacto al recurso hídrico en zonas receptoras de pago por servicios ambientales hidrológicos 2003-2004. Convenio Instituto Nacional de Ecología-Instituto de Geografía UNAM. Informe final, 91 p.
- Carrillo-Rivera JJ, Varsányi I, Kóvács L and Cardona A, 2007. Tracing groundwater flow systems with hydrogeochemistry in contrasting geological environments. *Water, Air & Soil Pollution* 184, 1-4, pp 77-103.
- Centro Internacional de Política Económica para el Desarrollo Sostenible de la Universidad Nacional (CINPE-UNA), 2002. Definición de parámetros hídricos para la valoración del servicio ambiental de protección del recurso hídrico brindado por los bosques y plantaciones forestales de Costa Rica. (Centro Internacional de Política Económica para el Desarrollo Sostenible de la Universidad Nacional), Informe interno para el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), Costa Rica.
- Centro Internacional de Investigación Forestal (CIFOR), 2005. Pagos por servicios ambientales: Principios básicos esenciales. Occasional Paper No. 42(s)
- Clark I and Fritz P, 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis publishers. Boca Raton, Florida. 328 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 1998. Regiones hidrológicas de México. Escala: 1:1'000,000. México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), (1998). Regiones Hidrológicas Administrativas. Escala 1:1'000,000. México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2004. Estadísticas del Agua en México. Editado por la SEMARNAT y CNA, México.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2005. Proyecto Lago de Texcoco. Rescate hidroecológico. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. Gerencia Lago de Texcoco. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 1998. Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1'000,000. México.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2005. Interfase rural urbana en la cuenca alta del Lerma. Hacia una metodología unificada del análisis ambiental y ciencias sociales. Convocatoria 2002-01. Convenio Instituto de Geografía-UNAM, CONACYT, SEMARNAT. México
- Constanza R y Jørgensen SE, 2002. Understanding and solving environmental problems in the 21st century: Toward a new, integrated hard problem science. Elsevier Science Ltd.
- Cortés A, Arizabalo RD y Rocha R, 1989. Estudio hidrogeoquímico isotópico de manantiales en la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2) 265-282.
- Cortes A and Farvolden RN, 1989. Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de Las Cruces, Mexico. *J Hydrol* 107, pp 147–153.
- Cortés A y Durazo J, 2001. Tendencia del oxígeno-18 en la precipitación del centro de México. *Ingeniería Hidráulica en México XVI*, núm. 2, pp 93-102
- Damon EP, Shafigullah M, Clark FK, 1981. Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis. *Rev. Inst. Geol., UNAM*, 5(2) 223-238.
- De Cserna Z, De la Fuente-Duch M, Palacios-Nieto M, Triay L, Mitre-Salazar LM, Mota-Palomino R, 1988. Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones geotectónicas regionales de la Cuenca de México. *Bol. 104. Inst. Geol. UNAM, Méx.*
- Durazo J and Farvolden RN, 1989. The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations. *J. Hydrol. Vol. 112*, 171-190
- Durazo J, 2007. The modern isotopic precipitation of Central Mexico and its hydrological manifestations in its highlands lands, Valley of Toluca. *Sometida a Geofísica Internacional*, enero 2007.
- Edmunds WM, Carrillo-Rivera JJ, Cardona A, 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *J. Hydrol. Vol. 254*, 1-24
- Freeze RA and Cherry J, 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 604 pp.

- Fries C Jr, 1960. Geología del Estado de Morelos y de Partes Adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México, UNAM. Inst. Geol. Bol. 60, 236.
- Fries C Jr, 1962. Resumen de la Geología de la Hoja Pachuca, Estados de Hidalgo y México. Hoja Pachuca 14 Q-c (11). Esc. 1:100 000. Inst. Geol., UNAM, México, D.F.
- Fundación Planeta Vivo, 2006. El CO2 y el efecto invernadero: un mito para confundir al mundo. Publicación del boletín de noticias del día 02/06/2006. <http://www.agroinformacion.com/leer-noticia.aspx?not=30096>
- Galicia E, en proceso. Espacios soporte del sistema hidrológico en el municipio de Puebla y zona conurbada. Tesis Doctorado. Facultad de Filosofía y letras, UNAM. México.
- Giggenbach W, 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 52, pp 2749 – 2765.
- Gemici Ü, Gültekin T, Mümtaz Ç, Cahit H, 2004. Hydrogeochemical and hydrogeological investigations of thermal waters in the Emet area (Kütahya, Turkey). *Applied Geochemistry* 19, pp 105 – 117.
- Geyne RV, Fries Jr, Segerstrom K, Black FR y Wilson FI, 1963. Geología y Yacimientos Minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, E. de Hidalgo, Mex., CRNR, Méx.
- González-Espinosa H.Y, 1998. Estudio geomorfológico de la porción oriental de la Sierra Chichinautzin, Cuenca de México. Tesis, Licenciada en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. Noviembre 1998.
- González-Moran T, 1992. Estudio hidrogeofísico de la subcuenca de Chalco; evaluación de impacto ambiental del basurero de Santa Catarina. Tesis, Doctorado en Geofísica (Aguas subterráneas). Unidad de los Ciclos Profesional y de Posgrado, Colegio de Ciencias y Humanidades. UNAM, México, DF.
- González T, 2004. Diagnóstico ambiental de la Presa de Guadalupe, Estado de México. Tesis, licenciado en Biología. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gurria LJ, 1978. El desagüe del Valle de México durante la época novohispánica. Instituto de Investigaciones Históricas. Serie Historia No. 19. UNAM.
- Gutiérrez M. 2005. Acceso al Pago de Servicios Ambientales en Costa Rica. Archivo PDF en la página electrónica: <http://lead-es.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo11.htm>

- Haro Sánchez M, 1986. Causas y consecuencias del deterioro ecológico del bosque del Ajusco (Del. Tlalpan, DF). Tesis, licenciado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Hergt T, Carrillo-Rivera JJ, Morales-Manilla LM, Angeles-Serrano G, González-Abraham A, Rosales-Lagarde L, 2002. Asesoría sobre consideraciones geohidrológicas de la relación bosques-agua en la región Sierra Gorda. Informe final para el INE, SEMARNAT. IG, UNAM, México.
- Huizar-Alvarez R., Carrillo-Rivera JJ, Angeles-Serrano G, Hergt T, Cardona A, 2004. Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City. *Hydrogeol. J.* Vol. 12, pp 436-450
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1981, 1988. Mapas de aguas superficiales y de aguas subterráneas; escala 1:1'000,000, hoja México. México.
- INEGI, 1983. Carta hidrológica de aguas subterráneas; escala 1:250,000, Hoja E14-2. Ciudad de México, México
- INEGI, 1983. Carta geológica; escala 1:250,000, Hoja E14-2. Ciudad de México, México
- INEGI, 2001. Síntesis de información geográfica del Estado de México.
- INEGI, 2003. Cartas topográficas, escala 1:50,000, hojas San Martín Texmelucan E14B32 (México, Puebla y Tlaxcala), Milpa Alta E14A49 (D.F., Morelos y Estado de México), Ciudad de México E14A39 (D.F. y Estado de México). México.
- Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995). "Mapa edafológico". Escalas 1:250,000 y 1:1'000,000. México.
- Jujnovski Orlandini J, 2006. Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la Cuenca del Río Magdalena, Distrito Federal, México. Tesis, Maestría en Ciencias Biológicas (Biología ambiental). Facultad de Ciencias, UNAM.
- Jiménez F. Joaquín Campos J, Alpízar F y Navarro G. 2003. Experiencias de pago por servicios ambientales en cuencas de Costa Rica. CATIE. Archivo PDF en la página electrónica: <http://www.rlc.fao.org/foro/psa/pdf/jimenez.pdf>
- La Jornada, 2007. Artículo "Revisa el GDF tarifas para el cobro por el suministro de agua". Periódico del día domingo 13 de mayo de 2007.
- López Barajas R, 1994. Geoecología del paisaje e impacto ambiental en la Sierra Nevada. Tesis, Maestría en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM.

- Lorenzo JL y Mirambel L, 1986. Tlapacoya: 35,000 años de historia. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- Maldonado-Molina A, 1997. Diferenciación hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en la zona sur-centro del estado de Aguascalientes. Tesis, licenciado en Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Martín del Pozzo AL, 1982. Monogenetic Vulcanism in Sierra Chichinautzin, México. Bull. Volcanol. 45(1) 9-24.
- Mayrand K y Paquin M, 2004. Pago por servicios ambientales: Estudio y evaluación de esquemas vigentes. Informe presentado por Unisféra International Centre. Montreal, Canadá.
- Mendoza García JF, 1994. La degradación de los recursos naturales en la Delegación Magdalena Contreras, Distrito Federal. Tesis, licenciado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.
- Mooser F, Nairn M EA y Negendank F WJ, 1974. Paleomagnetic Investigations of the Tertiary and Quaternary Igneous Rocks: VIII A Paleomagnetic and Petrologic Study of Volcanics of the Valley of Mexico. Geol. Rundschau, Vol. 63, 451-483.
- Mooser F, 1978. Geología del Relleno Cuaternario de la Cuenca de México. El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México. Soc. Mex. De Mec. De Suelos, pp. 9-13.
- Mooser F, Montiel A y Zuñiga A, 1996. Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos (1937-1996). Comisión Federal de Electricidad. México. 27 pp.
- Ortega Guerrero B, 1984. Geomorfología de la vertiente oriental de la Sierra Nevada (Cuenca Puebla-Tlaxcala). Tesis, licenciado en Ingeniería Geológica. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- Ortega AG and Farvolden RN, 1989. Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico. Journal of Hydrology 110, 271-294.
- Pantoja J, 1993. Brief review of the geology of the Trans-mexican Volcanic Belt and the Basin of Mexico, Third International Conference on Rudists, México DF, Guidebook of field trip B, pp. 47-55.
- Peñuela-Arévalo LA, Carrillo-Rivera JJ, Perevochtchikova M, 2006. Procesos relacionados con el impacto al recurso hídrico en zonas receptoras de pago por servicio ambiental, Cuenca de México. VIII Congreso Latinoamericano de Hidrogeología y "Expo Agua 2006". Asunción, Paraguay, 25 septiembre.



- Pérez G, 1995. Evaluación preliminar de la contaminación ambiental de la ZMVM asociada con el crecimiento industrial. Tesis, licenciado en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México.
- Quintino Zepeda C, 1998. Proposición jurídico sociológica para controlar la invasión urbana en la Sierra del Ajusco. Tesis, licenciado en Derecho. Facultad de Derecho, UNAM. México.
- Robin C and Boudal C, 1987. A Gigantic Bezymianny-Type Event at the Beginning of Modern Volcano Popocatepetl. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 31, 115-130.
- Rojas Rabiela T, 2004. Las cuencas lacustres del altiplano central. *Arqueología Mexicana* Vol. XII Num. 68 Lagos del Valle de México, 20-27. Julio-Agosto 2004. México.
- Romero E, 1998. Geología del volcán Ajusco. Tesis, licenciado en Ingeniería geológica. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- Romero Teran E, 2001. Geología del Complejo Volcánico San Miguel, al sur poniente de la Cuenca de México. Tesis, Maestría en Ciencias (Vulcanología). Instituto de Geofísica, UNAM.
- Sandoval A, 2000. Análisis palinológico y consideraciones paleoambientales de un sondeo en el exlago de Texcoco, Cuenca de México. Tesis, Maestría en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Sánchez-González A y López-Mata L, 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica* 74(1): 47-71.
- Schlaepfer JC, 1968. Resumen de la Geología de la Hoja de México, Distrito Federal y Estados de México y Morelos. Hoja México 14 Q-h (5), Esc. 1:100 000. *Inst. Geol., UNAM, México, D. F.*
- Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL), 2005. Integración del Sistema Nacional de Información para el desarrollo territorial en la fase correspondiente a la Caracterización del Territorio: Diagnóstico funcional del territorio nacional. Convenio SEDESOL – Instituto de Geografía UNAM. Febrero – Abril 2005.
- Segerstrom K, 1961. Geología del SW del Edo. De Hidalgo y del NE del Edo. De México. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol*, Vol. XIII, 3-4.
- SEMARNAT-CONAFOR, 2004. La experiencia de México en el Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos y el Fondo Forestal Mexicano. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional Forestal. México.

- Sheridan FM y Wohletz HK, 1983. Hydrovolcanism: Basic Considerations and Review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 17, 1-29.
- Solana Cordova E, 1992. Relación suelo planta y microorganismos en áreas forestales de la Serranía del Ajusco. Tesis, licenciado en Química. Facultad de Química, UNAM. México.
- Steele KW, 1971. Paleomagnetic Directions from the Iztaccíhuatl Volcano. *Earth Planet Sci. Lett.*, Vol. 11, 211-218. North Holland Publishing Co.
- Tapia-Varela G, 1999. Geomorfología morfogénica de la vertiente tributaria oriental del ex-lago de Texcoco. Tesis, licenciado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Torres Carral G, 2006. El Pago de los Servicios Ambientales y las Comunidades Indígenas. Ra Ximhai Universidad Autónoma Indígena de México.
- Toscana A, 1998. Análisis geomorfológico detallado del volcán Ajusco y zonas adyacentes. Tesis, licenciado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Tóth J, 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *J. of Geophysical Res.* 67(11)4375-4387.
- Tóth, J, 1995. Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeol. J.*, 3(4) 4-16.
- Tóth, J, 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 111 (4), pp. 9-26.
- United Nations Environment Programme (UNEP), 2004. Relationship between the Montreal Protocol and the World Trade Organization. Sixteenth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Prague, 22-26 November 2004. Item 10 of the provisional agenda Other matters.
- Van Lanen HAJ and Carrillo-Rivera JJ, 1998. Framework for groundwater monitoring in (semi) arid regions. Chapter 2, UNESCO volume, Paris, in *Monitoring for groundwater management in (semi-) arid regions, Studies and Reports in Hydrology*, v. 57, pp. 7-20.
- Vázquez-Sánchez E y Jaimes-Palomera R, 1989. Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2)133-190.
- Vázquez Sánchez E, 1995. Modelo conceptual hidrológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la Cuenca de México. Tesis de maestría. Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F.

Vázquez-Selem L, 1985. Estudio Geomorfológico del Noroeste de la Cuenca de Puebla-Tlaxcala. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Lic. en Geografía.

Vázquez-Selem L, 2007. Geomorfología y estudios paleoambientales en el centro de México. Seminarios Científicos del Departamento de Geografía Física. Instituto de Geografía, UNAM. México.

Vela Correa G, 1996. Alternativas al uso del suelo en la zona lacustre de Tlahuac, México DF. Tesis, Maestría en Edafología. Facultad de Ciencias, UNAM. México.

Wilson BW, Hernandez JP y Meave TG, 1965. Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del Estado de Querétaro, México. Soc. Geol. Mex., Bol., 18(1)1-10.

Woodcock N H, 1994. Geology and Environment in Britain and Ireland. Taylor & Francis Ltd (UK).

World trade Organization (WTO), 2004. Report by the Chairperson of the special session of the committee on trade and environment to the trade negotiations committee. The eighth meeting of the Committee on Trade and Environment Special Session (CTESS) was held on 19 April 2004.

[http://72.14.253.104/custom?q=cache:unPTQ5agBIAJ:mirror.unep.org/ozone/Meeting\\_Documents/oewg/24oewg/24oewg-inf4.a.doc+environmental+goods&hl=es&ct=clnk&cd=2](http://72.14.253.104/custom?q=cache:unPTQ5agBIAJ:mirror.unep.org/ozone/Meeting_Documents/oewg/24oewg/24oewg-inf4.a.doc+environmental+goods&hl=es&ct=clnk&cd=2)

## ***Páginas de Internet***

Atmospheric composition change the European network for excellence (ACCENT online magazine).

[http://www.atmosphere.mpg.de/enid/No\\_ ss\\_Mayo\\_2\\_5\\_Vegetaci\\_n\\_/CO\\_2/C\\_Fotos\\_ ntesis\\_y\\_plantas\\_emisoras\\_5me.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/No_ ss_Mayo_2_5_Vegetaci_n_/CO_2/C_Fotos_ ntesis_y_plantas_emisoras_5me.html)

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

[http://iztapopo.conanp.gob.mx/fabrica\\_agua.php](http://iztapopo.conanp.gob.mx/fabrica_agua.php)

Comisión Nacional del Agua (CNA).

<http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

<http://www.conafor.gob.mx/portal/home.php>

Diccionario de economía y finanzas de la Universidad de Málaga

(<http://www.eumed.net/cursecon/dic/index.htm>)

Diccionario de la Lengua española. Real Academia Española. <http://www.rae.es/>

Enciclopedia libre Wikipedia. <http://es.wikipedia.org/wiki/Portada>

Glosario Hidrológico Internacional de la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization-UNESCO y la Organización de las Naciones Unidas-ONU. <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/aglo.htm>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

<http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx>

Inventario Nacional Forestal (IFN), 2000. <http://132.248.14.16/inventario.html>

Tribunal latinoamericano del Agua. <http://www.tragua.com/tla1.htm>

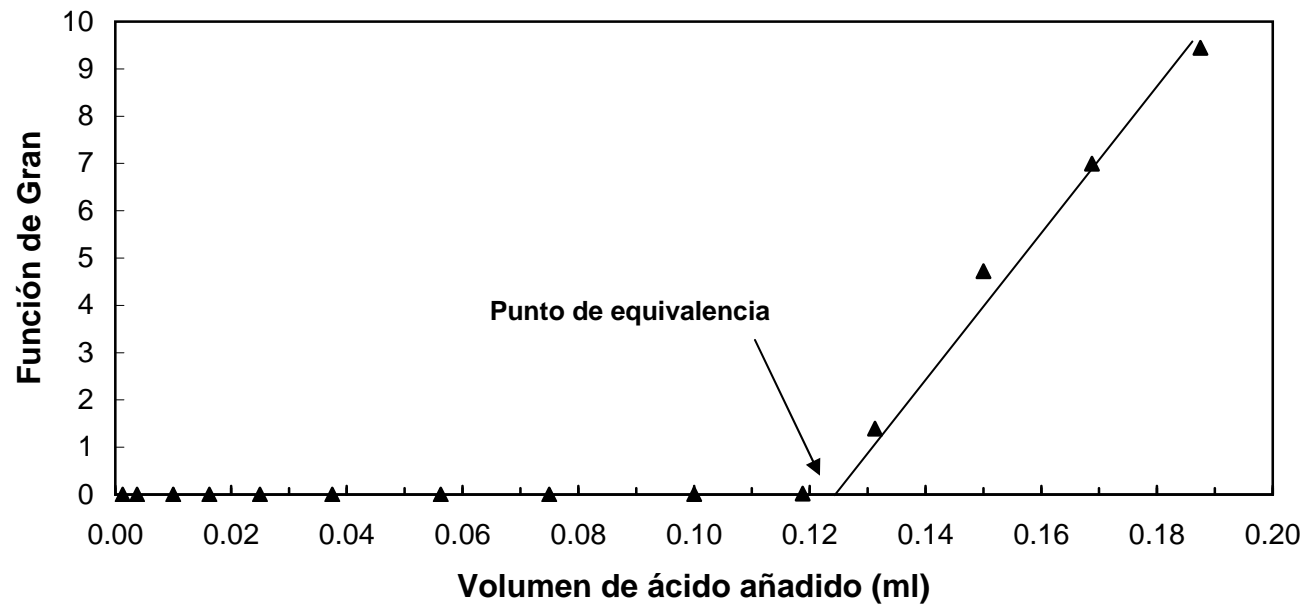
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.55	0.00125	0.00056
6.66	0.00375	0.00044
6.77	0.01000	0.00034
6.75	0.01625	0.00036
6.69	0.02500	0.00041
6.60	0.03750	0.00050
6.46	0.05625	0.00070
6.26	0.07500	0.00110
5.77	0.10000	0.00341
4.97	0.11875	0.02156
3.16	0.13125	1.39274
2.63	0.15000	4.72362
2.46	0.16875	6.99325
2.33	0.18750	9.44240

**MUESTRA 16 JUSTINA 2**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.123 ml
Alcalinidad Tot.=	492.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	600.24 mg/l

**Titulación de Gran**



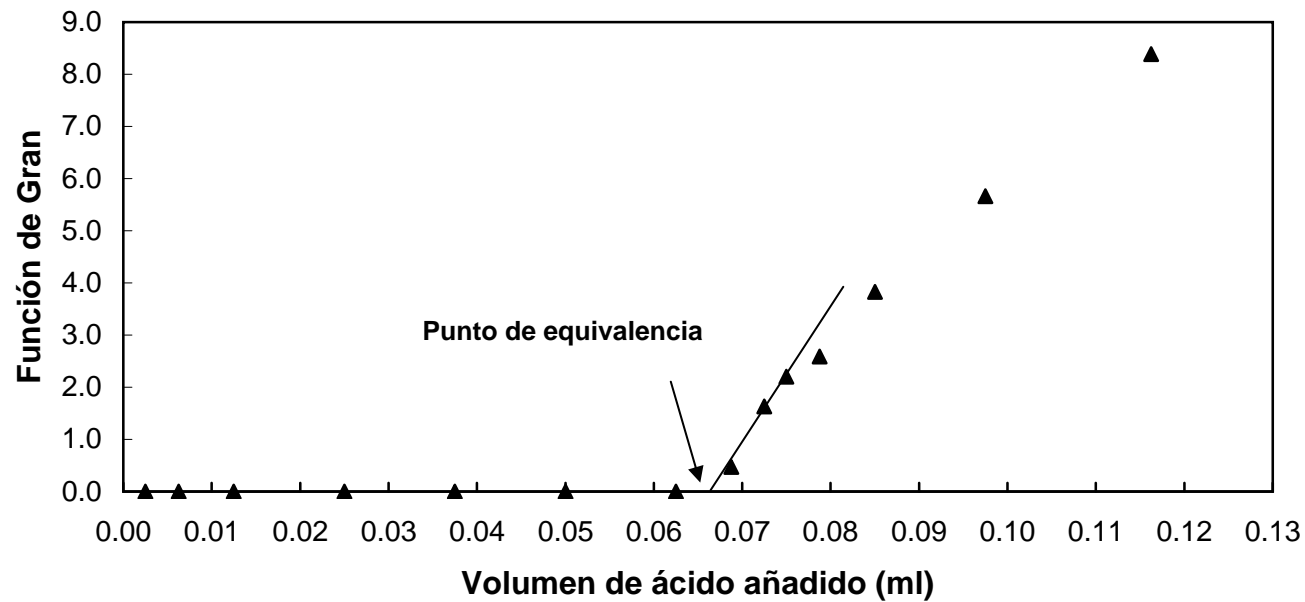
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
7.32	0.00250	0.00010
7.41	0.00625	0.00008
7.26	0.01250	0.00011
6.89	0.02500	0.00026
6.60	0.03750	0.00050
6.30	0.05000	0.00100
5.84	0.06250	0.00290
3.63	0.06875	0.47046
3.09	0.07250	1.63155
2.96	0.07500	2.20118
2.89	0.07875	2.58664
2.72	0.08500	3.82712
2.55	0.09750	5.66425
2.38	0.11625	8.38585

**MUESTRA NATIVITAS 3**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.066 ml
Alcalinidad Tot.=	264.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	322.08 mg/l

**Titulación de Gran**



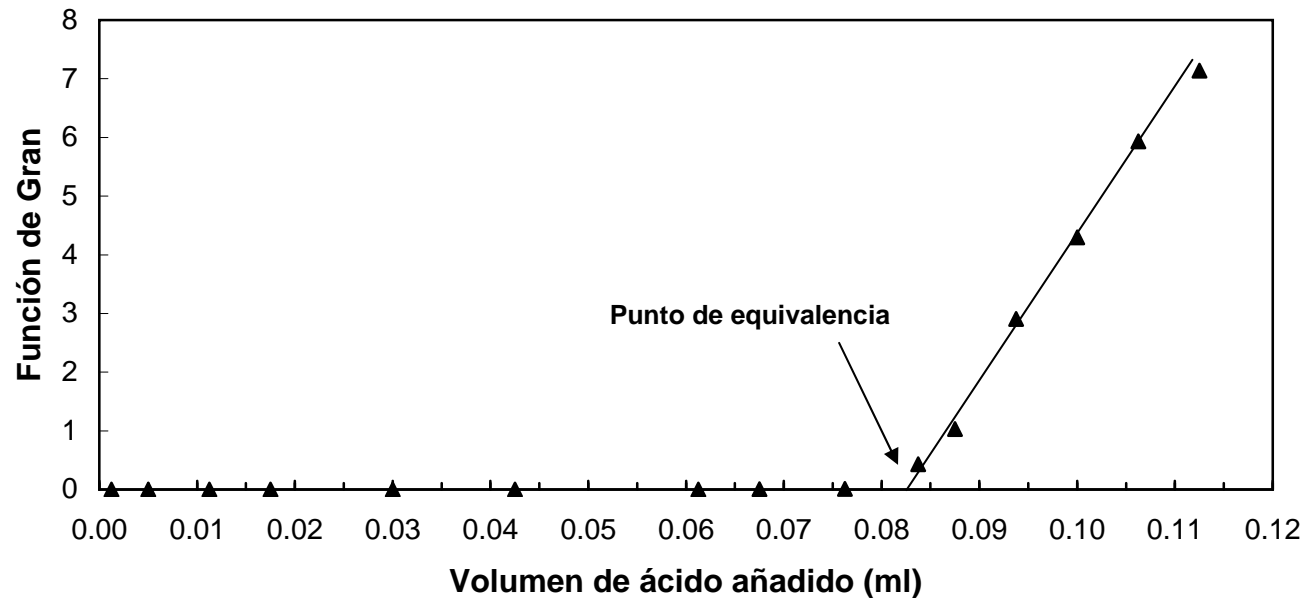
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.95	0.00125	0.00022
7.02	0.00500	0.00019
7.00	0.01125	0.00020
6.84	0.01750	0.00029
6.56	0.03000	0.00055
6.36	0.04250	0.00087
5.94	0.06125	0.00230
5.80	0.06750	0.00318
5.21	0.07625	0.01238
3.67	0.08375	0.42938
3.29	0.08750	1.03021
2.84	0.09375	2.90443
2.67	0.10000	4.29730
2.53	0.10625	5.93378
2.45	0.11250	7.13618

**MUESTRA 237 PANOTLA 2**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.0825 ml
Alcalinidad Tot.=	330.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	402.60 mg/l

**Titulación de Gran**



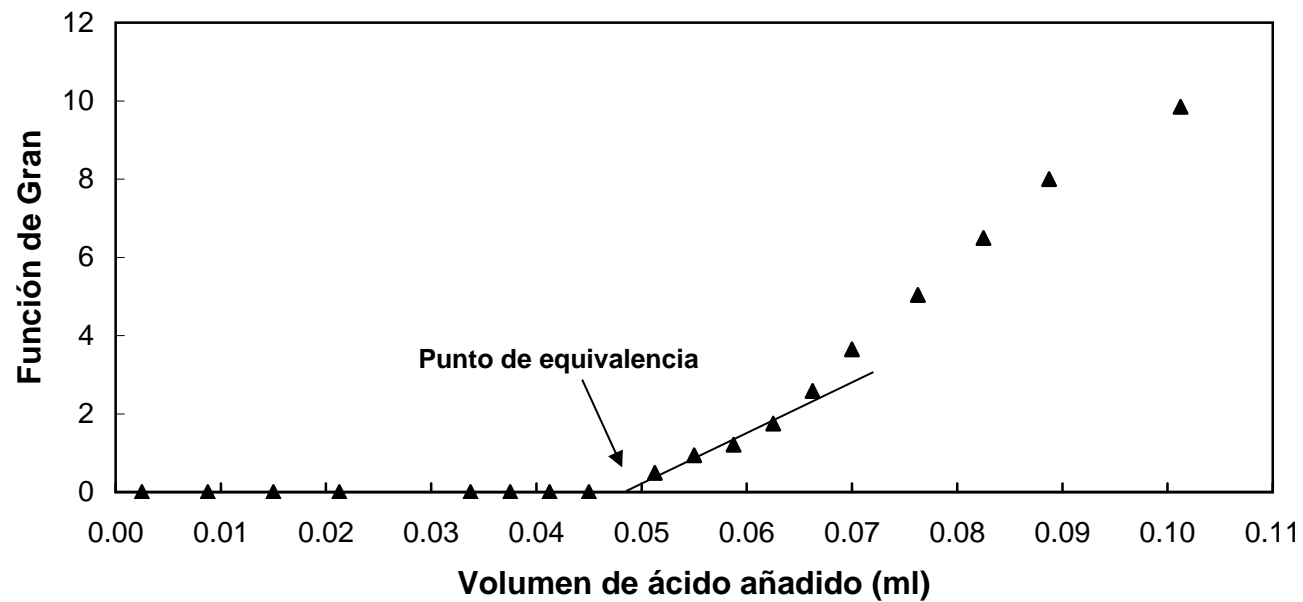
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
7.40	0.00250	0.00008
7.15	0.00875	0.00014
6.87	0.01500	0.00027
6.77	0.02125	0.00034
6.19	0.03375	0.00129
6.15	0.03750	0.00142
6.08	0.04125	0.00167
5.80	0.04500	0.00318
3.61	0.05125	0.49220
3.33	0.05500	0.93804
3.22	0.05875	1.20866
3.06	0.06250	1.74737
2.89	0.06625	2.58503
2.74	0.07000	3.65214
2.60	0.07625	5.04293
2.49	0.08250	6.49857
2.40	0.08875	7.99748
2.31	0.10125	9.84517

MUESTRA 208 TETLA

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.048 ml
Alcalinidad Tot.=	192.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	234.24 mg/l

**Titulación de Gran**





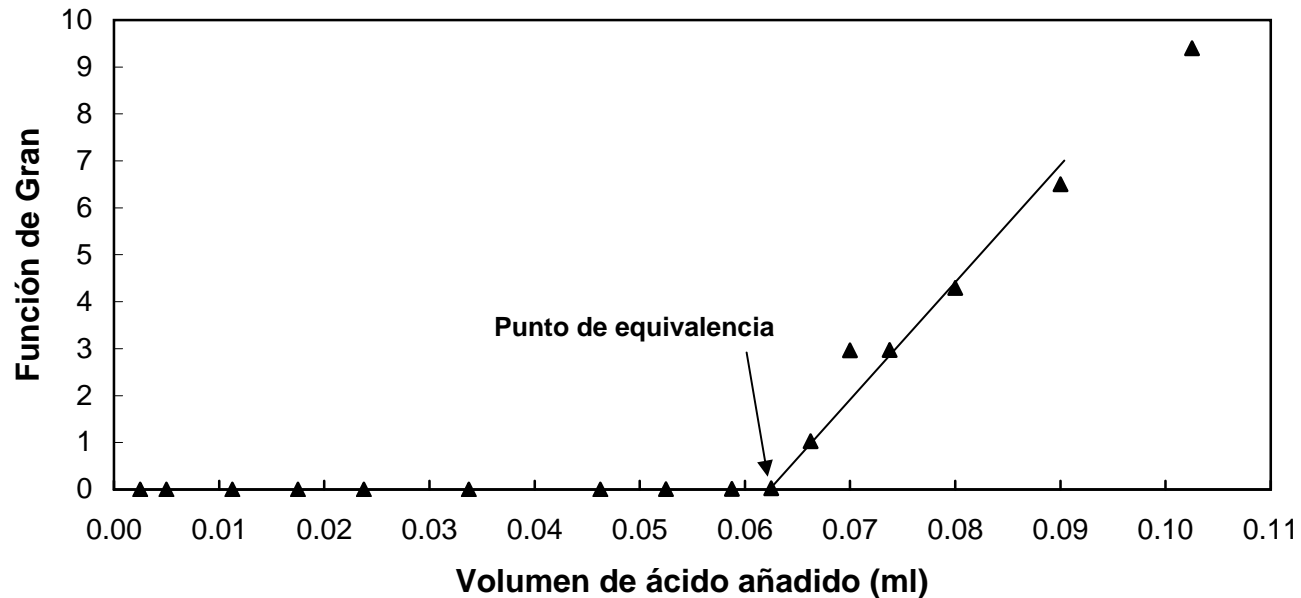
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
7.16	0.00250	0.00014
7.21	0.00500	0.00012
7.00	0.01125	0.00020
6.74	0.01750	0.00036
6.56	0.02375	0.00055
6.44	0.03375	0.00073
6.00	0.04625	0.00200
5.70	0.05250	0.00400
5.21	0.05875	0.01237
4.82	0.06250	0.03037
3.29	0.06625	1.02912
2.83	0.07000	2.96857
2.83	0.07375	2.96913
2.67	0.08000	4.29303
2.49	0.09000	6.50100
2.33	0.10250	9.40265

MUESTRA 221 TLALANCALEK

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.0625 ml
Alcalinidad Tot.=	250.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	305.00 mg/l

**Titulación de Gran**



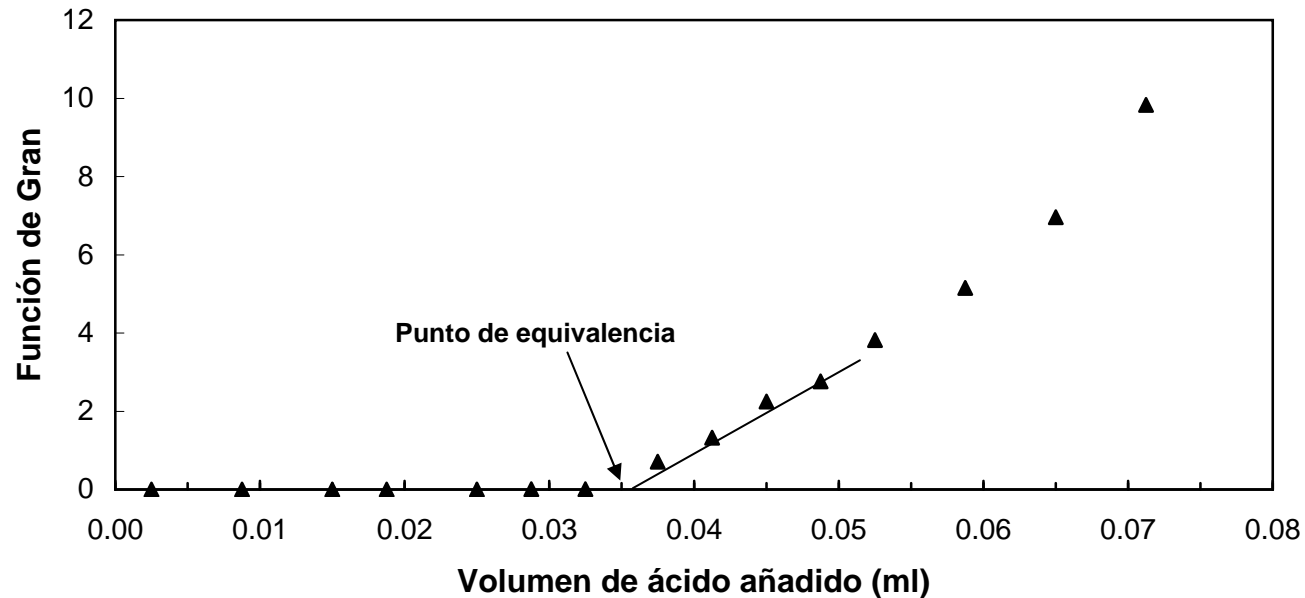
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
7.70	0.00250	0.00004
7.25	0.00875	0.00011
6.37	0.01500	0.00085
6.32	0.01875	0.00096
5.92	0.02500	0.00241
5.28	0.02875	0.01051
5.28	0.03250	0.01051
3.45	0.03750	0.71096
3.18	0.04125	1.32411
2.95	0.04500	2.24909
2.86	0.04875	2.76750
2.72	0.05250	3.82093
2.59	0.05875	5.15589
2.46	0.06500	6.95727
2.31	0.07125	9.83047

**MUESTRA DAM TEX 3**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.0355 ml
Alcalinidad Tot.=	142.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	173.24 mg/l

**Titulación de Gran**



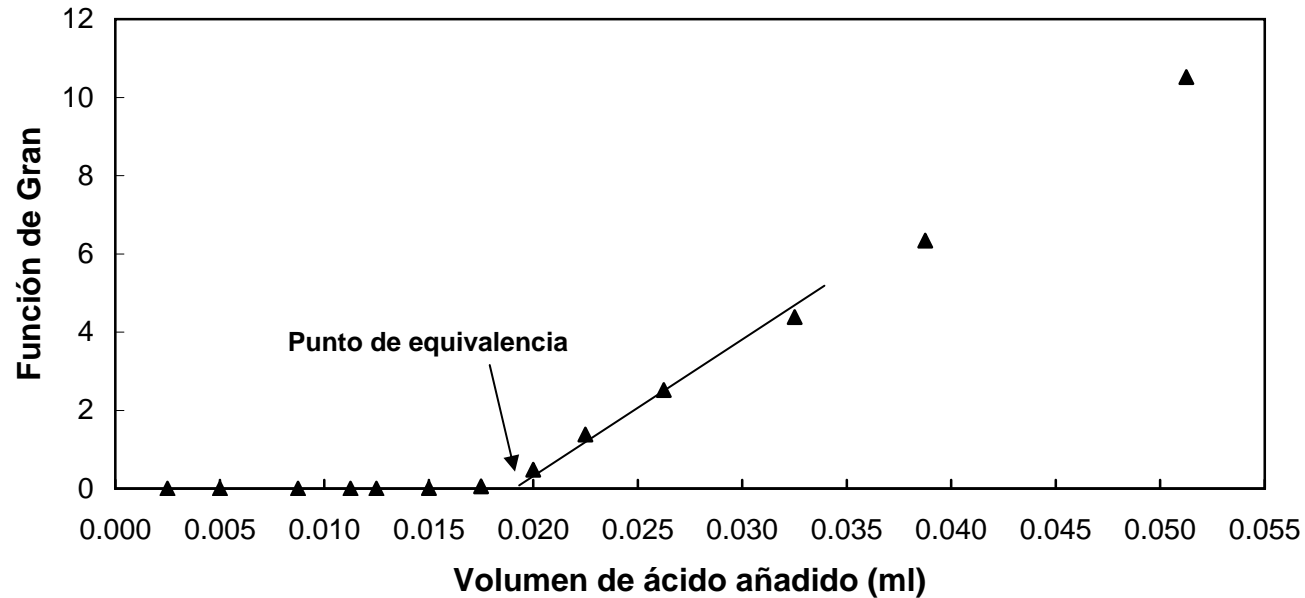
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.82	0.00250	0.00030
6.65	0.00500	0.00045
6.27	0.00875	0.00107
5.97	0.01125	0.00214
5.95	0.01250	0.00225
5.61	0.01500	0.00491
4.57	0.01750	0.05388
3.62	0.02000	0.48025
3.16	0.02250	1.38522
2.90	0.02625	2.52116
2.66	0.03250	4.38263
2.50	0.03875	6.33681
2.28	0.05125	10.52305

**MUESTRA 230 M TLAL 2**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.019 ml
Alcalinidad Tot.=	76.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	92.72 mg/l

**Titulación de Gran**



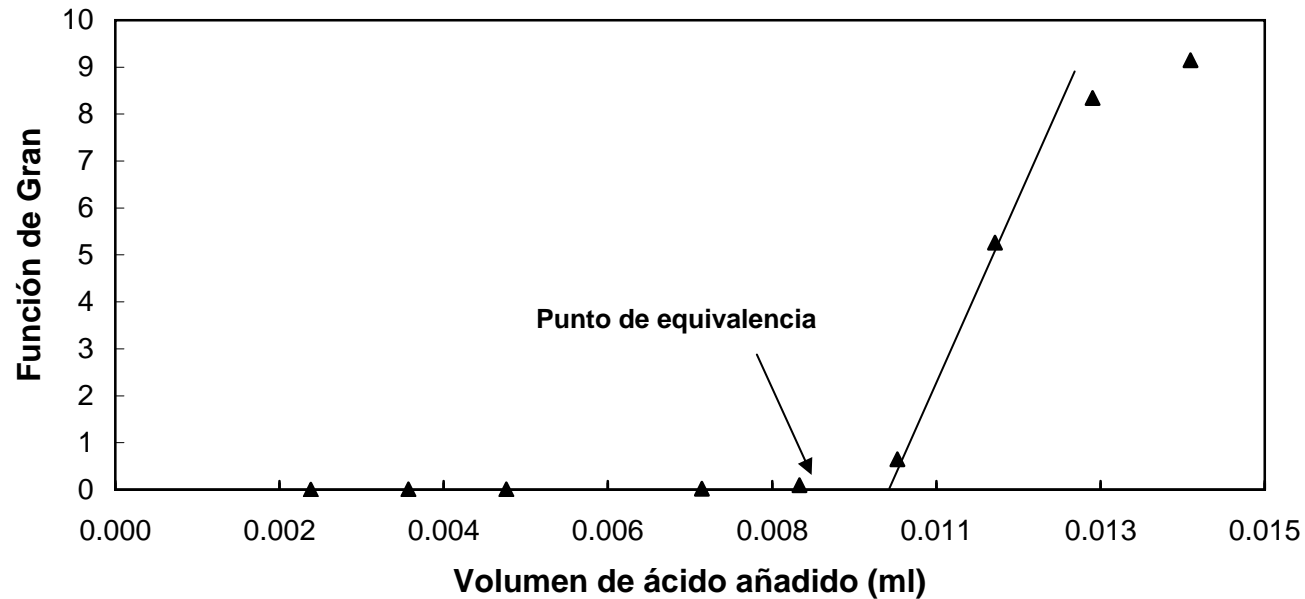
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.10	0.00250	0.00159
5.59	0.00375	0.00514
5.73	0.00500	0.00373
5.02	0.00750	0.01911
4.32	0.00875	0.09577
3.49	0.01000	0.64751
2.58	0.01125	5.26350
2.38	0.01250	8.34260
2.34	0.01375	9.14805

MUESTRA 265 SALVADOR V3

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.00975 ml
Alcalinidad Tot.=	39.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	47.58 mg/l

**Titulación de Gran**



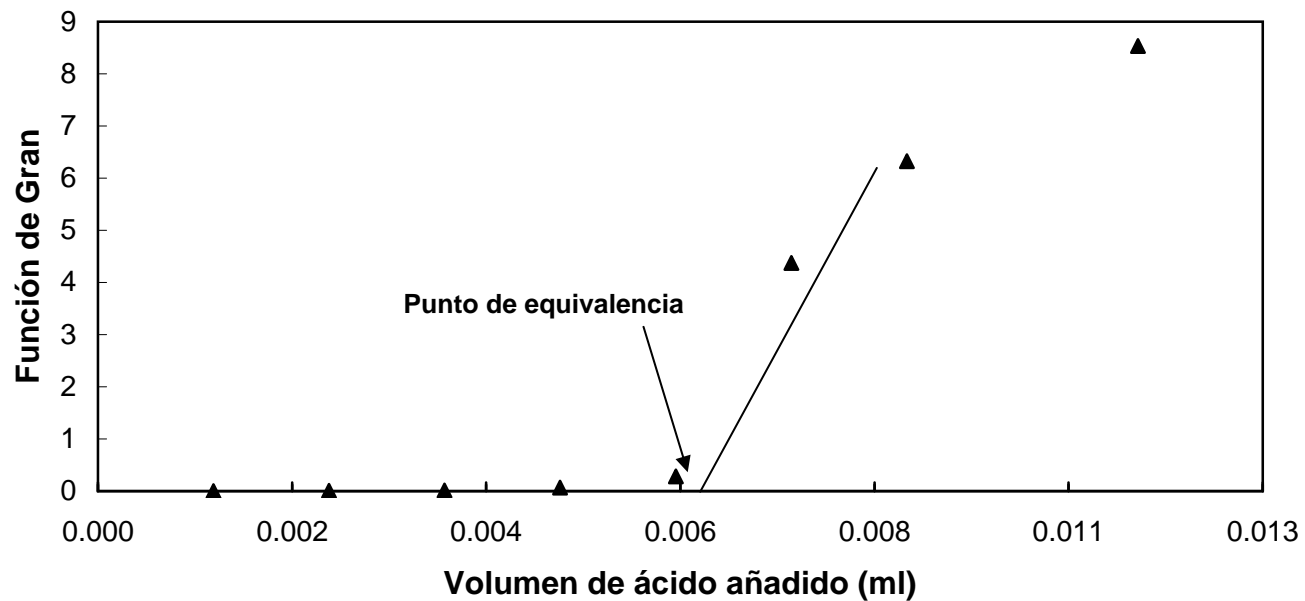
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
5.99	0.00125	0.00205
5.71	0.00250	0.00390
5.32	0.00375	0.00957
4.49	0.00500	0.06473
3.85	0.00625	0.28260
2.66	0.00750	4.37716
2.50	0.00875	6.32732
2.37	0.01125	8.53639

**MUESTRA 214 EL SALTO**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.00625 ml
Alcalinidad Tot.=	25.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	30.50 mg/l

**Titulación de Gran**



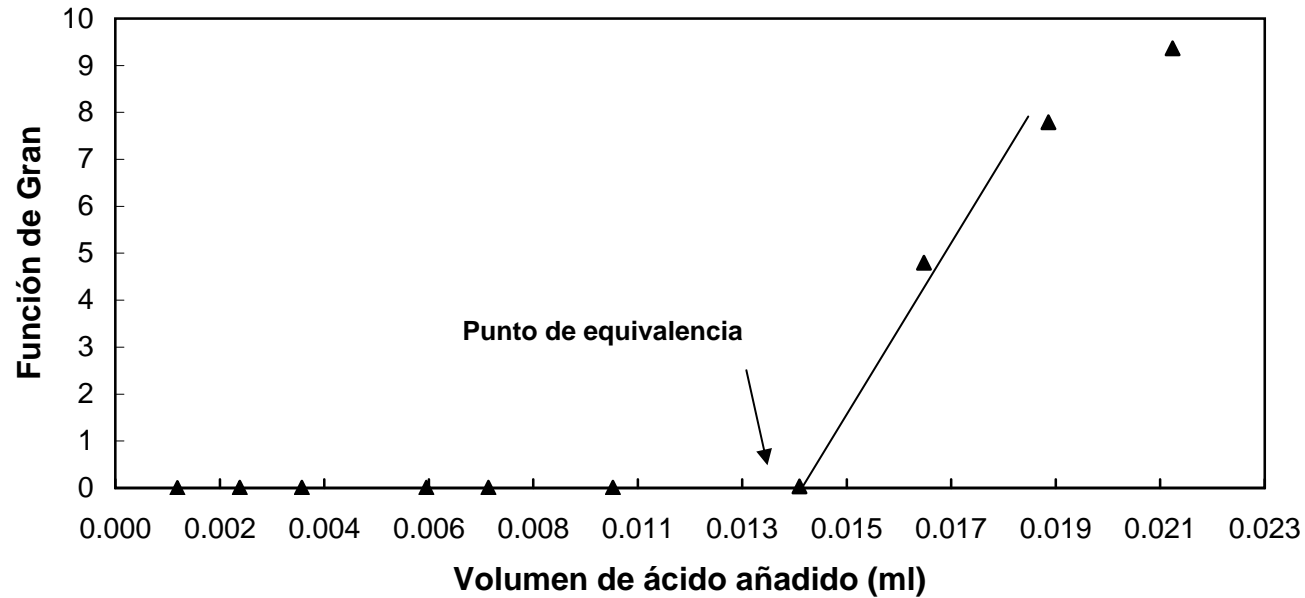
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
5.78	0.00125	0.00332
5.64	0.00250	0.00458
5.63	0.00375	0.00469
5.54	0.00625	0.00577
5.52	0.00750	0.00604
5.58	0.01000	0.00526
4.77	0.01375	0.03399
2.62	0.01625	4.80156
2.41	0.01875	7.78820
2.33	0.02125	9.36464

**MUESTRA 22 CUAHUTEMOC**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.01375 ml
Alcalinidad Tot.=	55.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	67.10 mg/l

**Titulación de Gran**



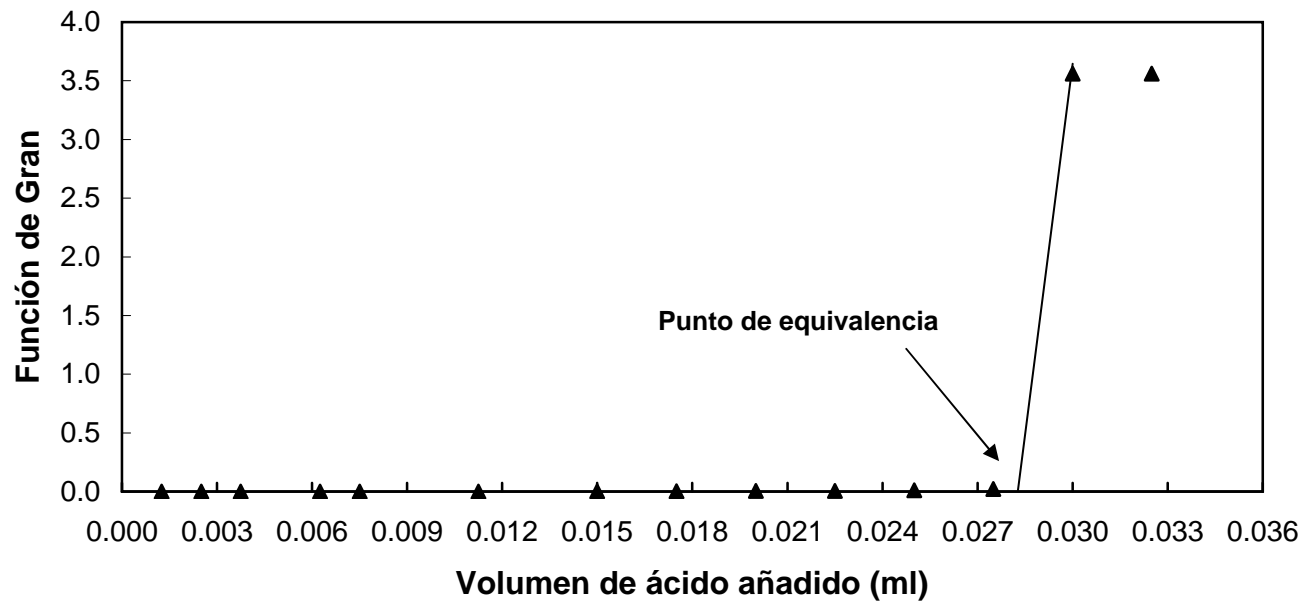
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.51	0.00125	0.00062
6.64	0.00250	0.00046
6.83	0.00375	0.00030
6.40	0.00625	0.00080
6.64	0.00750	0.00046
6.48	0.01125	0.00066
6.02	0.01500	0.00191
5.81	0.01750	0.00310
5.56	0.02000	0.00551
5.52	0.02250	0.00605
5.23	0.02500	0.01179
4.95	0.02750	0.02247
2.75	0.03000	3.56189
2.75	0.03250	3.56234

**MUESTRA 18 GUADALUPE 2**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.028 ml
Alcalinidad Tot.=	112.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	136.64 mg/l

**Titulación de Gran**



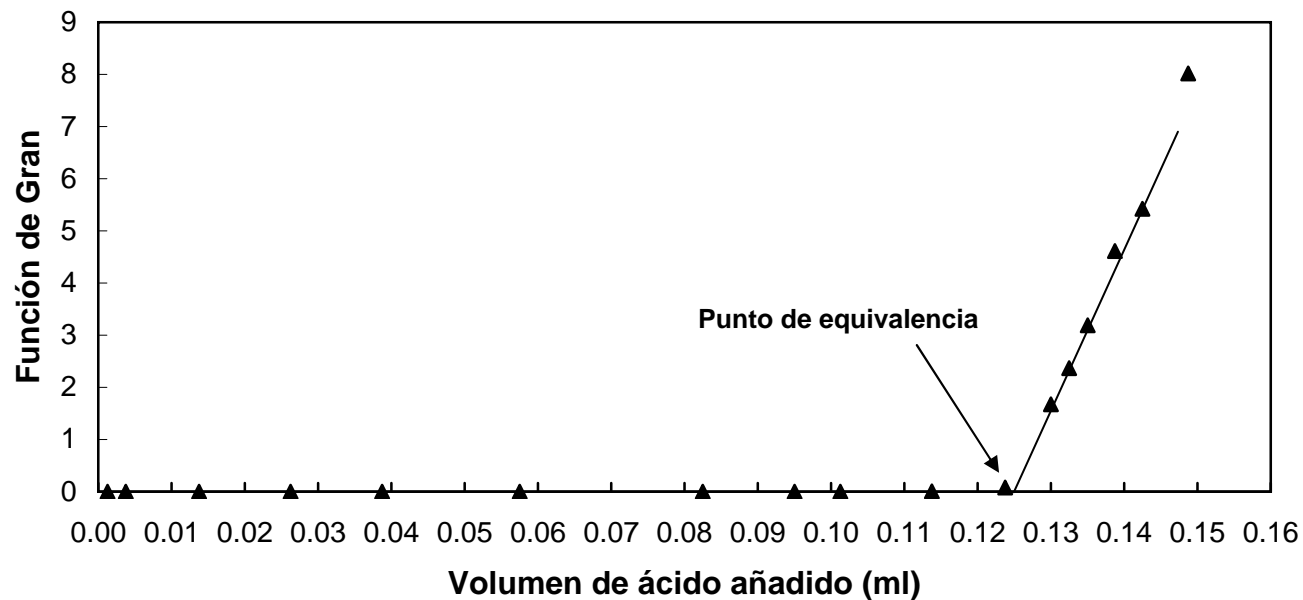
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.78	0.00125	0.00033
7.04	0.00375	0.00018
7.03	0.01375	0.00019
6.80	0.02625	0.00032
6.81	0.03875	0.00031
6.50	0.05750	0.00063
6.12	0.08250	0.00152
5.94	0.09500	0.00231
5.99	0.10125	0.00206
5.48	0.11375	0.00666
4.41	0.12375	0.07829
3.08	0.13000	1.67434
2.93	0.13250	2.36536
2.80	0.13500	3.19118
2.64	0.13875	4.61352
2.57	0.14250	5.42142
2.40	0.14875	8.02136

**MUESTRA ATOTONILKO 3**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.125 ml
Alcalinidad Tot.=	500.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	610.00 mg/l

**Titulación de Gran**





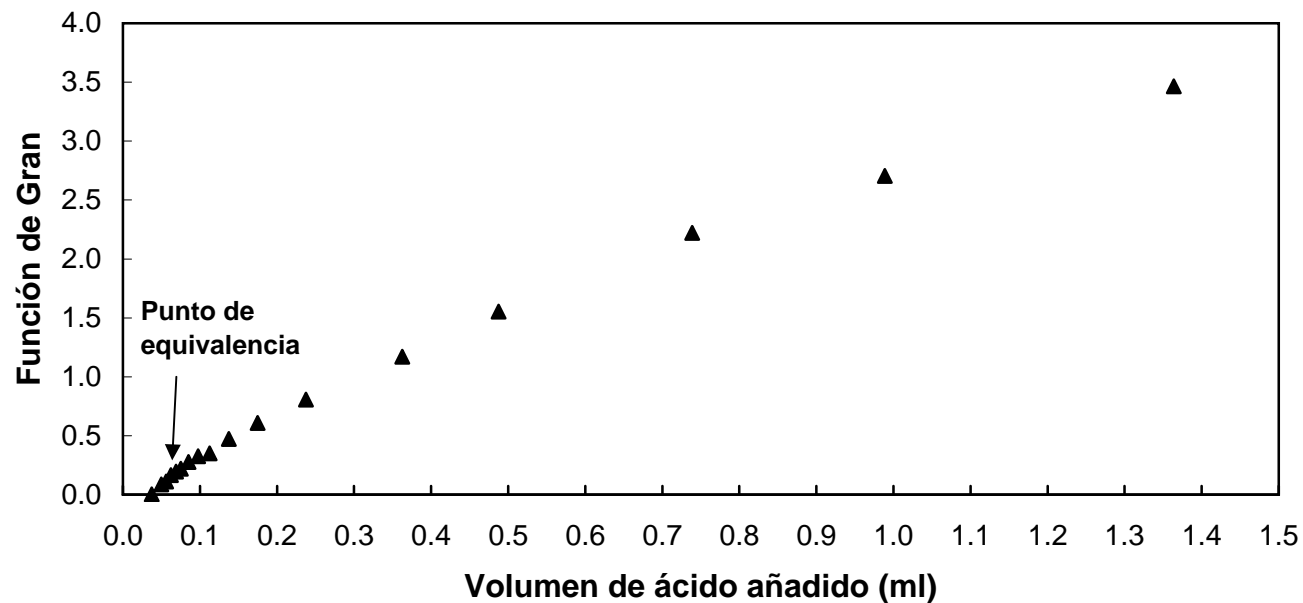
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
5.83	0.03750	0.00296
4.36	0.05000	0.08752
4.26	0.05625	0.11022
4.08	0.06250	0.16687
4.01	0.06875	0.19612
3.96	0.07500	0.22012
3.86	0.08500	0.27725
3.79	0.09750	0.32594
3.76	0.11250	0.34952
3.63	0.13750	0.47207
3.52	0.17500	0.60928
3.40	0.23750	0.80567
3.24	0.36250	1.17174
3.12	0.48750	1.55414
2.97	0.73875	2.22220
2.89	0.98875	2.70387
2.79	1.36375	3.46479

**MUESTRA MONTEALEGRE 01**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	0.16
P. Equivalencia=	0.05 ml
Alcalinidad Tot.=	20.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	24.40 mg/l

**Titulación de Gran**



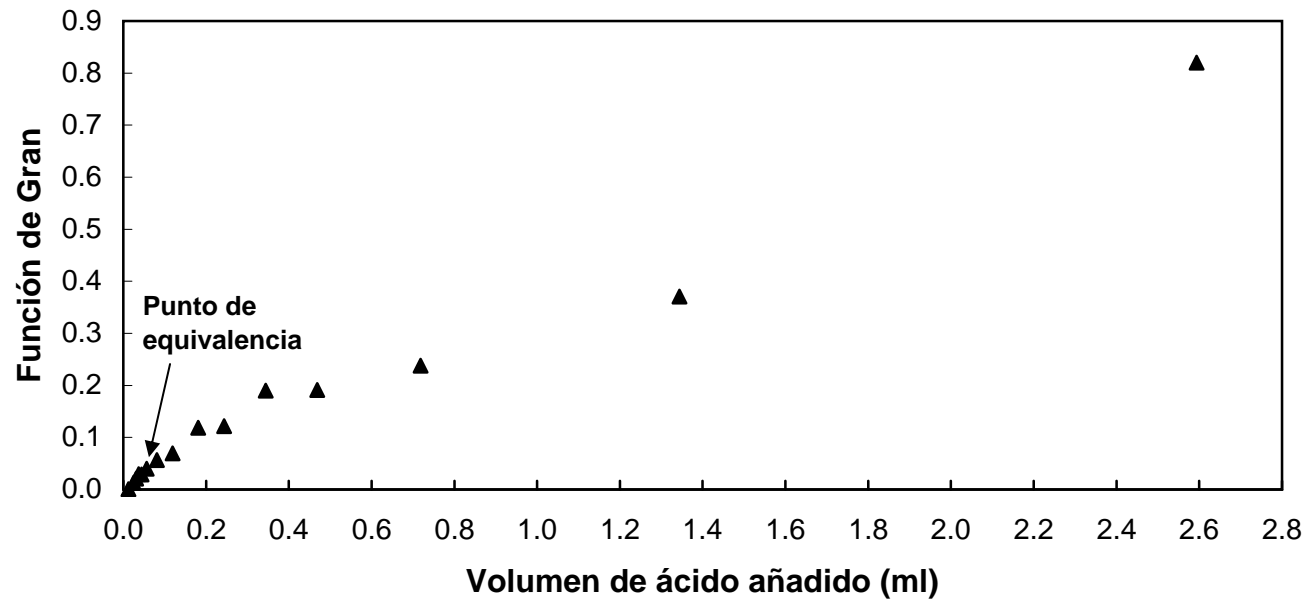
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.64	0.01250	0.00046
5.19	0.02500	0.01293
4.98	0.03125	0.02098
4.83	0.03750	0.02964
4.84	0.04375	0.02897
4.70	0.05625	0.04002
4.55	0.08125	0.05660
4.46	0.11875	0.06976
4.23	0.18125	0.11884
4.22	0.24375	0.12198
4.03	0.34375	0.18986
4.03	0.46875	0.19103
3.94	0.71875	0.23788
3.76	1.34375	0.37091
3.44	2.59375	0.82033

**MUESTRA MONTEALEGRE 02**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	0.16
P. Equivalencia=	0.02 ml
Alcalinidad Tot.=	8.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	9.76 mg/l

**Titulación de Gran**



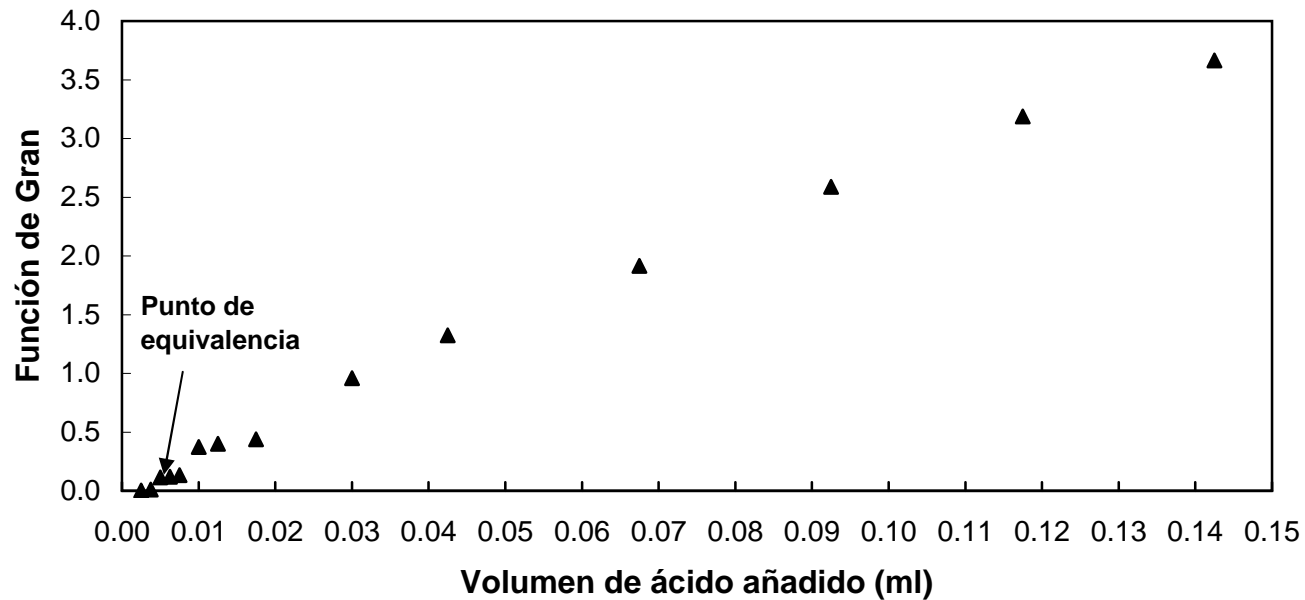
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
5.74	0.00250	0.00364
5.26	0.00375	0.01099
4.24	0.00500	0.11512
4.22	0.00625	0.12055
4.18	0.00750	0.13219
3.73	0.01000	0.37260
3.70	0.01250	0.39930
3.66	0.01750	0.43794
3.32	0.03000	0.95870
3.18	0.04250	1.32419
3.02	0.06750	1.91643
2.89	0.09250	2.58842
2.80	0.11750	3.18841
2.74	0.14250	3.66533

MUESTRA MONTEALEGRE 03

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.004 ml
Alcalinidad Tot.=	16.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	19.52 mg/l

**Titulación de Gran**



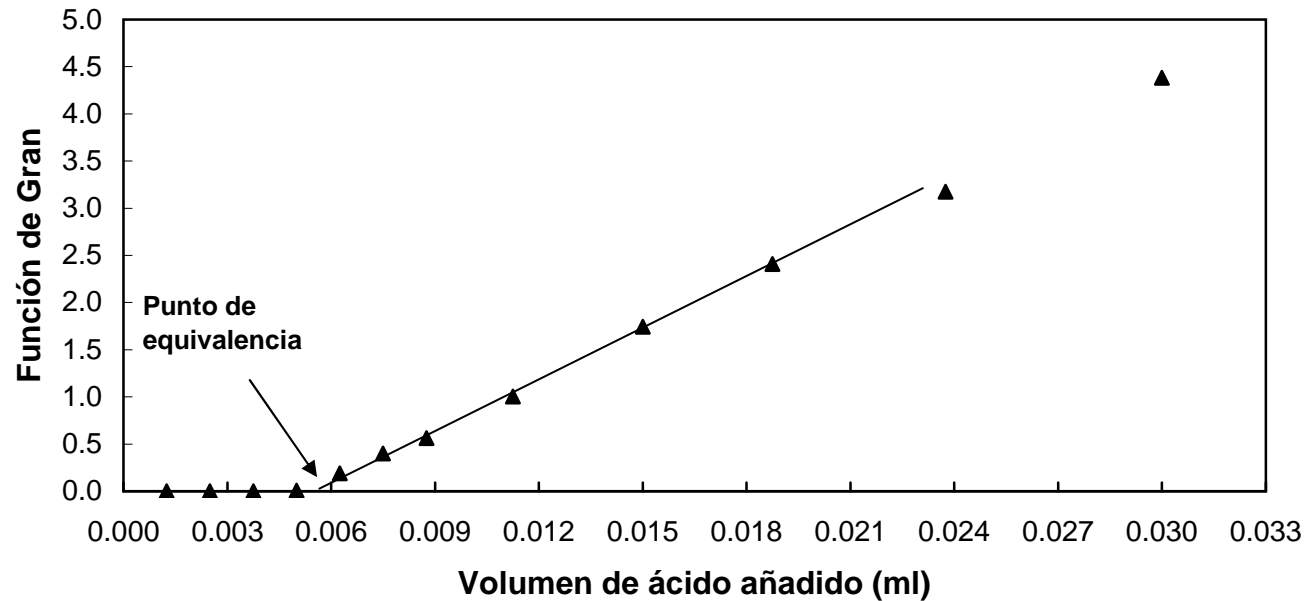
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.67	0.00125	0.00043
6.51	0.00250	0.00062
6.14	0.00375	0.00145
5.44	0.00500	0.00726
4.02	0.00625	0.19106
3.70	0.00750	0.39920
3.55	0.00875	0.56392
3.30	0.01125	1.00294
3.06	0.01500	1.74323
2.92	0.01875	2.40678
2.80	0.02375	3.17355
2.66	0.03000	4.38209

MUESTRA MA 1'

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.0057 ml
Alcalinidad Tot.=	22.80 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	27.82 mg/l

**Titulación de Gran**



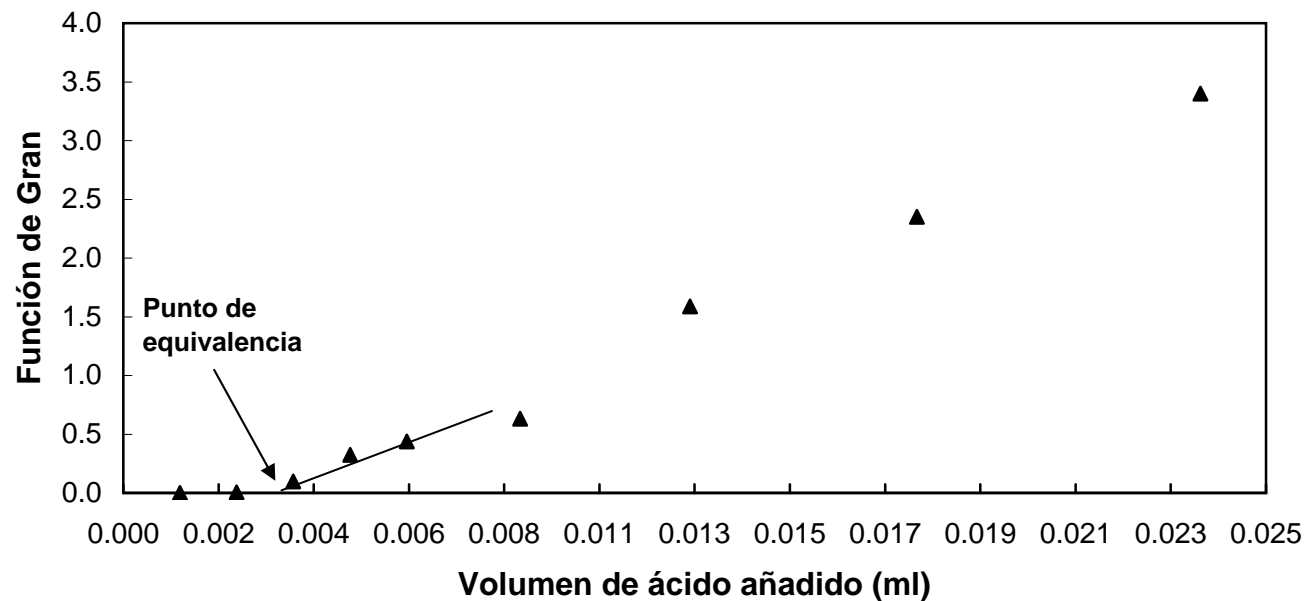
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.32	0.00125	0.00096
5.66	0.00250	0.00438
4.31	0.00375	0.09797
3.79	0.00500	0.32444
3.66	0.00625	0.43769
3.50	0.00875	0.63273
3.10	0.01250	1.58965
2.93	0.01750	2.35185
2.77	0.02375	3.40052

**MUESTRA MA 2'**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.0036 ml
Alcalinidad Tot.=	14.40 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	17.57 mg/l

**Titulación de Gran**



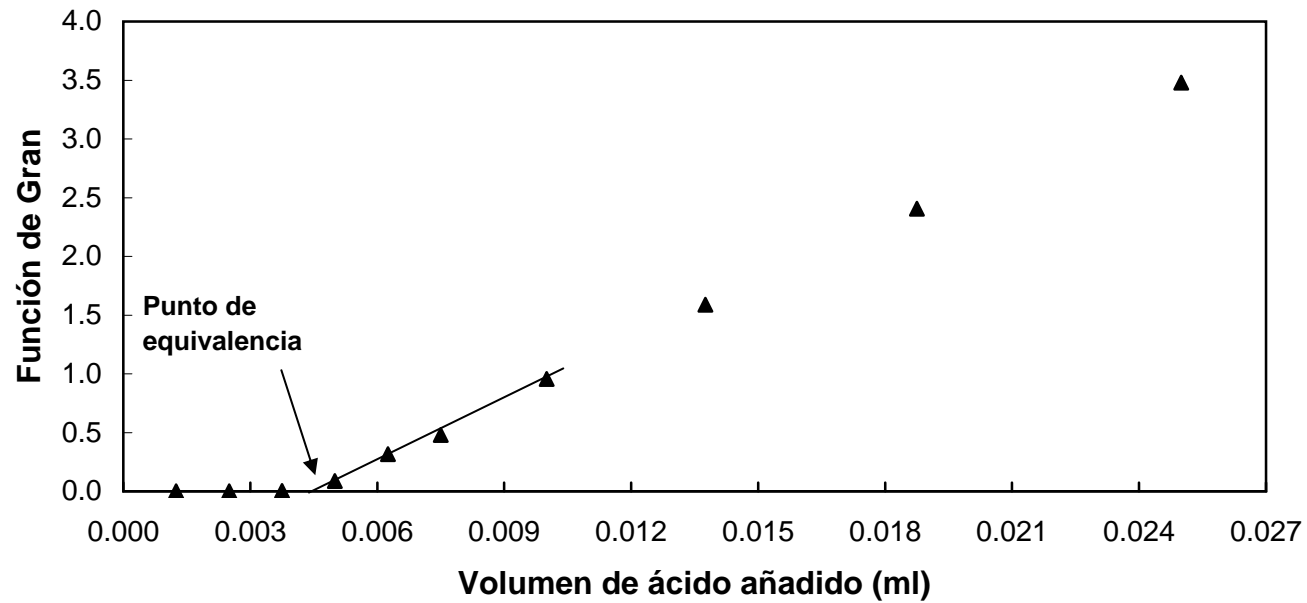
**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD  
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN**

pH	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> añadido	Función de Gran
6.69	0.00125	0.00041
6.27	0.00250	0.00107
5.73	0.00375	0.00372
4.36	0.00500	0.08732
3.80	0.00625	0.31708
3.62	0.00750	0.47995
3.32	0.01000	0.95774
3.10	0.01375	1.58975
2.92	0.01875	2.40678
2.76	0.02500	3.47995

**MUESTRA MA 3'**

V muestra=	20 ml
Normalidad HSO <sub>4</sub> =	1.6
P. Equivalencia=	0.0045 ml
Alcalinidad Tot.=	18.00 mg/l CaCO <sub>3</sub>
HCO <sub>3</sub> =	21.96 mg/l

**Titulación de Gran**



## ***ESTRATIGRAFÍA GENERAL***

A continuación se presenta una descripción de la columna estratigráfica del territorio de estudio, de lo más antiguo a lo más joven, donde se incluyen características litológicas, espesor, ubicación de los principales afloramientos, posición y relación estratigráfica, y por último, la edad para cada unidad.

### ***Cretácico***

#### ***FORMACIÓN XOCHICALCO (Kx)***

Esta es la unidad más antigua reconocida en el límite suroeste de la Cuenca de México. Fries (1960) le asignó a esta formación un espesor mínimo que excede los 500 m, su base no está expuesta y su cima se encuentra cubierta discordantemente por la Formación Morelos. La Formación Xochicalco está constituida por una secuencia de caliza, principalmente calcilitítica y calcilimolítica. Se considera que esta unidad se depositó en el Aptiano en un ambiente marino de cuenca relativamente profunda.

#### ***FORMACIÓN MORELOS (Km)***

Esta formación aflora al sur de la Sierra Chichinautzin, con un espesor máximo de 900 m, el cual adelgaza al este y oeste; se compone de una interestratificación de capas gruesas de caliza y dolomita diagenéticas, concordantes a anhidrita laminar subyacente. Esta unidad se depositó durante el Albiano Medio – Cenomaniano Temprano en una extensa plataforma marina (Fries, 1960).

#### ***FORMACIÓN EL DOCTOR (Kid)***

Wilson *et al* (1965) definen esta unidad para referirse a una facies calcárea, de banco y de cuenca del Albiano Medio – Cenomaniano Temprano. Según Fries (1960) la facies de cuenca aflora entre Apaxco y Tula, Hgo. y probablemente hacia el sur se interdigita con la Formación Morelos. Es una secuencia de 200 m de espesor y está constituida por caliza lodolítica en capas delgadas con nódulos y lentes de pedernal e intercalación local de lutita.

#### ***FORMACIÓN CUAUTLA (Kc)***

Fries (1960) reconoció facies de cuenca, de banco y de litoral del Cenomaniano Tardío – Turoniano Tardío y les asignó este nombre, predomina la facies de banco y aflora en la región, al sur de la Sierra Tepoztlán a una altitud promedio de 1,500 m snm y al norte de Zumpango a una elevación promedio de 2,400 m snm.

Esta diferencia de altitud se atribuye al desplazamiento de las fallas del Terciario y Cuaternario y/o al peso litoestático de las rocas del Cenozoico (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Esta formación está constituida por caliza principalmente calco-arenita de estratificación gruesa, con abundantes biostromas de rudistas, con un espesor que varía entre 200 y 750 m; es concordante con la Formación Mexcala suprayacente y se encuentra cubierta discordantemente en algunos lugares por el Grupo Balsas y rocas volcánicas del Terciario y Cuaternario (Fries, 1960).

### FORMACIÓN MEXCALA (Kmx)

Esta unidad aflora al sur de la Sierra Chichinautzin y en el cerro La Palma, distribuyéndose preferencialmente en zonas de sinclinales; está constituida por una interestratificación gradual rítmica de grauvaca (turbidita), limolita y lutita, su espesor máximo es 1,500 m. Esta secuencia descansa concordantemente sobre la Formación Cuautla y suprayace discordantemente el Grupo Balsas. Se considera que esta unidad se depositó durante el Coniaciano – Campaniano en un ambiente de depósito de agua somera (Fries, 1960).

### **Terciario**

#### GRANITO COLOTEPEC (Tgc)

Durante el fin del Cretácico y el Eoceno Medio se emplaza el Granito de Colotepec, descrito como una monzonita cuarcífera, el cual aflora en el extremo suroccidental intrusionando la Formación Xochicalco en el núcleo del Anticlinal de Colotepec.

#### GRUPO BALSAS (Teob)

Entre el Eoceno Tardío y el Oligoceno Temprano se deposita el Grupo Balsas, el cual aflora hacia el sur de la Cuenca de México y localmente, al noreste de Apaxco, Hgo; se describe como un conglomerado oligomictico calizo generalmente compacto, con matriz limo-arcillosa cementada por calcita y óxido de hierro, de estratificación masiva y espesor máximo de 500 m. Este conglomerado se encuentra cubierto por una secuencia de 800 a 2,000 m de espesor, conformada de capas deleznable de arcilla, limo y arena. Localmente, estos depósitos clásticos contienen interestratificaciones de yeso, caliza lacustre lenticular, derrames lávico basáltico y hacia la parte superior una toba riolítica (Fries, 1960). Esta unidad yace discordantemente sobre las formaciones del Cretácico y según De Cserna et. al. (1988) representa una molasa continental post-orogénica Laramide, acumulada con fallamiento normal lateral derecho y volcanismo basáltico probablemente fisural.

#### ROCAS VOLCÁNICAS DEL OLIGOCENO TARDÍO – MIOCENO TEMPRANO (Tomu)

En este conjunto de rocas se encuentran secuencias volcánicas que por sus características líticas, estratigrafía y edad, se diferencian de las rocas extrusivas del Grupo Balsas y del Mioceno Medio – Tardío. Estas rocas se presentan altamente erosionadas y fracturadas en la Sierra de Xochitepec, en los Cerros Picacho, Púlpito del Diablo y en otras pequeñas localidades; están constituidas de toba lítica, cristalina y vítrea, brecha tobácea y aglomerado, con espesor variable entre 390 y 1,750 m. En la parte superior, los piroclastos están interestratificados y/o cubiertos por derrames lávicos. Estas unidades cubren local y discordantemente las unidades cretácicas y al Grupo Balsas, e igualmente, de manera discordante, están cubiertas por rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío y localmente por formaciones del Plio-Cuaternario. Dataciones radiométricas indican que estas rocas se formaron en varios periodos magmáticos durante el Oligoceno Tardío y Mioceno Temprano.

#### GRUPO PACHUCA (Tomp)

Definido como grupo por Segerstrom (1961) representa la actividad volcánica del Oligoceno hasta el Plioceno; está constituido por una secuencia de material



clástico en la base y por brecha volcánica, piroclasto, derrame lávico y toba intercalada hacia la cima; están separados por discordancias erosionales. Las lavas varían en composición de basalto o riolita, sin embargo, predominan la andesita y la dacita. Se localizan hacia la región del Distrito Pachuca-Real del Monte y sus zonas aledañas, con un espesor máximo de 3,700 m (Geyne, *et. al*, 1963). Se presentan discordantemente sobre el Grupo Balsas y las secuencias cretácicas.

#### ROCAS EXTRUSIVAS DEL MIOCENO MEDIO Y TARDÍO (T<sub>mu</sub>)

Al igual que las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío – Mioceno Temprano, éste es un conjunto de rocas que presentan una litología y estratigrafía diferente a la circundante. Estas rocas afloran por toda la cuenca en superficies pequeñas debido a que muchas veces se encuentra cubierta por material volcánico más reciente. Los afloramientos más importantes de estas rocas se encuentran en los cerros El Elefante, El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños, la base de la Sierra de Guadalupe, la base de las Sierra de Las Cruces, entre otros. Están constituidas por secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas que se interestratifican con brecha volcánica en algunos lugares. La lava principalmente es andesítica a dacítica (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). En la literatura no se ha establecido el espesor de esta unidad, únicamente se señala su gran distribución en el subsuelo y se considera de Edad Mioceno Medio a Tardío, según las dataciones isotópicas. Estas rocas cubren discordantemente rocas volcánicas del Oligoceno Tardío – Mioceno Temprano, al Grupo Balsas y a rocas cretácicas.

#### DEPÓSITOS VOLCÁNICOS DEL PLIOCENO TEMPRANO (T<sub>pv</sub>)

Este Término se refiere al conjunto de rocas extrusivas que afloran en los flancos de las sierras Las Cruces, Zempoala y Río Frío, igualmente se presentan en las sierras de Guadalupe y Tepetzotlán y en cerros aislados dentro de la cuenca, con espesor del orden de 650 m. La composición de estos depósitos varía de andesítica a dacítica, la secuencia piroclástica generalmente no está consolidada, constituye toba cristalina, vítrea, lítica y pumítica; suprayace con discordancia erosional rocas volcánicas del Oligoceno, Mioceno y están cubiertas de la misma manera por unidades volcánicas del Plioceno Tardío y Cuaternario. Con base en estas relaciones estratigráficas se clasifican como rocas del Plioceno Temprano (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### FORMACIÓN OTOMÍ (T<sub>po</sub>)

Esta unidad comprende los productos volcánicos emitidos durante la parte más temprana del Plioceno Tardío, localizados al oeste de la cuenca, en la Sierra de Monte Alto, y aflora hacia el poblado Santa María Mazatla. Se caracteriza por estar formada en su mayor parte por depósitos piroclásticos, los cuales se presentan en flujos lobulados y con una gran extensión. Existen varias secuencias volcánicas dentro de esta unidad, en la que predominan los flujos piroclásticos, principalmente los de ceniza (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Tiene un espesor máximo de 1,300 m en el Cerro Las Palomas, se encuentra discordantemente sobre rocas volcánicas del Plioceno Temprano y es suprayacida discordantemente por la Formación Las Cruces del Plioceno Tardío, por lo que le asignan una Edad Plioceno Tardío.

### ROCAS VOLCÁNICAS MÁFICAS DEL PLIOCENO TARDÍO (Tpb)

Originalmente a este grupo de rocas máficas, distribuidas en la parte septentrional y que forman mesetas de lava y conos aislados, se le conocía como Grupo San Juan por Segerstrom (1961), nombre que posteriormente fue renombrado por Fries (1962) como rocas volcánicas máficas sin nombre y que finalmente, Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) denominan a este conjunto como rocas volcánicas máficas del Plioceno Tardío. Estas rocas están constituidas por derrames de lava de composición basáltica a andesítica, algunas veces interstratificados con capas de brecha volcánica de poco espesor y/o con piroclastos pertenecientes y clastos aluviales del Plioceno (Tppc) que se describen más adelante. En la región de Pachuca muestra un espesor máximo que no sobrepasa los 300 m. Cantagrel y Robin (1979) obtuvieron una edad entre 2.5 y 1.5 Ma. mediante dataciones isotópicas de K-Ar, por lo que se clasifican dentro del período Plioceno Tardío a la parte más temprana del Pleistoceno. Estas rocas máficas yacen discordantemente sobre las unidades terciarias anteriores y en algunos lugares cubren las rocas mesozoicas con marcada discordancia angular y erosional (Fries, 1962).

### FORMACIÓN LAS CRUCES (Tpc)

Esta formación fue definida originalmente por Schlaepfer (1968) como el conjunto de rocas volcánicas que forma las Sierras de Las Cruces y Monte Alto. La parte inferior de esta unidad está constituida por brechas volcánicas con interstratificación de lavas andesíticas, y la parte superior, discordante, está constituida por derrames superpuestos de lava dacítica intercalada localmente con la Formación Tarango. Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) proponen el abandono de la unidad que se había denominado Formación Tarango, debido a que esta formación se puede extender a las secuencias piroclásticas de las formaciones Otomí, Tláloc y Llano Grande. Los depósitos piroclásticos consisten en pómez pliniana, secuencias de surges cubiertas por flujos piroclásticos generalmente no soldados de cenizas cristalina, vítreas y de pómez; los flujos piroclásticos a su vez se encuentran cubiertos por ceniza vítrea. Esta formación cubre con discordancia erosional las rocas extrusivas del Mioceno Medio – Tardío, las del Mioceno Temprano y se encuentra cubierto por depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario, así como también por derrames lávicos y piroclastos de las formaciones Chichinautzin y El Pino (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

### FORMACIÓN ZEMPOALA (Tpz)

Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) indican que esta formación está constituida por el conjunto de productos volcánicos de dos centros eruptivos alineados en dirección norte-sur, que se encuentran hacia el sudoeste de la cuenca y que posiblemente son contemporáneos con el vulcanismo de la Formación Las Cruces, considerando su morfología, posición estratigráfica y litología. Esta unidad está constituida hacia el norte por una secuencia de lava andesítica afanítica-porfirítica, con escasos fenocristales pequeños de anfíbol, cuarzo secundario y depósitos piroclásticos como flujo de ceniza y brecha volcánica. Hacia el sur se presenta brecha volcánica, que consiste de fragmentos mal clasificados de tamaño lapilli a bloques, en matriz vítrea y cristalina, con abundancia de líticos accidentales y juveniles, cuya composición va de andesítica a riódacítica. El espesor aflorante máximo estimado es de 1,000 m en el Cerro

Zempoala; yace discordantemente sobre depósitos volcánicos del Plioceno, rocas extrusivas del Mioceno Medio-Tardío y es suprayacida discordantemente por la Formación Chichinautzin e interdigitada con los productos piroclásticos y clásticos del Plioceno en la región de Cuernavaca; por su posición estratigráfica y similitud con el volcanismo de la Formación Las Cruces, Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, (1989) le asignan una Edad Plioceno Tardío.

#### RIOLITA NAVAJAS (Tpn)

Esta unidad del Plioceno Tardío se presenta en la Sierra Navajas, en su parte noreste, con un espesor aflorante probable de 500 m en su parte central; está constituida por una secuencia riolítica de derrames lávicos, intercalados con brecha soldada y no soldada de flujo de ceniza vítrea, con fragmentos líticos, pumíticos y de obsidiana. Esta unidad descansa discordantemente sobre el Grupo Pachuca y rocas del Oligoceno-Mioceno, se encuentra cubierta discordantemente por la Formación El Pino.

#### DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS Y CLÁSTICOS ALUVIALES DEL PLIOCENO (Tppc)

Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) propusieron este nombre para los depósitos relacionados con la actividad piroclástica y fluvial del Plioceno, aflorantes al oeste de Cuautla. Hacia la parte meridional de la cuenca esta unidad se compone de toba, brecha volcánica y aglomerado, con horizontes de conglomerado, arena y arcilla; se encuentran acumulados en fosas tectónicas (Fosa de Chalco) y rellenando amplios valles surcados en rocas volcánicas del Oligoceno – Mioceno, con un espesor máximo del orden de 750 m, en el centro de las depresiones. Estos depósitos se presentan interdigitados con roca volcánica de todo el Plioceno.

### **Cuaternario**

#### FORMACIÓN LLANO GRANDE (Qllg)

Se refiere a la secuencia eruptiva de composición andesítica a riodacítica que forma el volcán del mismo nombre, las cuales afloran en la base noroeste de la Sierra Nevada, cuyo espesor no se ha definido claramente. Estos depósitos consisten de capas delgadas de lapilli pumítico y lítico de caída, surges laminares, flujo de ceniza vítrea y cristalina, y brecha de flujo soldada; estos piroclastos se encuentran cubiertos por derrames lávicos y la actividad termina con domos. Esta unidad está cubierta discordantemente por la Formación Iztaccíhuatl y suprayace de la misma forma rocas volcánicas del Oligoceno - Mioceno. Se considera perteneciente al Pleistoceno Temprano (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

#### FORMACIÓN EL PINO (Qpp)

Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) agrupan dentro de esta formación rocas volcánicas, principalmente máficas que forman los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla, Gordo, entre otros; son secuencias de flujos lávicos con intercalación delgada de tefra no consolidada, de caída, cuyas características implican un volcanismo estromboliano (Sheridan y Wohletz, 1983); los derrames lávicos son de naturaleza andesítica, basáltica y traquítica. Su máximo espesor se presenta en centros eruptivos y es del orden de 750 m. Esta formación yace discordantemente sobre unidades volcánicas del Oligoceno,

Mioceno, Plioceno y la Formación Llano Grande del Pleistoceno Temprano; está cubierta por la Formación Chichinautzin. Su edad se considera entre 0.9 y 0.7 Ma según su posición estratigráfica y magnetismo remanente inverso.

#### FORMACIÓN TLÁLOC (Qt)

Esta formación definida por Schlaepfer (1968) se refiere a las coladas lávicas que forman parte de la Sierra de Río Frío, con espesor aflorante aproximado en el centro de la sierra de 1,800 m; su composición es andesítica, latítica y dacítica; consta de sucesiones particulares en su base de pómez y líticos angulosos de lapilli. Esta unidad cubre discordantemente rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío, del Plioceno Temprano y las formaciones El Pino y Llano Grande, sobreyace en discordancia aparente a las formaciones Chichinautzin e Iztaccíhuatl, su edad se considera del Pleistoceno (0.6 y 0.7 Ma).

#### FORMACIÓN IZTACCÍHUATL (Qi)

Esta formación está constituida por varias secuencias, principalmente efusivas, cuya composición varía de andesítica basáltica a dacítica, los afloramientos en el volcán Iztaccíhuatl presentan un espesor máximo aproximado de 2,500 m. Esta unidad es suprayacida con una ligera discordancia por las formaciones Llano Grande y Tláloc. La edad isotópica obtenida con la magnetización normal (Mooser *et al*, 1974; Steele, 1971) sugieren diferentes periodos eruptivos dentro del intervalo de 0.6 a 0.08 Ma.

#### FORMACIÓN POPOCATÉPETL (Qp)

Esta formación consiste de los derrames lávicos juveniles que cubren la parte superior y el extremo suroeste del Volcán Popocatepetl y conforma cuatro secuencias eruptivas principales. La primera está constituida por surges planares y bloques lávicos imbricados no clasificados. La segunda es netamente efusiva y consiste en andesita básica rica en olivino; andesita ácida con olivino, piroxeno, andesita y dacita (Robin y Boudal, 1987). La tercera inicia con efusiones andesíticas y prosigue con tres periodos explosivos, los que principian con pómez y ceniza pliniana, surges y flujos no soldados de ceniza. Finalmente, la cuarta secuencia eruptiva fue inicialmente efusiva y después explosiva, con sucesión piroclástica similar a la tercera secuencia, pero con mayor cantidad de derrames lávicos intercalados (Robin y Boudal, 1987). Se le ha inferido un espesor máximo de 3,500 m, y cubre discordantemente la parte meridional de la Formación Iztaccíhuatl y probablemente se interdigita al oeste con la Formación Chichinautzin y hacia las llanuras aluviales de Cuautla y Amecameca con clastos fluviales. La relación estratigráfica y datación isotópica con  $^{14}\text{C}$  le suponen una Edad de Pleistoceno Tardío – Holoceno.

#### FORMACIÓN CHICHINAUTZIN (Qc)

Originalmente reconocida como Grupo por Fries (1960), posteriormente denominada formación al ser estudiada con detalle por Bloomfield (1975) y Martín (1982), se refieren a todo el volcanismo monogenético principalmente estromboliano que se distribuye ampliamente en la Cuenca de México. Sin embargo, los afloramientos más representativos se encuentran hacia el sur en donde alcanza el mayor espesor de 1,800 m (Fries, 1960). Las lavas de esta unidad son muy extensas y su composición es generalmente andesítico-basáltica y andesítica, igualmente, se presentan intercalaciones de material piroclástico.

Esta unidad cubre discordantemente casi todas las unidades cretácicas, terciarias, algunas veces la Formación El Pino y se encuentra interdigitada con depósitos lacustres y de aluvión. Arnold y Libby (1951) dataron con  $^{14}\text{C}$  la colada lávica más reciente de esta unidad proveniente del volcán Xitle, en  $2,422 \pm 250$  años, permitiendo clasificar la edad de la formación dentro del intervalo Pleistoceno Tardío a Holoceno.

#### DEPÓSITOS ALUVIALES (Qal)

Se denomina de esta manera al material clástico fluvial acumulado contemporáneamente con sedimentos lacustres y depósitos volcánicos del Cuaternario. Estos depósitos se encuentran en el centro de depresiones topográficas de unidades preexistentes, con un espesor cercano a los 500 m que se adelgaza hacia las márgenes de la llanura. Hacia el norte y sur de la cuenca la unidad se presenta como material poco consolidado compuesto por fragmentos con tamaño de grava, arena, limo y arcilla, conteniendo localmente marga, tierra diatomácea, turba, loess y travertino (Fries, 1962). Estos depósitos descansan ampliamente en discordancia sobre los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno, y localmente, sobre rocas más antiguas y del Cretácico; igualmente se encuentran interdigitados con depósitos lacustres y teniendo en cuenta su posición estratigráfica, se le ha asignado una Edad Pleistoceno – Holoceno.

#### DEPÓSITOS LACUSTRES (Qla)

Estos depósitos son los sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, los cuales se depositaron en un ambiente lacustre, formando grandes planicies a lo largo de la cuenca, con un espesor que varía entre 30 y 300 m, localizados principalmente hacia el centro de la planicie sobre la que se construye la ciudad de México, Texcoco y Chalco. Estos depósitos se encuentran interdigitados con arena, limo y ocasionalmente grava; están compuestos de 5-10% de partículas tamaño arena, en su mayoría oolitos; 55-65% de microfósiles silíceos tamaño limo, principalmente diatomeas con calcita precipitada bioquímicamente. El 20-30% está compuesto de partículas tamaño arcilla (monmorillonita) de la cual se estima que el 10% es esmectita, el restante 5-10% corresponde a materia orgánica (Edmunds *et al*, 2002). A través de dataciones con  $^{14}\text{C}$  se les asignó una edad entre 4,800 a 46,000 años (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

<b>Símbolo Unidades</b>	Coordenadas		pH	Eh	T agua °C	STD mg/l	Cond µS/cm	Na mg/L	Li mg/L	Be mg/L	Mg mg/L	Al mg/L	Si mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Sc mg/L
	X	Y														
<b>Límite de detección</b>																
16 Justina 2	567889	2135721	6.35	27.00	20.20	1035.7	1141	120	0.089	< 0.0001	39.4	0.005	47.1	13.3	54.4	0.009
237 Panotla (2)	572245	2136804	6.83	25.00	19.10	1002.1	704	24.8	0.01	< 0.0001	25	0.002	41	12.2	67.9	0.009
Nativitas (3)	571262	2126260	7.40	157.00	20.90	753.7	828	46.8	0.031	< 0.0001	33.3	0.002	41.8	15.2	51.1	0.009
208 Tetla	572245	2136804	7.36	85.00	18.70	178.7	466	29.2	0.027	< 0.0001	20.6	0.003	41.1	4.19	25.2	0.008
221 Tlalancalek	554857	2139025	7.39	113.00	19.90	504.5	657	57.8	0.015	< 0.0001	25.9	0.006	44.9	11.7	30.4	0.008
DAM TEX 3	575811	2131431	7.81	97.00	19.10	397.2	395	16.1	0.004	< 0.0001	14.6	0.005	40.2	7.48	28.8	0.007
230 M Tlal 2	551045	2136651	7.34	73.00	14.90	60.1	174	11.2	0.01	< 0.0001	8.29	0.007	31.7	3.11	5.8	0.005
265 Salvador V3	550838	2130579	6.60	125.00	12.00	86.1	182	10.1	0.01	< 0.0001	7.5	0.005	28.6	3.49	8.5	0.005
214 El Salto	532911	2141246	7.39	64.00	10.60	28.2	87	5.17	0.009	< 0.0001	3.01	0.005	24.3	1.71	3.8	0.004
22 Cuahutemoc	538003	2144269	7.08	88.00	12.50	30.9	73	6.15	0.02	< 0.0001	3.33	< 0.002	24.5	1.91	4.1	0.005
18 Guadalupe 2	564154	2131616	6.48	90.00	17.70	304.0	547	26.6	0.01	< 0.0001	28.1	0.007	37	4.47	28.3	0.006
Atotonilco 3	556022	2142542	5.93	-19.00	23.70	1534.1	978	42.2	0.064	< 0.0001	70.5	0.003	61.5	15.5	86.7	0.011
MONTEALEGRE 01	469961	2125668	7.34	9.00	9.50	29.7	59	4.2	0.002	< 0.0001	1.9	0.013	23.1	3.9	4.2	0.003
MONTEALEGRE 02	468300	2126780	6.90	4.00	17.10	19.8	40	2.99	< 0.001	< 0.0001	1.37	0.05	10.7	1.24	2.8	0.001
MONTEALEGRE 03	428267	2126835	6.67	9.00	13.20	18.6	30	3.44	< 0.001	< 0.0001	1.08	0.018	17	1.82	2.9	0.002
MA' 01	469961	2125668	7.34	9.00	9.50	29.7	59	4.2	0.002	< 0.0001	1.9	0.013	23.1	3.9	4.2	0.003
MA' 02	468300	2126780	6.90	4.00	17.10	19.8	40	2.99	< 0.001	< 0.0001	1.37	0.05	10.7	1.24	2.8	0.001
MA' 03	428267	2126835	6.67	9.00	13.20	18.6	30	3.44	< 0.001	< 0.0001	1.08	0.018	17	1.82	2.9	0.002

<b>Símbolo Unidades</b>	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Rb	Sr
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<b>Límite de detección</b>																
16 Justina 2	0.0073	0.0164	< 0.0005	0.382	< 0.01	0.000242	0.0034	0.0023	0.0037	< 0.00001	0.00012	0.00424	0.0008	0.17	0.019	0.58
237 Panotla (2)	0.0061	0.0277	< 0.0005	1.05	< 0.01	0.000772	0.0012	0.0036	0.0051	0.00002	0.00007	0.00545	0.0007	0.067	0.0121	0.69
Nativitas (3)	0.0058	0.0305	0.0057	0.0006	< 0.01	0.000029	0.0005	0.0004	0.0032	< 0.00001	0.00016	0.00451	0.0008	0.122	0.0156	0.4
208 Tetla	0.0051	0.0044	< 0.0005	0.0181	0.05	< 0.000005	< 0.0003	0.0013	0.0086	< 0.00001	0.00007	0.00267	0.0003	0.039	0.00632	0.176
221 Tlalancalek	0.0056	0.0199	0.0057	0.0001	< 0.01	< 0.000005	< 0.0003	0.0004	0.0019	< 0.00001	0.00016	0.0017	0.0005	0.058	0.0188	0.26
DAM TEX 3	0.0048	0.0161	0.009	0.0027	< 0.01	0.000019	< 0.0003	0.0005	0.0094	< 0.00001	0.00004	0.00107	0.0005	0.058	0.00781	0.24
230 M Tlal 2	0.0036	0.0099	0.0011	0.0004	< 0.01	0.000008	< 0.0003	0.0018	0.006	< 0.00001	0.00005	0.00071	0.0002	0.022	0.0085	0.0432
265 Salvador V3	0.0037	0.0165	0.0007	0.0005	< 0.01	0.000017	< 0.0003	0.0003	0.0043	< 0.00001	0.00002	0.00116	< 0.0002	0.018	0.0127	0.0549
214 El Salto	0.0026	0.0062	< 0.0005	0.0001	< 0.01	< 0.000005	< 0.0003	< 0.0002	0.0046	< 0.00001	0.00007	0.00082	< 0.0002	0.011	0.00792	0.0248
22 Cuahutemoc	0.0034	0.005	< 0.0005	< 0.0001	< 0.01	< 0.000005	< 0.0003	< 0.0002	< 0.0005	< 0.00001	0.00006	0.00338	< 0.0002	0.007	0.00926	0.0276
18 Guadalupe 2	0.0043	0.0207	0.0009	0.0036	< 0.01	0.000132	0.0135	0.001	0.0233	< 0.00001	0.00003	0.00134	0.0005	0.056	0.0105	0.191
Atotonilco 3	0.0075	0.007	0.0021	0.0008	< 0.01	< 0.000005	0.003	< 0.0002	0.0058	< 0.00001	0.00036	0.0035	0.0005	0.051	0.0307	0.7
MONTEALEGRE 01	0.0022	0.0041	< 0.0005	0.0002	< 0.01	0.000008	0.0004	0.0009	0.0034	< 0.00001	< 0.00001	0.00012	< 0.0002	0.01	0.0203	0.0374
MONTEALEGRE 02	0.0027	0.0013	0.0006	0.0008	0.03	0.00002	0.0005	0.001	0.0032	0.00002	0.00001	0.00009	< 0.0002	0.003	0.00281	0.0322
MONTEALEGRE 03	0.0015	0.0024	< 0.0005	0.0002	< 0.01	0.000009	0.0003	0.0003	0.0012	0.00001	< 0.00001	0.00009	< 0.0002	0.004	0.00564	0.0214
MA' 01	0.0022	0.0041	< 0.0005	0.0002	< 0.01	0.000008	0.0004	0.0009	0.0034	< 0.00001	< 0.00001	0.00012	< 0.0002	0.01	0.0203	0.0374
MA' 02	0.0027	0.0013	0.0006	0.0008	0.03	0.00002	0.0005	0.001	0.0032	0.00002	0.00001	0.00009	< 0.0002	0.003	0.00281	0.0322
MA' 03	0.0015	0.0024	< 0.0005	0.0002	< 0.01	0.000009	0.0003	0.0003	0.0012	0.00001	< 0.00001	0.00009	< 0.0002	0.004	0.00564	0.0214

<b>Símbolo</b>	Y	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
<b>Unidades</b>	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<b>Límite de detección</b>	0.000003	0.00001	0.000005	0.0001	0.00001	0.00001	0.0002	0.00001	0.000001	0.0001	0.00001	0.0001	0.001
16 Justina 2	0.000107	0.00008	< 0.000005	0.0033	< 0.00001	0.00006	< 0.0002	0.00003	0.000001	0.0006	0.00003	0.0001	0.532
237 Panotla (2)	0.000016	0.00001	< 0.000005	0.0038	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	0.00006	0.000001	0.0001	0.00007	0.0001	0.309
Nativitas (3)	0.000025	0.00003	< 0.000005	0.0026	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	0.00002	0.000001	0.0003	0.00006	0.0001	0.187
208 Tetla	0.000012	< 0.00001	< 0.000005	0.0023	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	0.00002	0.000001	0.0001	0.00002	0.0001	0.26
221 Tlalancalek	0.000022	0.00008	< 0.000005	0.0038	< 0.00001	0.00002	< 0.0002	0.00001	0.000001	< 0.0001	0.00004	0.0001	0.297
DAM TEX 3	0.000008	0.00004	< 0.000005	0.0005	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	< 0.00001	0.000001	0.0002	0.00004	0.0001	0.113
230 M Tlal 2	0.000006	0.00022	< 0.000005	0.0007	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	< 0.00001	0.000001	0.0001	0.00006	0.0001	0.039
265 Salvador V3	0.000023	0.00004	< 0.000005	0.0006	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	< 0.00001	0.000001	0.0001	0.00008	0.0001	0.037
214 El Salto	0.000005	0.00002	< 0.000005	0.0006	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	< 0.00001	0.000001	< 0.0001	0.00009	0.0001	0.008
22 Cuahutemoc	< 0.000003	< 0.00001	< 0.000005	0.0005	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	< 0.00001	0.000001	< 0.0001	0.00014	0.0001	< 0.001
18 Guadalupe 2	0.000062	0.00002	< 0.000005	0.0012	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	0.00001	0.000001	0.0001	0.00005	0.0001	0.091
Atotonilco 3	0.000133	0.00013	0.000007	0.0008	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	0.00002	0.000001	< 0.0001	0.00002	0.0001	0.144
MONTEALEGRE 01	0.000037	0.00014	< 0.000005	0.0003	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	0.00006	0.000001	0.0002	0.00005	0.0001	0.008
MONTEALEGRE 02	0.00003	0.00009	< 0.000005	0.0001	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	0.00001	0.000001	0.0002	0.00006	0.0001	0.002
MONTEALEGRE 03	0.000027	0.00003	< 0.000005	0.0001	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	< 0.00001	0.000001	0.0001	0.00003	0.0001	0.001
MA' 01	0.000037	0.00014	< 0.000005	0.0003	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	0.00006	0.000001	0.0002	0.00005	0.0001	0.008
MA' 02	0.00003	0.00009	< 0.000005	0.0001	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	0.00001	0.000001	0.0002	0.00006	0.0001	0.002
MA' 03	0.000027	0.00003	< 0.000005	0.0001	< 0.00001	< 0.00001	< 0.0002	< 0.00001	0.000001	0.0001	0.00003	0.0001	0.001

<b>Símbolo</b>	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
<b>Unidades</b>	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<b>Límite de detección</b>	0.000001	0.0001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
16 Justina 2	0.000022	0.333	0.000015	0.000014	0.000002	0.000009	0.000005	0.000018	0.000007	< 0.000001	0.000008	0.000002	0.00001
237 Panotla (2)	0.000017	0.265	0.000008	0.000009	< 0.000001	0.000003	0.000002	0.000012	0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001
Nativitas (3)	0.00004	0.153	0.000006	0.000007	< 0.000001	0.000003	< 0.000001	0.000009	0.000001	< 0.000001	0.000001	< 0.000001	0.000002
208 Tetla	0.000019	0.0397	0.000009	0.000013	< 0.000001	0.000002	< 0.000001	0.000003	0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001
221 Tlalancalek	0.000261	0.0915	0.000017	0.000027	0.000002	0.000004	< 0.000001	0.000003	0.000002	< 0.000001	0.000002	< 0.000001	0.000001
DAM TEX 3	0.000086	0.0283	0.000014	0.000014	0.000001	0.000006	0.000001	0.000002	0.000001	< 0.000001	0.000002	< 0.000001	< 0.000001
230 M Tlal 2	0.0001	0.0054	0.000144	0.000299	0.000012	0.000032	< 0.000001	< 0.000001	0.000004	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001
265 Salvador V3	0.000587	0.0093	0.000017	0.000012	0.000002	0.000009	0.000002	< 0.000001	0.000003	< 0.000001	0.000002	< 0.000001	0.000002
214 El Salto	0.000396	0.005	0.000006	0.000007	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001
22 Cuahutemoc	0.00065	0.0019	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001
18 Guadalupe 2	0.000026	0.0376	0.000013	0.00002	0.000002	0.00001	0.000003	0.000002	0.000004	< 0.000001	0.000005	0.000001	0.000006
Atotonilco 3	0.00146	0.162	0.00003	0.000015	0.000005	0.000027	0.000006	0.00001	0.00001	0.000002	0.000011	0.000003	0.000009
MONTEALEGRE 01	0.000941	0.0014	0.000033	0.000037	0.000005	0.00002	0.000003	< 0.000001	0.000006	< 0.000001	0.000004	< 0.000001	0.000004
MONTEALEGRE 02	0.00007	0.0055	0.000051	0.000076	0.000009	0.000034	0.000006	0.000002	0.000006	0.000001	0.000004	0.000001	0.000003
MONTEALEGRE 03	0.000087	0.0032	0.000032	0.000022	0.000007	0.000027	0.000009	0.000001	0.000008	0.000001	0.000003	< 0.000001	0.000004
MA' 01	0.000941	0.0014	0.000033	0.000037	0.000005	0.00002	0.000003	< 0.000001	0.000006	< 0.000001	0.000004	< 0.000001	0.000004
MA' 02	0.00007	0.0055	0.000051	0.000076	0.000009	0.000034	0.000006	0.000002	0.000006	0.000001	0.000004	0.000001	0.000003
MA' 03	0.000087	0.0032	0.000032	0.000022	0.000007	0.000027	0.000009	0.000001	0.000008	0.000001	0.000003	< 0.000001	0.000004

<b>Símbolo</b>	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Pt	Au	Hg	Tl	Pb
<b>Unidades</b>	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<b>Límite de detección</b>	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000002	0.000001	0.000002	0.0003	0.000002	0.0002	0.000001	0.00001
16 Justina 2	0.000002	0.000002	0.000005	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000002	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0002	0.000081	0.00009
237 Panotla (2)	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	0.000008	0.000003	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	< 0.0002	0.000072	0.00013
Nativitas (3)	< 0.000001	0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	0.000004	0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0007	0.000012	0.00014
208 Tetla	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	0.000006	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	< 0.0002	0.000004	0.00024
221 Tlalancalek	< 0.000001	0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	0.000003	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.001	0.000002	0.00009
DAM TEX 3	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	0.000004	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0013	0.000002	0.00012
230 M Tlal 2	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	0.000005	< 0.000001	0.000007	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0013	0.000002	0.00032
265 Salvador V3	< 0.000001	0.000002	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	0.000009	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0014	0.00001	0.0001
214 El Salto	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	0.000011	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0016	0.000006	0.00008
22 Cuahutemoc	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	0.000011	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	< 0.0002	0.000002	< 0.00001
18 Guadalupe 2	< 0.000001	0.000006	0.000002	< 0.000001	< 0.000001	0.000003	0.000002	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0013	0.000014	0.00021
Atotonilco 3	0.000001	0.000014	0.000002	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000002	0.000002	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0009	0.000025	0.00008
MONTEALEGRE 01	< 0.000001	0.000004	< 0.000001	0.000002	< 0.000001	0.000003	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0006	0.000019	0.00134
MONTEALEGRE 02	< 0.000001	0.000003	< 0.000001	0.000002	< 0.000001	< 0.000002	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	< 0.0002	0.000007	0.00188
MONTEALEGRE 03	< 0.000001	0.000003	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000002	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0003	0.000005	0.0001
MA' 01	< 0.000001	0.000004	< 0.000001	0.000002	< 0.000001	0.000003	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0006	0.000019	0.00134
MA' 02	< 0.000001	0.000003	< 0.000001	0.000002	< 0.000001	< 0.000002	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	< 0.0002	0.000007	0.00188
MA' 03	< 0.000001	0.000003	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000001	< 0.000002	< 0.000001	< 0.000002	< 0.0003	< 0.000002	0.0003	0.000005	0.0001

<b>Símbolo</b>	Bi	Th	U	F	Cl	HCO3	NO2 (as N)	Br	NO3 (as N)	PO4 (as P)	SO4	Error
<b>Unidades</b>	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	%
<b>Límite de detección</b>	0.0003	0.000001	0.000001	0.01	0.03		0.01	0.03	0.01	0.02	0.03	
16 Justina 2	< 0.0003	< 0.000001	0.00143	0.52	37.9	600.24	0.02	0.2	1.4	0.4	22.8	0.59
237 Panotla (2)	< 0.0003	< 0.000001	0.00283	0.3	6.33	402.6	0.02	0.06	1.48	0.26	23.9	-3.07
Nativitas (3)	< 0.0003	< 0.000001	0.00178	0.58	25.2	322.08	0.02	0.08	12.6	< 0.03	25.9	8.34
208 Tetla	< 0.0003	< 0.000001	0.00102	0.44	4.93	275.72	< 0.01	< 0.03	< 0.01	0.1	13.2	-6.50
221 Tlalancalek	< 0.0003	< 0.000001	0.00311	0.91	4.9	305	< 0.01	< 0.04	1.2	0.08	5.01	10.43
DAM TEX 3	< 0.0003	< 0.000001	0.000977	0.51	5.72	173.24	0.03	0.05	3.11	< 0.02	3.97	6.78
230 M Tlal 2	< 0.0003	< 0.000001	0.000137	0.17	1.26	92.72	< 0.01	< 0.03	0.32	0.04	1.87	-1.78
265 Salvador V3	< 0.0003	< 0.000001	0.000693	0.24	1.89	74.26	< 0.01	< 0.03	1.06	0.06	5.66	6.20
214 El Salto	< 0.0003	< 0.000001	0.000163	0.03	0.51	30.5	< 0.01	< 0.03	0.06	0.05	1.96	11.97
22 Cuahutemoc	< 0.0003	< 0.000001	0.000116	0.06	0.52	67.1	< 0.01	< 0.03	0.05	< 0.02	1.02	-17.64
18 Guadalupe 2	< 0.0003	< 0.000001	0.00116	0.34	12.4	136.64	< 0.01	0.04	12.5	0.03	54.2	14.68
Atotonilco 3	< 0.0003	< 0.000001	0.00218	0.1	4.81	610	0.03	< 0.07	1.2	< 0.05	2.8	9.64
MONTEALEGRE 01	< 0.0003	< 0.000001	0.000162	0.19	1.3	24.4	< 0.01	< 0.04	0.22	< 0.03	7.2	5.02
MONTEALEGRE 02	< 0.0003	< 0.000001	0.000007	0.37	0.76	9.76	< 0.01	< 0.03	0.11	< 0.02	6.62	12.96
MONTEALEGRE 03	< 0.0003	< 0.000001	0.000005	0.1	0.67	19.52	< 0.01	< 0.03	0.07	< 0.02	3.97	0.99
MA' 01	< 0.0003	< 0.000001	0.000162	0.19	1.3	27.82	< 0.01	< 0.04	0.22	< 0.03	7.2	0.47
MA' 02	< 0.0003	< 0.000001	0.000007	0.37	0.76	16.59	< 0.01	< 0.03	0.11	< 0.02	6.62	-2.00
MA' 03	< 0.0003	< 0.000001	0.000005	0.1	0.67	22.45	< 0.01	< 0.03	0.07	< 0.02	3.97	-4.40



**1 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 14 junio 2006	LOCALIDAD: Montealegre 01
TEMPERATURA AMBIENTE: 10°C	HORA DE INICIO: 11:45
DURACIÓN DEL MUESTREO: 65 min	No. DE MUESTRA: 1
CLAVES DEL APROV.: _____	TIPO DE APROV.: Arroyo _____
FOTO NÚMERO: MA1-MA1_6	USO DEL AGUA:
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2125668 N; 469961 E; Altitud: 3408 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____	mg/l
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____	mg/l
		_____	ALCALINIDAD:	_____	mg/l CaCO <sub>3</sub>
Tiempo	12:05	12:13	12:40		
Eh (mV)	-3	5	9		
PH	7.47	7.48	7.34		
CE (µ-S)	60	62	59		
Oxig (mg/l)					
T °C	8.5	8.1	9.5		

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: MA 1'  
MA 1' ac

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	30	10	5	5	5	5	8	10	12	20	30	50	100	100	201	200	300
pH	5.83	4.36	4.26	4.08	4.01	3.96	3.86	3.79	3.76	3.63	3.52	3.40	3.24	3.12	2.97	2.89	2.79

**COMENTARIOS:** Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 0.16 N

## 2 ESTUDIO: Servicios Ambientales

### DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

#### 1.- DATOS GENERALES

FECHA: 14 junio 2006	LOCALIDAD: Montealegre 02 (Río Las Regaderas)
TEMPERATURA AMBIENTE: 14°C	HORA DE INICIO: 13:45
DURACIÓN DEL MUESTREO: 83 min	No. DE MUESTRA: 2
CLAVES DEL APROV.: _____	TIPO DE APROV.: Río _____
FOTO NÚMERO: MA2-MA2_4	USO DEL AGUA:
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2126780 N; 468300 E; Altitud: 3480 msnm

#### 2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____	mg/l
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____	mg/l
		_____	ALCALINIDAD:	_____	mg/l CaCO <sub>3</sub>
Tiempo	14:07	14:16	14:49	14:58	
Eh (mV)	2	4	-1	63	
PH	-	7.44	7.19	6.90	
CE (µ-S)	20	40	41	40	
Oxig (mg/l)	-	-	-	-	
T °C	16	16.2	17.1	17.1	

#### 3.- FOTOS



#### 4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: MA 2'  
MA 2' ac

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	10	10	5	5	5	10	20	30	50	50	80	100	200	500	1000		
pH	6.64	5.19	4.98	4.83	4.84	4.70	4.55	4.46	4.23	4.22	4.03	4.03	3.94	3.76	3.44		

**COMENTARIOS:** Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 0.16 N, el cual se acabó y se dejó la prueba de alcalinidad hasta ahí.  
El pH se midió con el aparato de Eh (mV)

**3 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 14 junio 2006	LOCALIDAD: Montealegre 03
TEMPERATURA AMBIENTE: 14°C	HORA DE INICIO: 15:00
DURACIÓN DEL MUESTREO: 77 min	No. DE MUESTRA: 3
CLAVES DEL APROV.: _____	TIPO DE APROV.: Arroyo _____
FOTO NÚMERO: MA3_1-MA3_5	USO DEL AGUA:
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2126835 N; 428267 E; Altitud: 3539 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____ mg/l
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____ μmhos/cm	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____ mg/l
			ALCALINIDAD:	_____ mg/l CaCO <sub>3</sub>
Tiempo	15:39	16:07		
Eh (mV)	9	-1		
PH	7.61	6.67		
CE (μ-S)	0.3	0.3		
Oxig (mg/l)	-	-		
T °C	13.2	12		

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: MA 3'  
MA 3' ac

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	2	1	1	1	1	2	2	4	10	10	20	20	20	20			
pH	5.74	5.26	4.24	4.22	4.18	3.73	3.70	3.66	3.32	3.18	3.02	2.89	2.80	2.74			

**COMENTARIOS:** Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N. Se usó aparato de conductividad y sensor del de Eh para medir el pH.

#### 4 ESTUDIO: Servicios Ambientales

##### DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

###### 1.- DATOS GENERALES

FECHA: 20 octubre 2006	LOCALIDAD: Santa Justina Ecatepec
TEMPERATURA AMBIENTE: 18°C	HORA DE INICIO: 10:33
DURACIÓN DEL MUESTREO: 72 min	No. DE MUESTRA: 4
CLAVES DEL APROV.: 241 INEGI	TIPO DE APROV.: Pozo PROF _____m
FOTO NÚMERO: 556-558	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2135721 N; 567889 E; Altitud: 2232 msnm

###### 2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____	mg/l				
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____	mg/l				
		_____	ALCALINIDAD:	_____	mg/l CaCO <sub>3</sub>				
		_____							
Tiempo	10:55	11:05	11:15	11:25	11:35				
Eh (mV)	37	32	32	29	27				
PH	6.38	6.42	6.39	6.39	6.35				
CE (µ-S)	990	1148	1134	1140	1141				
Oxig (mg/l)	0.3	1.1	0.7	0.5	0.3				
T °C	20	20.3	20.3	20.2	20.2				

###### 3.- FOTOS



###### 4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 16 Justina 2  
16 Justina 2 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	1	2	5	5	7	10	15	15	20	15	10	15	15	15
pH	6.55	6.66	6.77	6.75	6.69	6.60	6.46	6.26	5.77	4.97	3.16	2.63	2.46	2.33

**COMENTARIOS:** Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

**5 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 20 octubre 2006	LOCALIDAD: Panotla
TEMPERATURA AMBIENTE: 21°C	HORA DE INICIO: 12:45
DURACIÓN DEL MUESTREO: 55 min	No. DE MUESTRA: 5
CLAVES DEL APROV.: 237 INEGI	TIPO DE APROV.: Pozo PROF _____m
FOTO NÚMERO: 559-562	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2136804 N; 572245 E; Altitud: 2227 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____	mg/l				
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____	mg/l				
		_____	ALCALINIDAD:	_____	mg/l CaCO <sub>3</sub>				
Timepo	12:49	12:59	13:11	13:20	13:30				
Eh (mV)	42	33	24	24	25				
PH	6.84	6.93	6.87	6.84	6.83				
CE (µ-S)	659	600	675	600	704				
Oxig (mg/l)	3.5	3.8	3.6	3.5	3.7				
T °C	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1				

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: 237 Panotla (2)  
237 Panotla (2) AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	1	3	5	5	10	10	15	5	7	6	3	5	5	5	5
pH	6.95	7.02	7.00	6.84	6.56	6.36	5.94	5.80	5.21	3.67	3.29	2.84	2.67	2.53	2.45

**COMENTARIOS:** Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

## 6. ESTUDIO: Servicios Ambientales

### DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

#### 1.- DATOS GENERALES

FECHA: 21 octubre 2006	LOCALIDAD: Nativitas
TEMPERATURA AMBIENTE: 18°C	HORA DE INICIO: 11:35
DURACIÓN DEL MUESTREO: 57 min	No. DE MUESTRA: 6
CLAVES DEL APROV.: _____	TIPO DE APROV.: <u>Pozo</u> PROF _____ m
FOTO NÚMERO: 586 - 595	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2126260 N; 571262 E; Altitud: 2206 msnm

#### 2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____	mg/l				
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____	mg/l				
		_____	ALCALINIDAD:	_____	mg/l CaCO <sub>3</sub>				
		_____							
Tiempo	11:44	11:54	12:04	12:14	12:22				
Eh (mV)	160	165	155	156	157				
PH	7.34	7.36	7.38	7.34	7.40				
CE (µ-S)	815	813	819	823	828				
Oxig (mg/l)	2.6	2.6	2.2	2.5	2.4				
T °C	20.9	20.9	20.9	20.9	20.9				

#### 3.- FOTOS



#### 4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: Nativitas (3)  
Nativitas (3) AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	2	3	5	10	10	10	10	5	3	2	3	5	10	15
pH	7.32	7.41	7.26	6.89	6.60	6.30	5.84	3.63	3.09	2.96	2.89	2.72	2.55	2.38

**COMENTARIOS:** Este pozo no estaba en la base del INEGI de 1983.

Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

**7 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 21 octubre 2006	LOCALIDAD: Santa Ana Portales
TEMPERATURA AMBIENTE: 23°C	HORA DE INICIO: 13:15
DURACIÓN DEL MUESTREO: 62 min	No. DE MUESTRA: 7
CLAVES DEL APROV.: 288 INEGI	TIPO DE APROV.: Pozo PROF _____m
FOTO NÚMERO: 596	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2122795 N; 573532 E; Altitud: 2260 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____ mg/l					
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____ μmhos/cm	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____ mg/l					
			ALCALINIDAD:	_____ mg/l CaCO <sub>3</sub>					
Tiempo	13:25	13:35	13:45	13:55	14:07				
Eh (mV)	89	79	90	86	85				
PH	7.23	7.35	7.37	7.34	7.36				
CE (μ-S)	456	460	460	465	466				
Oxig (mg/l)	-00.1	-00.1	-00.1	-00.1	-00.1				
T °C	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7				

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: 208 Tetla  
208 Tetla AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>	18 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	2	5	5	5	10	3	3	3	5	3	3	3	3	3	5	5	5	10
pH	7.40	7.15	6.87	6.77	6.19	6.15	6.08	5.80	3.61	3.33	3.22	3.06	2.89	2.74	2.60	2.49	2.40	2.31

**COMENTARIOS:** Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

**8 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 22 octubre 2006	LOCALIDAD: San Matías Tlalancaleca
TEMPERATURA AMBIENTE: 18°C	HORA DE INICIO: 12:45
DURACIÓN DEL MUESTREO: 70 min	No. DE MUESTRA: 8
CLAVES DEL APROV.: <u>221 INEGI</u>	TIPO DE APROV.: <u>Manantial</u>
FOTO NÚMERO: 617-626	USO DEL AGUA: Antes se lavaba, existen lavaderos, ahora va el flujo directamente al río
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2139025 N; 554857 E; Altitud: 2321 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____ mg/l					
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____ µmhos/cm	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____ mg/l					
			ALCALINIDAD:	_____ mg/l CaCO <sub>3</sub>					
Tiempo	12:55	13:05	13:15	13:25	13:38	13:45			
Eh (mV)	126	122	120	112	117	113			
PH	7.34	7.40	7.41	7.42	7.44	7.39			
CE (µ-S)	658	659	659	658	658	657			
Oxig (mg/l)	0.24	-00.1	-00.1	1.5	0.2	0.3			
T °C	20.1	20	20	19.9	19.9	19.9			

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: 221 Tlalancalek  
221 Tlalancalek AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ SI
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ SI

ALCALINIDAD:	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª	16ª
SOLUCIÓN (ml)	2	2	5	5	5	8	10	5	5	3	3	3	3	5	8	10
pH	7.16	7.21	7.00	6.74	6.56	6.44	6.00	5.70	5.21	4.82	3.29	2.83	2.83	2.67	2.49	2.33

**COMENTARIOS:** Todas las muestras fueron filtradas.

Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.

Se encontró un cangrejo en el manantial.



**9 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 23 octubre 2006	LOCALIDAD: San Damian Texoloc
TEMPERATURA AMBIENTE: 17°C	HORA DE INICIO: 10:40
DURACIÓN DEL MUESTREO: 75 min	No. DE MUESTRA: 9
CLAVES DEL APROV.: _____	TIPO DE APROV: <u>Pozo</u> PROF _____m
FOTO NÚMERO: 657-659	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2131431 N; 575811 E; Altitud: 2267 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____	mg/l
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____	mg/l
		_____	ALCALINIDAD:	_____	mg/l CaCO <sub>3</sub>
		_____			
Tiempo	10:52	11:04	11:14	11:45	
Eh (mV)	114	109	107	97	
PH	7.47	7.76	7.80	7.81	
CE (µ-S)	384	385	386	395	
Oxig (mg/l)	6.9	6.8	6.1	5.7	
T °C	18.9	19	19	19.1	

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: DAM TEX 3  
DAM TEX 3 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	2	5	5	3	5	3	3	4	3	3	3	3	5	5	5
pH	7.70	7.25	6.37	6.32	5.92	5.28	5.28	3.45	3.18	2.95	2.86	2.72	2.59	2.46	2.31

**COMENTARIOS:** Se detuvo el pozo aproximadamente 30 minutos, posteriormente se realizó última lectura. Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N. Se puede hacer prueba de bombeo con previa solicitud a la Presidencia.

**10 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 23 octubre 2006	LOCALIDAD: San Matias Tlalancaleca
TEMPERATURA AMBIENTE: 20°C	HORA DE INICIO: 14:30
DURACIÓN DEL MUESTREO: 60 min	No. DE MUESTRA: 10
CLAVES DEL APROV.: 230 INEGI	TIPO DE APROV.: Pozo PROF _____m
FOTO NÚMERO: 660-664	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2136651 N; 551045 E; Altitud: 2416 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____ mg/l					
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____ μmhos/cm	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____ mg/l					
			ALCALINIDAD:	_____ mg/l CaCO <sub>3</sub>					
Tiempo	14:38	14:48	15:00	15:10	15:20				
Eh (mV)	81	80	70	71	73				
PH	6.96	7.07	7.25	7.34	7.34				
CE (μ-S)	175	175	175	175	174				
Oxig (mg/l)	7.2	7.0	7.0	7.1	8.1				
T °C	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9				

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: 230 M Tlal 2  
230 M Tlal 2 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	2	2	3	2	1	2	2	2	2	3	5	5	10		
pH	6.82	6.65	6.27	5.97	5.95	5.61	4.57	3.62	3.16	2.90	2.66	2.50	2.28		

**COMENTARIOS:** Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

**11 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 26 octubre 2006	LOCALIDAD: San Salvador El Verde
TEMPERATURA AMBIENTE: 20°C	HORA DE INICIO: 18:00
DURACIÓN DEL MUESTREO: 50 min	No. DE MUESTRA: 11
CLAVES DEL APROV.: <u>265 INEGI</u>	TIPO DE APROV.: <u>Pozo</u> PROF <u>          </u> m
FOTO NÚMERO: 666-670 pozo nuevo; 671-676 pozo antiguo	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: <u>                                  </u>	TIPO DE BOMBA: <u>          </u> DIÁMETRO <u>          </u>
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: <u>                                  </u> l/s	COORDENADAS: 2130579 N; 550838 E; Altitud: 2403 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	<u>                                  </u>	mg/l
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	<u>          </u> μmhos/cm	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	<u>                                  </u>	mg/l
			ALCALINIDAD:	<u>                                  </u>	mg/l CaCO <sub>3</sub>
Tiempo	18:10	18:20	18:30	18:40	
Eh (mV)	129	123	125	125	
PH	6.40	6.49	6.54	6.60	
CE (μ-S)	183	183	179	182	
Oxig (mg/l)	8.3	8.3	8.4	8.4	
T °C	11.9	12.0	11.9	12.0	

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: 265 Salvador V3  
265 Salvador V3 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	2	1	1	2	1	1	1	1	1						
pH	6.10	5.59	5.73	5.02	4.32	3.49	2.58	2.38	2.34						

**COMENTARIOS:** El pozo de la base del INEGI de 1983 al parecer corresponde con un pozo ubicado a 100 m. aprox. del actual pozo, el cual fue construido con una profundidad de 85 m hace año y medio debido a que el primero se seco (profundidad 120 m). Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

**12 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 27 octubre 2006	LOCALIDAD: El Salto del Agua (Río Frío)
TEMPERATURA AMBIENTE: 20°C	HORA DE INICIO: 12:30
DURACIÓN DEL MUESTREO: 52 min	No. DE MUESTRA: 12
CLAVES DEL APROV.: <u>265 INEGI</u>	TIPO DE APROV.: <u>Manantial</u>
FOTO NÚMERO: 677-689	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2141246 N; 532911 E; Altitud: 3103 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____	mg/l
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____	mg/l
		_____	ALCALINIDAD:	_____	mg/l CaCO <sub>3</sub>
Timepo	12:43	12:53	13:04	13:12	
Eh (mV)	77	72	63	64	
PH	7.13	7.16	7.30	7.39	
CE (µ-S)	87	87	87	87	
Oxig (mg/l)	7.2	7.0	6.9	7.0	
T °C	10.6	10.6	10.5	10.6	

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: 214 El Salto  
214 El Salto AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	1	1	1	1	1	1	1	2							
pH	5.99	2.71	5.32	4.49	3.85	2.66	2.50	2.37							

**COMENTARIOS:** Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

**13 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FISICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 27 octubre 2006	LOCALIDAD: San Juan Cuahutemoc
TEMPERATURA AMBIENTE: 11°C	HORA DE INICIO: 16:10
DURACIÓN DEL MUESTREO: 49 min	No. DE MUESTRA: 13
CLAVES DEL APROV.: 204 INEGI	TIPO DE APROV.: Manantial
FOTO NÚMERO: 690-694	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2144269 N; 538003 E; Altitud: 2900 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____ mg/l
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____ µmhos/cm	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____ mg/l
			ALCALINIDAD:	_____ mg/l CaCO <sub>3</sub>
Tiempo	16:30	16:39	16:49	
Eh (mV)	110	89	88	
PH	6.92	6.95	7.08	
CE (µ-S)	97	98	73	
Oxig (mg/l)	7.7	9.4	7.7	
T °C	12.7	12.4	12.5	

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: 22 Cuahutemoc  
22 Cuahutemoc AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

<b>ALCALINIDAD:</b>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	1	1	1	2	1	2	3	2	2	2					
pH	5.78	5.64	5.63	5.54	5.52	5.58	4.77	2.62	2.41	2.33					

**COMENTARIOS:** Lluvia, muestra tomada del canal debajo de la caja recolectora ya que ésta se encontraba cerrada con candado. Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N

14 ESTUDIO: Servicios Ambientales

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1.- DATOS GENERALES

FECHA: 28 octubre 2006	LOCALIDAD: Guadalupe Victoria
TEMPERATURA AMBIENTE: 17°C	HORA DE INICIO: 11:45
DURACIÓN DEL MUESTREO: 77 min	No. DE MUESTRA: 14
CLAVES DEL APROV.: 262 INEGI	TIPO DE APROV.: Pozo PROF _____m
FOTO NÚMERO: 698-701	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2131616 N; 564154 E; Altitud: 2232 msnm

2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO	_____ mg/l					
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	_____ μmhos/cm	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____ mg/l					
			ALCALINIDAD:	_____ mg/l CaCO <sub>3</sub>					
Tiempo	12:13	12:25	12:35	12:46	12:52				
Eh (mV)	97	96	92	91	90				
PH	6.45	6.48	6.48	6.50	6.48				
CE (μ-S)	556	548	547	548	547				
Oxig (mg/l)	-	-	-	-	-				
T °C	17.6	17.7	17.7	17.7	17.7				

3.- FOTOS



4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Clave de la muestra: 18 Guadalupe 2  
18 Guadalupe 2 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	1	1	1	2	1	3	3	2	2	2	2	2	2	2	
pH	6.51	6.64	6.83	6.40	6.64	6.48	6.02	5.81	5.56	5.52	5.23	4.95	2.75	2.75	

COMENTARIOS: El aparato de oxígeno disuelto no funcionó.  
Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N.  
Se puede hacer prueba de bombeo.

**15 ESTUDIO: Servicios Ambientales**

*DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

**1.- DATOS GENERALES**

FECHA: 28 octubre 2006	LOCALIDAD: San Antonio Atotonilco
TEMPERATURA AMBIENTE: 19°C	HORA DE INICIO: 14:30
DURACIÓN DEL MUESTREO: 74 min	No. DE MUESTRA: 15
CLAVES DEL APROV.: <u>206 INEGI</u>	TIPO DE APROV.: <u>Manantial</u>
FOTO NÚMERO: 702-704	USO DEL AGUA: Abastecimiento municipio
TIEMPO DE BOMBEO: _____	TIPO DE BOMBA: _____ DIÁMETRO _____
CAUDAL DE EXTRACCIÓN: _____ l/s	COORDENADAS: 2142542 N; 556022 E; Altitud: 2321 msnm

**2.- PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO**

PH	TEMPERATURA	°C	OXÍGENO DISUELTO		_____	mg/l
Eh	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA		_____	SÓLIDOS TOT DISUELTOS	_____	mg/l
	_____	_____	_____	ALCALINIDAD:	_____	mg/l CaCO <sub>3</sub>
	_____	_____	_____	_____	_____	_____
Tiempo	14:46	15:02	15:14	15:25	15:34	
Eh (mV)	-14	-18	-17	-21	-19	
PH	5.89	5.92	5.89	5.90	5.93	
CE (µ-S)	440	286	1033	1000	978	
Oxig (mg/l)	3.6	3.3	2.7	2.7	4.3	
T °C	23.6	23.6	23.6	23.5	23.7	

**3.- FOTOS**



**4.- INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Clave de la muestra: Atotonilco 3  
Atotonilco 3 AC

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
Aniones	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO
Metales	Polietileno	60 ml	HNO <sub>3</sub>	✓ SI
Isótopos	Polietileno	60 ml	NO	✓ NO

ALCALINIDAD:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>
SOLUCIÓN (ml)	1	2	8	10	10	15	20	10	5	10	8	5	2	2	3	3	5
pH	6.78	7.04	7.03	6.80	6.81	6.50	6.12	5.94	5.99	5.48	4.41	3.08	2.93	2.80	2.64	2.57	2.40

**COMENTARIOS:** Se observó claramente flujo vertical ascendente.

Se usaron 20 ml de muestra de agua para la prueba de alcalinidad y ácido sulfúrico con concentración de 1.6 N