

PLAN MAESTRO  
RIO MAGDALENA

**5 Hidrogeología**



## Introducción

Teniendo en cuenta la problemática ambiental ocasionada por el crecimiento poblacional y sus actividades económicas, se ha generado un aumento en el interés mundial en la conservación del entorno natural, con miras de alcanzar un desarrollo sustentable, lo que ha llevado a su vez a la creación de mecanismos que buscan alcanzar tal objetivo pero en la mayoría de las ocasiones se implementan programas que realmente no lo logran, o peor aún, afectan de manera indirecta e inadecuada la dinámica de la naturaleza.

Un caso específico, es la preocupación concerniente al agua, ya que se considera no va a ser suficiente para abastecer el continuo crecimiento de la población, así como que tampoco su calidad será apropiada para consumo humano. Esto se debe básicamente al mal manejo de diversas componentes ambientales y efecto de diferentes actividades antrópicas, tales como la agricultura, industria, expansión territorial, y sus desechos asociados. Todas guardan un punto en común el abasto de agua que necesitan para su buen desarrollo. Esto genera contaminación del agua subterránea y alteraciones en el funcionamiento del flujo subterráneo, lo que repercute finalmente en la cantidad y calidad del agua, tanto subterránea como superficial, ya que estas últimas se encuentran conectadas en el sistema hídrico presente en cualquier territorio. Esto, sin enfatizar los problemas ambientales relacionados con la extracción indiscriminada del agua tales como aquellas que se establecen de la interacción entre el agua subterránea y otras componentes del ambiente definiendo: *i)* impactos al agua subterránea por actividad humana en el ambiente vecino, y *ii)* alteraciones en el ambiente por cambios en el régimen del agua subterránea. La primera trata cambios en la cantidad de recarga, reducción de descarga en áreas de costa y cuerpos de agua continental, contaminación proveniente de sitios de disposición final de residuos, e inducción por extracción de agua con calidad no deseable. La segunda establece el incremento de la erosión al suelo, efectos por la importación de agua a una cuenca, abatimiento del nivel freático, compactación del esqueleto acuífero, así como la desaparición de freatofitas y daño a ecosistemas asociados.



De esta manera, se considera necesario realizar estudios hidrogeológicos previos, que permitan establecer el funcionamiento del agua subterránea y su relación existente con la mayor cantidad posible de componentes ambientales, para así formular programas que realmente beneficien y propicien la protección ambiental.

Un estudio hidrogeológico debe realizarse tanto a escala local como regional, con el fin de evaluar toda posible variable externa que esté involucrada en los diversos procesos del flujo subterráneo. Adicionalmente, para el caso de la Cuenca de México y el área de estudio, es necesario este análisis regional debido a la potencial conexión hídrica subterránea resultado de la distribución litológica existente a lo largo y ancho del Cinturón Volcánico Transmexicano, la cual permite una conectividad hidráulica subterránea. Sin embargo, se aprecia que los estudios existentes se limitan a la técnica del balance hídrico o tan sólo analizan un segmento del sistema (escala local), por lo que su interpretación final puede estar distante de la realidad.

Usualmente un estudio de este tipo requiere de varios años para coleccionar y procesar la información recabada. Sin embargo, para cubrir esta componente se realizaron mediciones en un período relativamente breve y, aunque sus resultados fueron los más tardados, se lograron en un período de 6 meses, con lo que solamente se cubre el período de estiaje



## 5.1 Sistemas de Flujo de Agua Subterránea

El agua subterránea debe ser considerada como un importante agente geológico, debido a que es la causa común de una gran variedad de procesos y fenómenos naturales, siendo la interacción agua-ambiente y la naturaleza jerárquica y sistematizada de las líneas de corriente (de flujo) las dos causas fundamentales responsables del comportamiento del agua subterránea como agente geológico.<sup>2</sup>

Asimismo, existen tres grandes componentes que controlan el régimen de agua subterránea, éstos son: topografía, litología y clima; donde la topografía determina la cantidad de energía y distribución zonal (movimiento) del agua en una cuenca determinada, la litología proporciona las zonas en las que el agua puede circular (de acuerdo con las propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas), así como la extensión y profundidad de recorrido de los sistemas de flujo, por lo que también determina la hidrogeoquímica del agua, por último, los factores climáticos determinan la magnitud y distribución espacial del agua suministrada a cada región.<sup>2</sup>

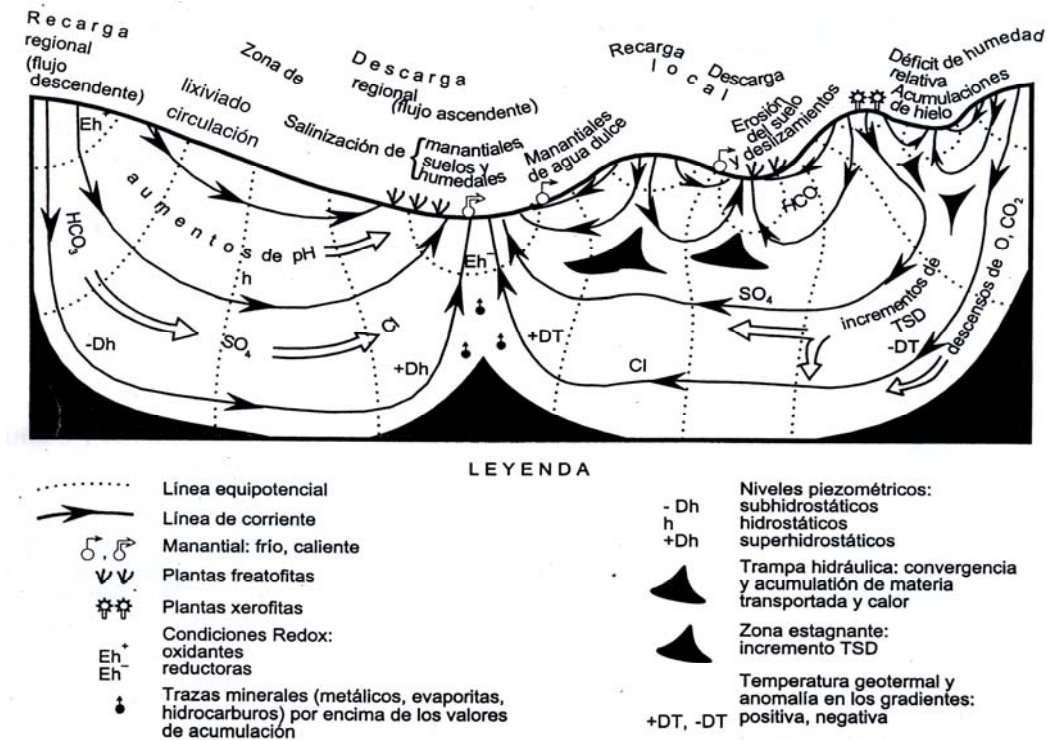
Los sistemas de flujo de agua subterránea se constituyen por líneas de flujo que se originan en una zona de recarga específica, extendiéndose a través de grandes regiones, terminando en una zona de descarga específica a una elevación topográfica más baja que aquella de recarga. A su vez, se diferencian tres tipos de sistema de flujo: regional, intermedio y local, con base en la profundidad y distancia de recorrido, que les otorga diferentes propiedades físico-químicas al agua, de acuerdo con el grado de interacción agua-roca. En la figura 1 se aprecia un esquema simplificado de la distribución del flujo subterráneo tanto en el plano horizontal como en el vertical, señalando zonas de recarga, tránsito y descarga, junto con los sistemas de flujo (local, intermedio y regional).

El movimiento de agua subterránea en cuencas con sistemas de flujo de gravedad tiene efectos ambientales,<sup>1</sup> que incluyen:

---

<sup>1</sup> Tóth, 2000, pp. 9-26.

**Figura 1**  
**SISTEMAS DE FLUJO. EFECTOS Y MANIFESTACIONES DEL FLUJO**  
**GOBERNADO POR GRAVEDAD EN UNA CUENCA REGIONAL (TÓTH, 2000)**



- carga hidráulica menor conforme aumenta la profundidad en la zona de recarga; se aprecia un efecto contrario en las zonas de descarga
- en las zonas de recarga se presentan bajas condiciones de humedad del suelo, en cambio en zonas de descarga se presentan manantiales
- se presentan cambios sistemáticos de los aniones en el agua de  $\text{HCO}_3^-$  a  $\text{SO}_4^{2-}$  y posteriormente a  $\text{Cl}^-$ , a lo largo de los sistemas de flujo y profundidad
- disolución química de materiales geológicos en la zona de recarga y un incremento del contenido de sales que puede originar suelo salino en la zona de descarga
- anomalías negativas y positivas de calor geotérmico y gradientes geotérmicos



- condiciones redox de óxido-reducción en áreas cercanas a la superficie de zonas de recarga y descarga, respectivamente
- tipo de vegetación acorde a las condiciones de humedad y nutrientes generados por los flujos de entrada o salida del agua subterránea
- incremento de riesgo del suelo, en zonas de descarga, a presentar erosión, arena movediza, hundimiento, entre otros,
- incremento del riesgo del suelo, en zonas de recarga, a deslizamiento de tierra
- acumulación de material mineral transportado por el agua subterránea, principalmente en regiones de convergencia de vías de flujo (trampas hidráulicas).

Como se indicó previamente, existen tres sistemas principales de flujo de agua subterránea que se establecen con la topografía y el referente geológico existente: local, intermedio y regional.<sup>2</sup>

### 5.1.1 Sistema de Flujo Local

Es el sistema más simple: la topografía juega un papel importante en la formación de este tipo de sistema, produciéndose diversos sistemas de flujo local en superficies con topografía abrupta, las zonas de recarga y descarga se sitúan en colinas y depresiones adyacentes, respectivamente, es decir, en el mismo valle. Este tipo de sistema se encuentra incluido en áreas de pocos kilómetros cuadrados, por lo que representa un sistema dinámico de corta duración, sensible a la precipitación y, comparativamente con los otros sistemas son 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 con la lluvia que se precipiten en diferente estación del año. De acuerdo con las condiciones morfológicas, topográficas, suelo, vegetación y composición química del agua subterránea presente en la cuenca

---

<sup>2</sup> J Tóth, 'A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada'. *J. of Geophysical Res.* 67 (11), 1962. pp. 4375-4387.



(manifestada como manantiales) sugiere que pertenece a sistemas de flujo de tipo local.

### **5.1.2 Sistema 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 al compararlo con el flujo local en:

- recorrido del agua subterránea de mayor dimensión
- movimiento vertical descendente de agua con mayor gradiente hidráulico
- 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, 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, en comparación con el agua de flujo local. Desde esta perspectiva no se reconocieron (descargas) de sistemas de flujo de tipo intermedio, esto se interpreta como que el área de estudio es potencialmente candidata a recargar sistemas de flujo de este tipo los cuales descargan más allá de su límite superficial (parte-aguas) implicando la necesidad de realizar estudios de mayor extensión regional.

### **5.1.3 Sistema de Flujo Regional**

Es aquel que circula a la mayor profundidad, 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 condiciones extremas físicas y químicas al compararlo con los otros sistemas mayor temperatura que los



sistemas local e intermedio, asimismo, la concentración de sales disueltas y sólidos totales disueltos es también la mayor, presenta menor contenido de oxígeno disuelto y su pH tiende a ser más alcalino. En lo relacionado con la identificación de descargas de sistemas de flujo regional, no fueron identificadas en el área de estudio, esto al igual que para los sistemas de flujo intermedio se interpreta como que el área de estudio es potencialmente candidata a recarga de un sistema de flujo regional, implicando la necesidad de realizar estudios de mayor extensión para definir dicha descarga en un pozo o manantial.

## 5.2 Nivel Freático y Manantiales

La superficie freática es la expresión observable en superficie (a través de pozos y manantiales) de un cuerpo de agua subterránea donde en cualquier punto la presión del agua es exactamente igual a la atmosférica (un punto traza de ello es el “espejo del agua” que se manifiesta por ejemplo en un pozo o en una noria y se denomina nivel freático). Como se indicó previamente la superficie freática es una manifestación del agua subterránea que puede ser indicadora del comportamiento del flujo subterráneo, y que permite la definición de zonas de recarga o descarga de agua subterránea. Así, una superficie freática es profunda en zonas de recarga y por el contrario, en aquellas de descarga, es somera.

Teniendo en cuenta el relieve montañoso del área de estudio por lo general la superficie freática se presenta profunda en las partes más elevadas topográficamente, así como somera en pequeñas depresiones y cambios de pendiente. Cuando la superficie freática entra en contacto con el suelo, aflora el agua subterránea a través de lo que se conoce como manantial, si el agua no fluye por un cauce puede incluso formar un cuerpo de agua (lago, humedal).

Por lo tanto, un manantial es la expresión del agua subterránea en superficie resultado del agua de lluvia que se infiltra al subsuelo alcanzando una unidad geológica con factibilidad acuífera (que permite el almacenamiento y transmisión del agua almacenada) y





después de cierto recorrido por ésta(s) sale al exterior. Cualquier descarga natural de agua en la superficie del suelo lo suficientemente grande como para constituir un pequeño riachuelo puede ser denominada “manantial”<sup>3</sup>. Los manantiales pueden brotar no solamente sobre la superficie del suelo continental sino también bajo la superficie de océanos, lagos y ríos.

Por su parte, aquella descarga que presenta un orden menor (que no causa una escorrentía evidente) se conoce como “zona de rezumo o zona de manantío”<sup>5</sup>. Así, para hacer referencia al agua que sale a superficie de manera difusa, en forma de goteo, a través de los poros del material geológico aflorante, se le conoce como “lloradero” en términos coloquiales. Asimismo, existen zonas donde el agua aflora a superficie pero no constituye un río o riachuelo, sino un cuerpo de agua estancado, posiblemente porque es un flujo de corta trayectoria donde su zona de recarga está relativamente cercana y en consecuencia es influenciado por la variación en la precipitación; a este tipo de descarga se le denomina en este trabajo como “encharcamiento”.

De acuerdo con la duración de la descarga en el tiempo se han considerado tres categorías de manantial<sup>4</sup>:

- 1) *manantial perenne*, aquel con una descarga continua.
- 2) *manantial temporal*, aquel que cambia su descarga a través de periodos determinados. Desde la perspectiva regional se distinguen de un geiser, ya que la descarga de éste es causada por la expansión periódica del vapor.
- 3) *manantial intermitente*, es aquel cuya descarga se ve interrumpida durante un cierto tiempo durante el año, por ejemplo, durante la estación de secas.

La Cuenca del Río Magdalena presenta numerosos manantiales como el de “Cieneguillas 2”, el cual es perenne (*foto 1*); una

---

<sup>3</sup> S Davis and RJM De Wiest, 'Hydrogeology'. 1966. Versión castellana de: Martínez F y Niñerola J. Ediciones Ariel. Barcelona.

<sup>4</sup> UNESCO/IAEA, 'Series on Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications'. Volume IV Groundwater: Saturated and Unsaturated Zone. *CD of Isotope hydrology, 2000, IAEA.*

importante zona de rezumo se tiene hacia lo que se conoce con el nombre de “Cieneguillas” y hacia el “3<sup>er</sup> Dinamo” (foto 2); por último, zonas de encharcamiento como las que se encuentran en el “Cerro Piedra del Agua”, aguas arriba del manantial Cerrerias, por lo general estas zonas se localizan principalmente hacia sitios elevados (foto 3). Lo anterior señala que el área de interés no únicamente actúa como zona de recarga, como lo indican diversas fuentes<sup>5</sup>, sino que también es una zona importante de descarga de flujos locales de agua subterránea. De allí lo relevante de estudiar la dinámica del flujo subterráneo, para determinar los diversos sistemas de flujo existentes en la región y realizar un óptimo manejo del elemento, de acuerdo con su comportamiento e interacción con las demás componentes ambientales, incluyendo las actividades del ser humano.

**Foto 1**

**EJEMPLO DE MANANTIAL**

Muestra Cieneguillas 2



---

<sup>5</sup> J Durazo and RN Farvolden, 'The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations'. *Journal of Hydrology*, 112, 1989, pp 171-190.

JF Mendoza García, 'La degradación de los recursos naturales en la Delegación Magdalena Contreras, Distrito Federal'. *Tesis lic.*, Facultad de Filosofía y Letras (Geografía), UNAM, 1994, México.

Con base en lo anterior no todas las descargas de agua subterránea son estrictamente manantiales y por lo tanto no todos son un ente de estricto aprovechamiento a otro que no sea el de proporcionar agua para un servicio a los ecosistemas. En casos podrán aportar individualmente un caudal de litros por minuto o litros por hora que es sólo de utilidad local relativa, además de que los lugareños reportan que muchos de ellos no fluyen todo el año (aspecto comprobado en visitas de campo realizadas para este estudio).

**Foto 2**

**EJEMPLO DE ZONA DE REZUMO O LLORADERO**

Zona circundante a la muestra 3<sup>er</sup> Dinamo





**Foto 3**

**EJEMPLO DE ZONA DE ENCHARCAMIENTO**

Cerro Piedra del Agua, aguas arriba de la muestra Cerrerias



En este sentido cuando se tiene una zona de rezumo o manantío, encharcamiento, éstos son reflejo de agua totalmente ligada con un sistema de flujo de agua subterránea local que sólo responde a infiltración local de agua de lluvia, es decir, agua que viajó en el subsuelo por distancias relativamente cortas de unos cientos de metros y a una profundidad de pocos metros de la superficie del suelo. Esto es, si existe un periodo largo de estiaje estos aportes de agua suspenden su recorrido.

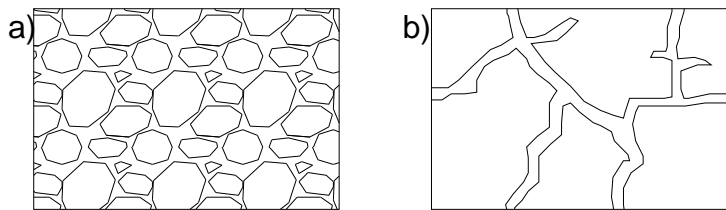
### 5.3 Medio Fracturado y Granular

Una vez que el agua de lluvia se ha infiltrado al subsuelo ésta puede viajar por diferente camino hasta llegar a su descarga. El viaje del agua implica un recorrido que estará gobernado por las condiciones del medio por donde circula y que depende básicamente de sus propiedades como fluido y de aquellas del medio por donde circula. En general existen dos tipos generales de medio: *i)* granular y *ii)* fracturado (*figura 2*).

**Figura 2**

#### MEDIOS POR EL QUE CIRCULA EL AGUA

a) medio granular o poroso; b) medio fracturado



Para el área de estudio, el primero corresponde con material volcánico de tipo piroclástico así como a depósito de material sedimentario, cuyos poros o intersticios permiten la acumulación de agua y su movimiento a través de la interconexión entre poros. Por su parte, el medio fracturado es aquel compuesto por las rocas ígneas que presentan fracturas, juntas y grietas las cuales favorecen el almacenamiento y circulación del agua subterránea. No obstante, existe un tercer medio que es el conjunto de los dos anteriores, es decir, un medio granular que a su vez presenta fracturas y grietas lo cual en su conjunto permite la presencia de procesos de almacenamiento y movimiento de agua en forma contrastante así como complementaria con los otros dos.

De acuerdo con la litología existente en el área de estudio, de manera cualitativa se puede afirmar que el rápido enfriamiento de las andesitas del Terciario y andesitas-basálticas del Cuaternario generó



grandes poros y fracturas que permiten la interconexión y transmisión del agua subterránea. De igual manera, las fallas profundas existentes por actividad tectónica reportada permiten la circulación de agua hasta 2,500 m de profundidad aproximadamente a través de las andesitas fracturadas del Plio-Cuaternario que afloran en las sierras de Las Cruces y en la Nevada-Río Frío<sup>6</sup>.

En general, los dos tipos de medio se presentan en la Cuenca de México, el fracturado en la mayoría de rocas volcánicas que afloran en superficie, hacia las partes más elevadas; y el granular que se localiza hacia la planicie de la misma, incorporando los depósitos lacustres, abanicos aluviales y material piroclástico. Al parecer, existe un control litológico de los sistemas de flujo en la cuenca, debido a que los manantiales parecen brotar donde se presenta el contacto entre unidades geológicas. Por sus características químicas, físicas y posición relativa estos manantiales son de tipo local, como más adelante se describe.

Teniendo en cuenta la localización de estos medios se aprecia que el fracturado se encuentra en la mayor altitud y que no es afectado por extracción directa de agua subterránea a través de pozos, como lo es el medio granular que se localiza en posición topográfica relativamente baja. Es evidente que por localizarse el material granular en la planicie, éste sea mayormente usado para obtener el agua requerida para los diversos usos de la población ahí asentada. Adicionalmente las propiedades físicas de la roca (dureza a ser perforada) y condiciones hidráulicas (nivel freático profundo) hacen más difícil (y se considera menos rentable) que se efectúe la perforación de pozos para extracción de agua en partes altas.

Asimismo, la extracción de agua del medio granular se realiza a través de numerosos pozos para abastecer la población de la Ciudad de México, incluyendo industria y agricultura, las cuales son dos actividades que más consumen agua. Este medio se ve fuertemente impactado por la urbanización, ya que es ahí donde en forma preferente se ubica la ciudad y zona metropolitana. No obstante,

---

<sup>6</sup> E Vazqu ez-S anchez, 'Modelo conceptual hidrológico y características hidr licas del ac ifero en explotación en la parte meridional de la Cuenca de México'. *Tesis de maestría*. Instituto de Geofísica, UNAM, 1995, México.





debido a la carencia de planes de ordenamiento territorial acordes con la vocación del territorio que incorpora una carencia de nuevos terrenos para edificar casas habitación, y que se asocia al aumento de población, se ha generado una invasión urbana de espacios localizados en altitud cada vez más elevada, cercano al Área Natural Protegida, situación preocupante ya que esta área guarda una relación directa con el buen funcionamiento del agua subterránea y naturaleza en general.



#### 5.4 Áreas de Recarga-Descarga

Para mayor comprensión se define brevemente a continuación algunos conceptos básicos de los sistemas de flujo.

- *Zona de recarga:* son lugares 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. Esta zona puede actuar de recarga un sistema de flujo local, intermedio o regional.
- *Zona 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; cualquier sistema posee una zona de este tipo.
- *Zona 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 (manantial, lago, flujo base de río, laguna costera) cada flujo (local, intermedio, regional) tendrá su zona de descarga.
- *Jerarquización de sistema:* se refiere a la definición de flujos de tipo local, intermedio y regional con sus componentes de recarga y descarga particular.

Asimismo, para facilitar la apreciación sobre el origen común de efectos y manifestaciones que son causados por el agua subterránea y modificados por los componentes ambientales, que a su vez presentan características particulares que definen las zonas de recarga y descarga, se agrupan éstos en seis tipos básicos expuestos en el cuadro 1.

**Cuadro 1**

**TIPOS DE MANIFESTACION, RESULTADO DE LA INTERACCIÓN  
AGUA SUBTERRÁNEA - AMBIENTE**

Características en las zonas de recarga y descarga

Tipo	Elementos Diferenciadores	Zonas de Recarga	Zonas de descarga
1) Hidrología e hidráulica	<p><b>Procesos hidrológicos importantes:</b> distribución espacial, sistemática de las componentes verticales del flujo y la profundidad de la zona sobre la que fluctúa el nivel freático anualmente.</p> <p>Contenidos de humedad.</p>	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
		Corriente superficial 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
		Temperatura fría del agua (aumento de 1°C/33 m)	Temperatura caliente del agua
2) Química y mineralogía	Cambios químicos.	pH usualmente ácido	pH usualmente básico
		Potencial redox (Eh) positivo	Potencial redox (Eh) negativo
		Disolución de minerales	Depósito y acumulación
		Oxígeno disuelto alto	Oxígeno disuelto bajo
		Agua de baja salinidad	Aumenta la salinidad
		$Cl^- < SO_4 < HCO_3$	$Cl^- > SO_4 > HCO_3$
3) Vegetación	<p>Humedad de suelo.</p> <p>Salinidad.</p>	Vegetación xerófila (o que depende de la lluvia)	Vegetación freatofita (o que toma agua del nivel freático), y halófila

Tipo	Elementos Diferenciadores	Zonas de Recarga	Zonas de descarga
			(adaptada a la salinidad)
4) Mecánica de suelos y rocas.	Variación en la presión intersticial  Tipo roca y material acuífero	Mayor presencia de procesos de remoción en masa influenciados por el agua subterránea  Suelo ácido	Suelos con humedad, licuefacción de arenas, corrimiento de tierra y coladas de lodo  Suelo alcalino
5) Geomorfología	Influencia en procesos geomorfológicos	Procesos kársticos en zonas de rocas carbonatadas Sin formación de geysers Procesos de erosión, en casos menor por infiltración del agua Procesos de remoción en masa Formación de valles	Procesos kársticos en zonas de rocas carbonatadas Formación de geysers Erosión localizada por manantial, formación de hidrolaccolitos en zonas frías Estabilidad de laderas De existir erosión es de tipo laminar.
6) Transporte y acumulación	Distribución del calor  Dinámica del transporte y acumulación de material	Reducción de temperatura y gradiente térmico  No hay formación de depósitos minerales o hidrocarburos  Sin presencia de procesos de eutrofización	Anomalía térmica positiva originando manantial termal Formación de depósitos minerales Acumulación de hidrocarburos y gas Eutrofización de cuerpos de agua.



## 5.5 Antecedentes Hidrogeológicos

La identificación de sistemas de flujo en una región determinada, así como la definición de zonas de recarga, tránsito y descarga, se realiza a partir de la observación de diversos indicadores en la superficie del terreno (tipo de suelo, vegetación, relieve, entre otros) de presencia de agua subterránea, análisis hidrogeoquímico de muestras de agua de manantiales y pozos, implicando que se debe considerar la mayor cantidad posible de componentes que controlan el funcionamiento del agua subterránea. El conocimiento de la dinámica del flujo subterráneo permite hacer una mejor gestión del agua, suelo y diversos componentes ambientales, así como, establecer áreas prioritarias de conservación.

El estudio de los sistemas de flujo se torna de gran importancia para la cuenca de México debido a que ésta se encuentra incluida en rocas de extensión regional (mucho más allá de los límites de la cuenca) a lo largo de las cuales estos flujos proponen la probada comunicación hídrica con cuencas vecinas. Así, como se verá al revisar las unidades geológicas que la conforman, éstas sugieren la inexistencia de unidades geológicas de baja permeabilidad que limiten el flujo lateral del agua subterránea.

Teniendo en cuenta que cualquier estudio hidrogeológico requiere de un análisis, tanto a escala regional como local, se realizó una búsqueda bibliográfica de información para la Cuenca de México y específicamente para la Delegación Magdalena Contreras.

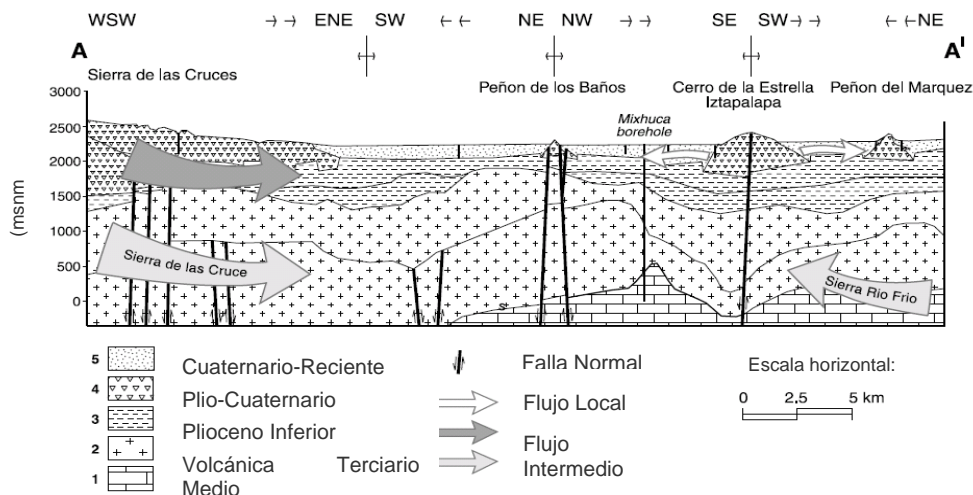
### 5.5.1 Cuenca de México

A pesar de la gran relevancia que tiene información acerca del agua subterránea, se aprecia que no existen los datos idóneos suficientes al respecto, en especial, de indicadores sobre la trayectoria de los sistemas de flujo existentes en la cuenca; sólo se encuentra en la literatura que las sierras de Chichinautzin, Las Cruces y Nevada corresponden con zonas de recarga de agua al subsuelo, suposición concebida por su ubicación topográfica (zonas elevadas) y presencia

de bosque principalmente, más no por el conocimiento logrado por estudios científicos que permitan corroborar tal afirmación.

Algunos estudios señalan que el *acuífero* de la Ciudad de México, es heterogéneo y anisótropo, que está constituido por depósitos de tipo granular y fracturado,<sup>7</sup> que se encuentra suprayacido por un *acuitardo* altamente compresible (formado por depósitos del Cuaternario-Reciente). Resultados de dichos estudios demuestran la existencia de los tres tipos de flujo para la Cuenca de México, estos son: local, intermedio y regional. A su vez, de datación con carbono-14 se infiere que la recarga del flujo regional ocurre fuera del límite superficial de la misma, a una distancia de aproximadamente 120–150 km a la redonda del parte-aguas sur de la cuenca. El perfil hidroestratigráfico se divide en cinco unidades<sup>8</sup> (ver figura 2), de la más antigua a la más reciente:

**Figura 2**  
**SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PARTE OESTE DE LA CUENCA DE MÉXICO**



**Fuente:** Edmunds et al, 2002.

<sup>7</sup> WM Edmunds, JJ Carrillo-Rivera, A Cardona 'Geochemical Evolution of Groundwater Beneath Mexico City'. *J. Hydrol.* Vol. 254, 2002, pp. 1-24.

Huizar-Alvarez R, Carrillo-Rivera JJ, Angeles-Serrano G, Hergt T, Cardona A 'Chemical Response to Groundwater Extraction Southeast of Mexico City'. *Hydrogeol. J.* Vol. 12, 2004, pp. 436-450.

<sup>8</sup> Edmunds et al, 2002, pp. 1-24.





*a) Calizas del Cretácico*

Ésta es la unidad más profunda identificada en la cuenca, está compuesta por caliza, arenisca y lutita, y aflora en el límite de la Cuenca de México al sur (estado de Morelos) y norte (Hidalgo). Su espesor supera los 1,500 m en el centro de la cuenca.<sup>9</sup> Por ser la unidad más antigua reconocida hasta el momento, es considerada como basamento del acuífero por diversos autores; no obstante, de acuerdo con sus características intrínsecas (cársticas) reportadas en pozos que la atravesaron, y procesos que se generan durante la interacción roca-agua, no debe ser interpretada como tal.

*b) Unidad volcánica del Terciario Medio*

Esta unidad está 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 las sierras del Tigre (Atizapán de Zaragoza), Tlaixpan (Texcoco), Cerro del Tepeyac así como en las elevaciones volcánicas de Barrientos. Estas rocas corresponden a una unidad acuífera perteneciente al acuífero de la Ciudad de México, a pesar de no conocerse su conductividad hidráulica, se sabe que se extraen de manera continua varios cientos de litros de agua por segundo del distrito de minero en la parte norte de la Cuenca de México, en Pachuca, Hgo.<sup>10</sup>

*c) Depósitos del Plioceno Inferior*

Esta unidad está compuesta por material lacustre y piroclástico, con un espesor total de 600 m. Estos depósitos afloran al norte de la cuenca (Huehuetoca, Taximay y Requena) desapareciendo hacia el sur bajo relleno aluvial (e) y lavas pliocénicas intermedias y ácidas de

---

<sup>9</sup> F Mooser, A Montiel, A Zúñiga Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla, Estratigrafía, Tectónica Regional y Aspectos Geotérmicos. Comisión Federal de Electricidad, 1997, p. 63. Tomado de Edmunds et al, 2002.

<sup>10</sup> JJ Carrillo-Rivera, A Cardona, T Hergt, R Huizar, M Kobe. "Marco Geológico, Hidrología Subterránea, Hidrogeoquímica, Análisis Geomorfológico y Registros de Temperatura en la Subcuenca del Río de las Avenidas". Reporte final, Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales - CAASIM, Hidalgo, México, 1999, p. 268.



las sierras de Tepotzotán y Guadalupe (d)<sup>11</sup>. A pesar de no existir información de propiedades hidráulicas de esta unidad, su litología, sugiere que ésta se comporte como un acuitardo.

*d) Secuencia del Plio-Cuaternario*

Esta unidad está 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, oriente de Cuernavaca) los cuales se encuentran interestratificadas con depósitos lacustre y aluvial contemporáneo. Su espesor total es de aproximadamente 1,000 m.

*e) Depósitos del Cuaternario-Reciente*

Esta unidad cubre totalmente la planicie de la cuenca, y 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 proporción, arcilla lacustre interestratificada con arena, limo y ocasionalmente grava, su espesor total se incrementa gradualmente desde el límite de la planicie hacia el Lago de Texcoco donde alcanza unos 300 m. Esta unidad forma el principal acuitardo de la cuenca, altamente compresible, de conductividad hidráulica de  $6 \times 10^{-6}$  a  $10^{-9}$  m/s<sup>12</sup> y coeficiente de almacenamiento de 0.05 – 0.95,<sup>13</sup> confinando así la parte local de las unidades acuíferas del acuífero de la Ciudad de México.

Por otro lado, un diferente estudio, realizó el cálculo de altitud de la precipitación que corresponde con posibles zonas de recarga para

---

<sup>11</sup> G Ángeles-Serrano *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, 2001.

<sup>12</sup> E Vázquez-Sánchez *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 DF, 1995.

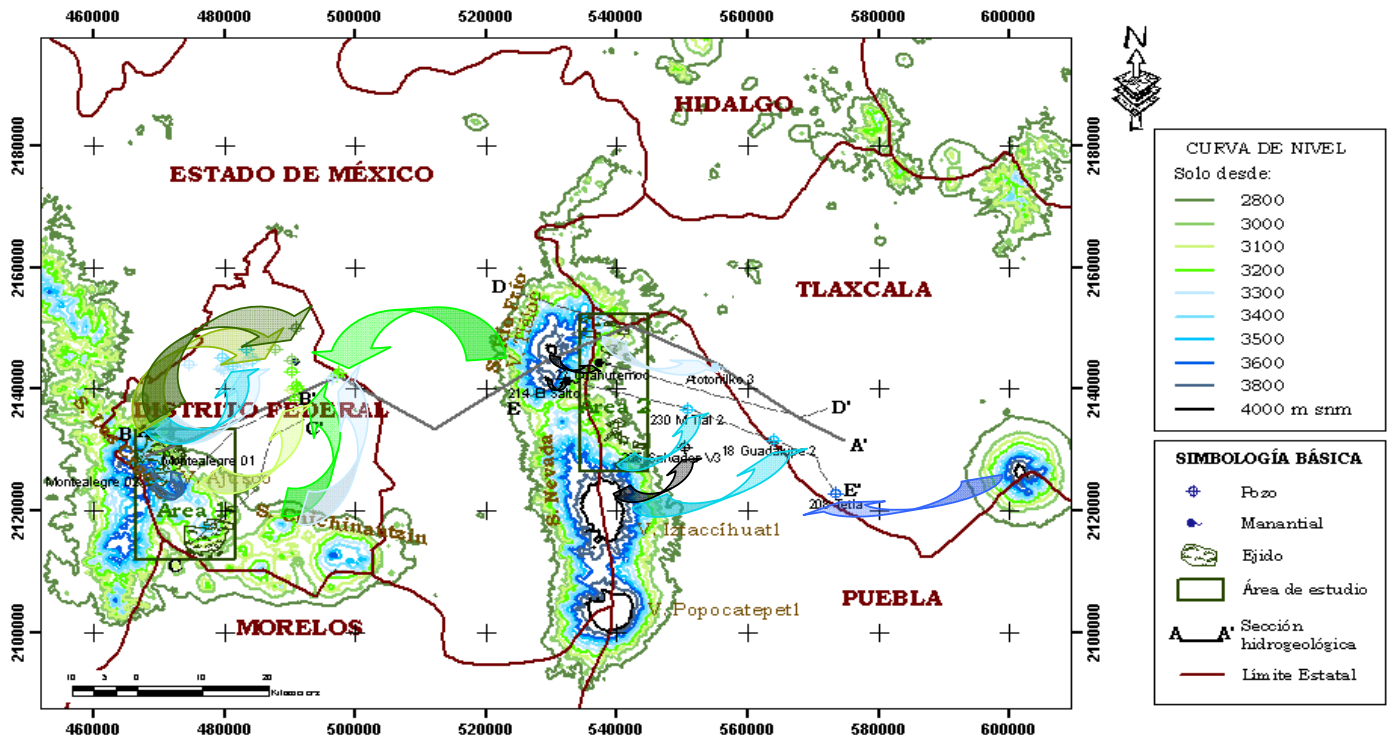
<sup>13</sup> D Rudolph *Studies of groundwater flow and solute transport in a clay aquitard near Mexico City*. Ph D Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1989, pp. 252. Tomado de Huizar *et al*, 2004.

las cuencas de México y Puebla-Tlaxcala, asociadas a su vez con su respectiva zona de descarga. Esto es, se estableció la jerarquía de los sistemas de flujo; corroborando científicamente que las sierras Chichinautzin, Las Cruces, Nevada y Río Frío se asocian con recarga al agua subterránea<sup>14</sup> (Ver figura 3).

**Figura 3**

**ALTITUD DE PRECIPITACIÓN (SEGÚN COLOR DE CURVA DE NIVEL) Y POSIBLES ZONAS DE RECARGA**

Fuente: Peñuela Arévalo, 2007.



La metodología llevada a cabo en tal estudio se basó en un análisis interdisciplinario, de información existente, que incluyó

<sup>14</sup> LA Peñuela Arévalo, Proceso de Recarga-Descarga de Agua Subterránea en Zonas Receptoras de Pago por Servicio Ambiental Hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de La Tierra, UNAM, 2007.



aspectos hidrogeoquímico, climático, edafológico, geomorfológico, geológico, entre otros, así como trabajo de campo para toma de muestras representativas de agua subterránea y su posterior análisis y evaluación hidrogeoquímica (incluyó uso de geotermómetros, e isótopos ambientales,  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ). La interpretación de todos los datos se integró acorde con la teoría de los sistemas de flujo. Tal estudio permitió establecer posibles zonas de recarga y su relación con la zona de descarga asociada, factor de suma importancia para lograr proponer un manejo adecuado del agua subterránea, con base en el conocimiento de su dinámica y comprobar esto por medio de la interdependencia que existe entre los flujos de agua subterránea con las componentes ambientales restantes.

Los resultados obtenidos en dicho estudio son de carácter regional, sin embargo, constituye una base metodológica a seguir, por lo que se considera viable su aplicación a escala local, en este caso, para lograr establecer un funcionamiento inicial del flujo subterráneo existente en la Delegación Magdalena Contreras.

### **5.5.2 Delegación Magdalena Contreras**

Es alarmante la situación que se presenta en muchas partes de la delegación con respecto al agua, y en especial, en relación con el agua subterránea. Existen estudios ambientales sobre la delegación donde en muchas ocasiones no se considera el flujo subterráneo como factor a estudiar, sobresale la carencia de análisis hidrogeológico y, como se menciona con anterioridad, existe una limitación en el territorio nacional, donde los estudios de agua subterránea se limitan sólo al uso del balance hídrico.

En el 2000, se realizó un estudio por parte del Gobierno del Distrito Federal, del cual, uno de los objetivos principales consistió en la búsqueda de *“un manejo racional de los recursos hídricos, incluyendo un aprovechamiento integral del agua de lluvia y la recarga de acuíferos del Valle de México”*, teniendo en cuenta que *“las montañas del sur del DF (algunas pertenecientes a la Delegación Magdalena Contreras) permiten la infiltración de agua a los*



*acuíferos*".<sup>15</sup> No obstante, en dicho estudio sólo se considera como prioridad la recarga al agua subterránea sin realmente conocer la trayectoria del flujo subterráneo, es decir, se pretende contribuir con la infiltración de agua pero no se sabe qué zona específica es la que se ve potencialmente favorecida. Puede ser que la recarga generada, descargue su agua en una cuenca hidrográfica vecina, pero se desconoce cuál será la beneficiada, por lo que los beneficiados directos son ajenos en todo sentido, a la cuenca donde se realizan las actividades de conservación.

En dicho estudio se realiza un análisis hidroquímico, basado en datos químicos existentes, de pozos pertenecientes a los diferentes sistemas de abastecimiento que maneja y controla la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del Gobierno del Distrito Federal. Se considera que la interpretación hidrogeoquímica obtenida es relativamente limitada, ya que no se esclarece si se realizaron mediciones de campo, representativas de condiciones originales del agua subterránea, así sus resultados corresponden más con un estudio de calidad de agua que con una interpretación de la dinámica existente.

Las mediciones en el agua original que son de gran relevancia para interpretación en estudios hidrogeológicos son: i) temperatura, ii) conductividad eléctrica, iii) potencial redox; iv) oxígeno disuelto, y v) alcalinidad. En la página contigua, se presentan las principales características químicas de la denominada "micro-cuenca Presa Anzaldo", correspondiente a la Delegación Magdalena Contreras, del estudio del Gobierno del Distrito Federal.

En tal estudio, se señala también la creciente expansión urbana, que afecta procesos naturales, ecosistemas y el funcionamiento del ambiente. Se establece que para el caso de Magdalena Contreras, se tiene que la comunidad se encuentra dividida en varios grupos, lo que facilita la venta ilegal del suelo. Igualmente, se tiene que el valor del terreno para su utilización como suelo urbano es significativamente mayor que su valor para uso en actividades

---

<sup>15</sup> Gobierno del Distrito Federal – GDF, *Estudio para la Recarga del Acuífero en el Suelo de Conservación del Distrito Federal*. GDF. Consorcio OPMAC (Overseas Project Management Consultants, Ltd.), Junio de 2000.



rurales. Por tales razones, es importante darle a los terrenos situados en el Suelo de Conservación, un valor de uso mayor al valor de venta si se desea conservar el beneficio ambiental que esas zonas usualmente con bosque generan a la ciudad.<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> GDF, 2000, p. 147.



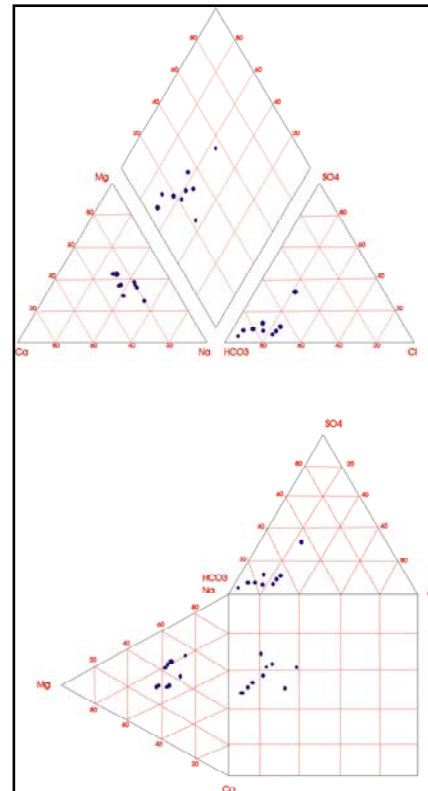
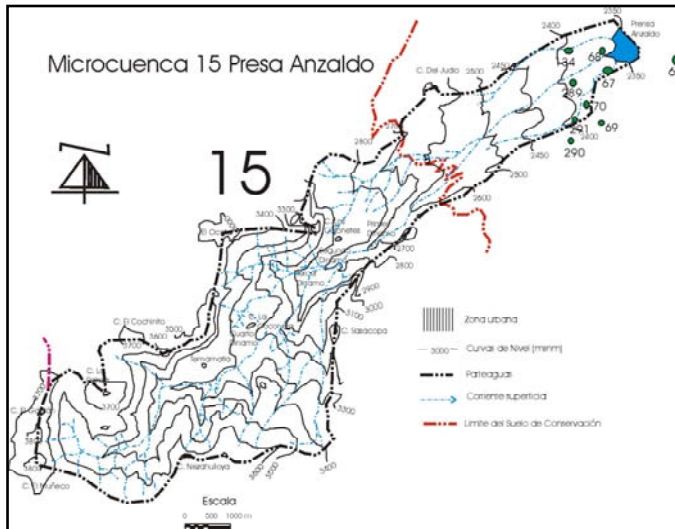
### MICROCUCNA PRESA ANZALDO

	Color	Cond. Eléctrica	pH	Sólidos totales disueltos	Alcalinidad	Cl	Dureza total	F	N. Amoniacal	N. Proteico	Oxígeno consumido en medio ácido
Norma	20	1500	8.5	1000	400	250	500	1.5	0.5	0.1	3
Promedio	7.8	291	7.6	239	110.4	18.0	94.00	0.18	0.09	0.09	0.23

	SO4	As	Cd *	Ca	Zn	Cu	Cr	Fe	Mn	Hg	Pb *
Norma	400	0.05	0.005	200	5	2	0.05	0.3	0.15	0.001	0.025
Promedio	15.50	0.00082	0.00572	14.30	0.04491	0.01092	0.02656	0.06760	0.01968	0.00024	0.04882

	K	Se	Na	Mg	Cuenta estandar	Col. totales	Col. fecales
Norma	100	0.05	200	125	6500	2	0
Promedio	4.59	0.00067	28.65	13.91	913	11	0

\* Se encuentran fuera de la norma debido a los límites de detección de las técnicas empleadas



La información de la calidad química del agua subterránea en esta microcuenca se obtuvo a partir de los resultados reportados para 9 pozos profundos ubicados preferentemente en la porción norte que corresponde a la región de menor elevación topográfica. Los pozos en esta región atraviesan la unidad geológica denominada como Formación Tarango, así como en algunas ocasiones a las rocas volcánicas andesíticas que afloran ampliamente en la Sierra de las Cruces. Desde el punto de vista de calidad física y química el promedio del agua subterránea de esta microcuenca presenta valores menores a los límites máximos establecidos para uso de agua potable. Únicamente se detecta que la componente bacteriológica presenta valores mayores a los permisibles en el caso de los coliformes totales. Considerando la composición química del agua que se reporta en los diagramas triangulares, se identifica que predomina el agua subterránea de tipo bicarbonatada-mixta (134, 289, 290, 291, 68, 69, 70), aunque también existe agua bicarbonatada-sódica (67) y mixta-mixta (66). Los valores de cloruro (18 mg/l) en promedio y la salinidad (238.8 mg/l) sugieren que se trata de agua subterránea con un mayor recorrido en el subsuelo que, por ejemplo, los manantiales de la microcuenca 12 (Monte Alegre), por lo que seguramente tiene su zona de recarga en las partes elevadas de la microcuenca.

Fuente: GDF, 2000.

## 5.6 Principales resultados analíticos

### 5.6.1. Análisis hidrogeoquímico

El análisis hidrogeoquímico consiste en el estudio de los datos fisicoquímicos obtenidos de campo, así como de sus resultados analíticos de laboratorio, cuyo producto permite la definición de distintos grupos de agua presentes en el área de estudio, que a su vez llevan a la identificación de flujos de agua subterránea. En el anexo 4 se aprecia una tabla que muestra los resultados analíticos fisicoquímicos tanto de los laboratorios como de parámetros medidos en campo, no obstante, el *cuadro 1* muestra un resumen de los principales y más útiles valores analíticos y físicos.

**Cuadro 1**  
**RESUMEN DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS ANALÍTICOS**  
**FISICOQUÍMICOS**

Nombre	pH	T agua °C	STD mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	SO4 mg/L	NO3 (as N) mg/L	F mg/L	Error %
Cieneguillas 1	7.08	7.7	63.7	3.1	1.61	3.47	1.61	15.03	0.62	4.13	0.02	0.03	15.6
Cieneguillas 2	7.54	9.3	65.8	4.3	2.89	4.16	1.98	45.68	0.55	2.42			-8.7
Cerrerías	7.09	5.8	65.3	2.3	1.5	2.84	4.27	30.26	1.46	6.68	0.22	0.05	-17.9
Piedra del Agua	6.88	8.1	37.8	2.7	1.33	2.53	0.5	16.59	0.35	5.17	0.03	0.03	-2.9
Cañada de Cuervos	7.20	7.1	43.2	4	1.26	3.87	0.55	23.10	0.75	5.17	0.02		-2.2
Cieneguillas	6.96	12.8	66.4	3.7	2.05	4.04	1.45	37.54	0.43	4.14		0.03	-11.5
3er Dinamo	6.22	12.4	93.3	5.5	4.03	5.61	1.86	28.88	1.13	7.17		0.05	15.7
La Escondida	6.49	10.4	89.4	7.6	3.9	4.91	1.89	33.35	1.2	10.3	0.78	0.05	9.5
San Miguel	7.03	11.5	90.8	6.5	4.87	4.9	1.77	40.43	0.88	6.47	0.25	0.03	9
Dinamos 1	7.03	9.1	98.6	7	3.86	4.94	1.67	28.50	0.95	9.41	0.59	0.04	14.6
Dinamos 2	6.72	10.4	120.5	6.2	3.95	6.11	2.96	29.28	1.2	14.9	0.03	0.09	8.5
Montealegre	7.73	7.2	90.5	4.15	2.22	4.575	3.56	24.60	0.98	8.03	0.19	0.08	6.4

Cabe destacar que se realizó una segunda prueba de alcalinidad en el laboratorio LAFQA del Instituto de Geografía de la UNAM para comprobar los datos medidos en campo teniendo en cuenta el elevado valor de los porcentajes de error que se obtuvieron para diversas muestras (*anexo 2*), es importante señalar que los



porcentajes de error que se muestran en las tablas del presente estudio son aquellos resultados de menor valor.

A pesar del esfuerzo por obtener errores de menor magnitud y realizar el cálculo de bicarbonatos dos veces se aprecia que existen cinco (5) muestras cuyo error es mayor de 10%, lo cual puede deberse a que la muestra corresponde con agua bastante diluida y por ende la determinación de los elementos se hace más compleja. No obstante, se considera que los resultados son válidos de acuerdo con los análisis hidroquímicos realizados en el presente estudio y permiten obtener una interpretación inicial del flujo subterráneo. Sin embargo, es importante resaltar la importancia que tiene la ejecución de estudios hidrogeológicos continuos en espacio y tiempo.

Debido a la baja concentración de elementos y compuestos químicos en el agua, ésta presenta una excelente calidad para el consumo humano y distintas actividades económicas, por lo que se debe trabajar en conjunto (gobierno – sociedad – industria) para lograr mantener y proteger dicha calidad.

En general, las muestras de agua subterránea tomadas corresponden con agua bicarbonatada desde el punto de vista de los aniones (*figura 1*), que de acuerdo con la Teoría de los sistemas de flujo (Tóth, 2000) representan flujos tipo local. Por su parte, con respecto a los cationes el agua es de tipo mixto, indicando que no prevalece el calcio, al magnesio ni al sodio.

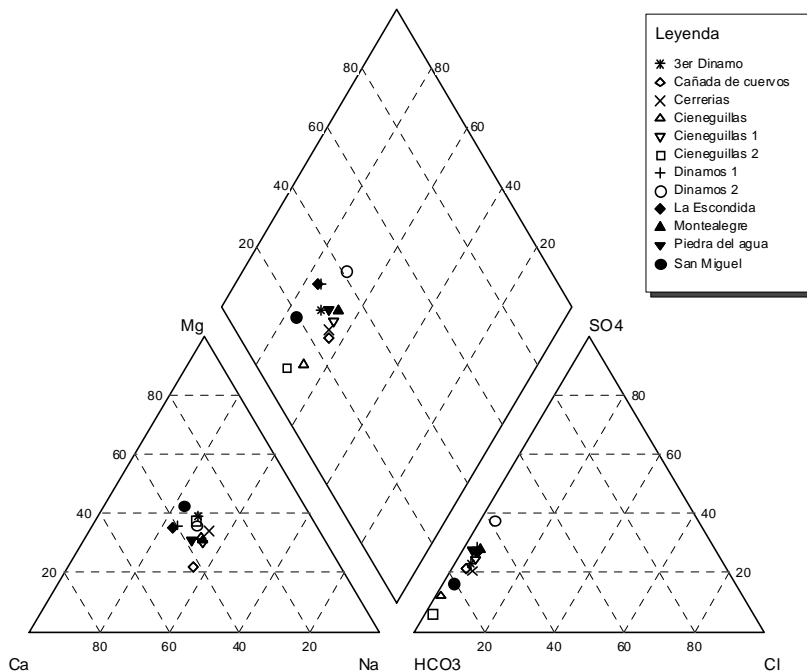
La definición de grupos de agua se basó en el análisis de diferentes elementos y compuestos químicos de las muestras de agua, a través de la interpretación de los diagramas Piper (*figura 1*), Schoeller (*figura 2*) y la relación entre diversos elementos y compuestos químicos (*figura 3*); figuras todas obtenidas a través del uso del software AQUACHEM 3.70. En total, se diferenciaron tres grupos de agua (*cuadro 2*), estos son:

**GRUPO I**; flujo local, muestras Cerrerías y Piedra del Agua. Agua rica en bicarbonato, con temperatura de 6 a 8°C, concentración más baja de sodio y cloruro con respecto a los demás grupos, no obstante la muestra Cerrerías presenta un elevado valor de cloruro que puede estar asociado con alguna actividad antrópica.

**GRUPO II;** Igualmente esta agua representa un flujo local, con mayor concentración de sodio, cloruro y litio.

**GRUPO III;** Al igual que los dos grupos anteriores, esta agua se considera pertenece a un flujo local, la diferencia con los grupos I y II es la cantidad adicional presente en el agua de sodio y cloruro ya que la temperatura es similar con el grupo II especialmente.

**Figura 1**  
DIAGRAMA PIPER



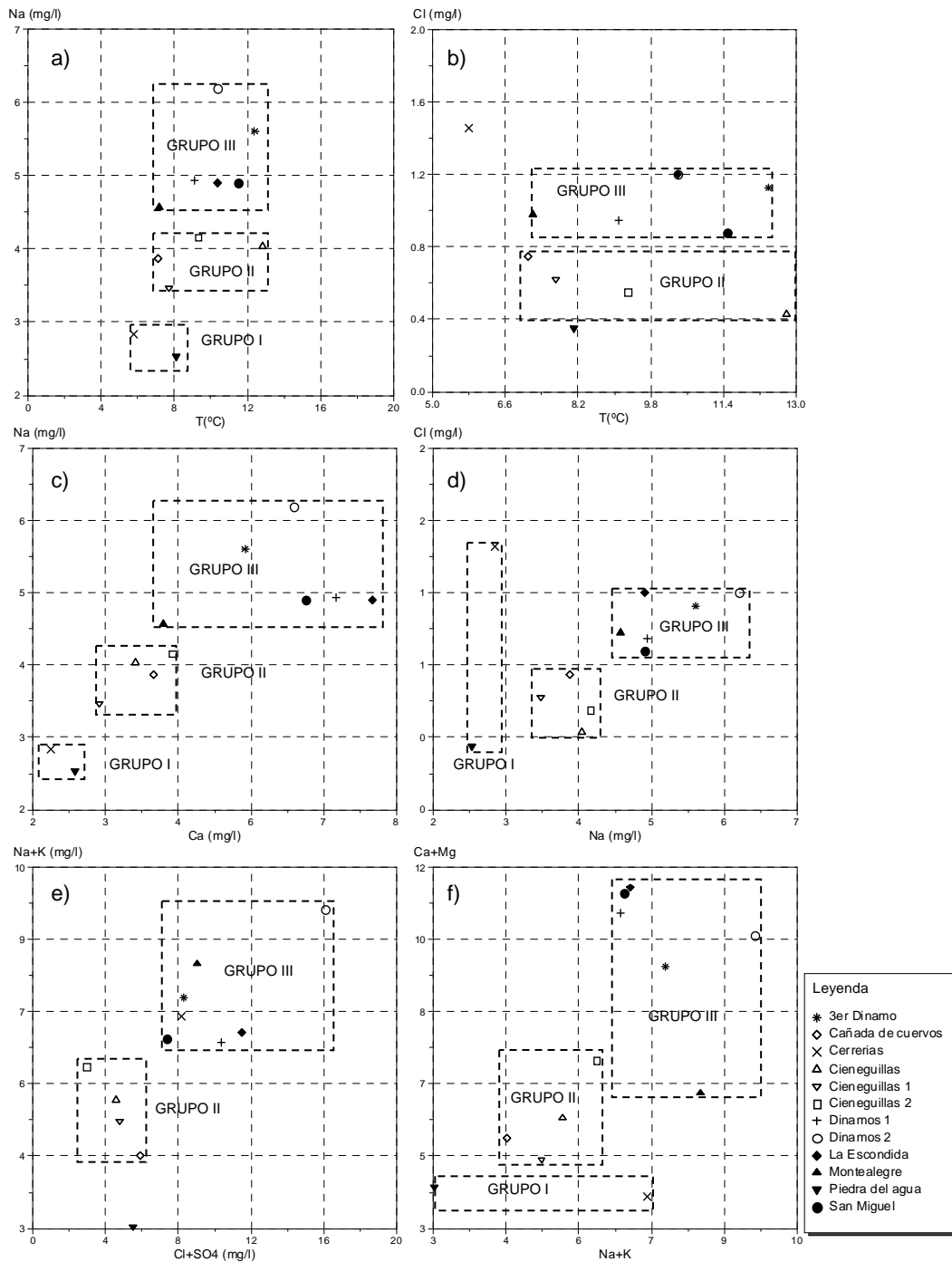
**Cuadro 2**

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS POR GRUPO DE AGUA

GRUPO	T agua (°C)	Na (mg/L)	Li (mg/L)	Ca (mg/L)	HCO3 (mg/L)	Cl (mg/L)
I	5.8 - 8.1	2.5 – 2.8	<0.001	2.3 – 2.7	16.6 – 30.3	0.3 – 1.5
II	7.1 – 12.8	3.5 – 4.2	<0.001 – 0.004	3.1 – 4.3	15.0 – 45.7	0.4 – 0.7
III	7.2 – 12.4	4.6 – 6.2	<0.001 – 0.005	4.1 – 7.6	24.6 – 40.4	0.9 – 1.2

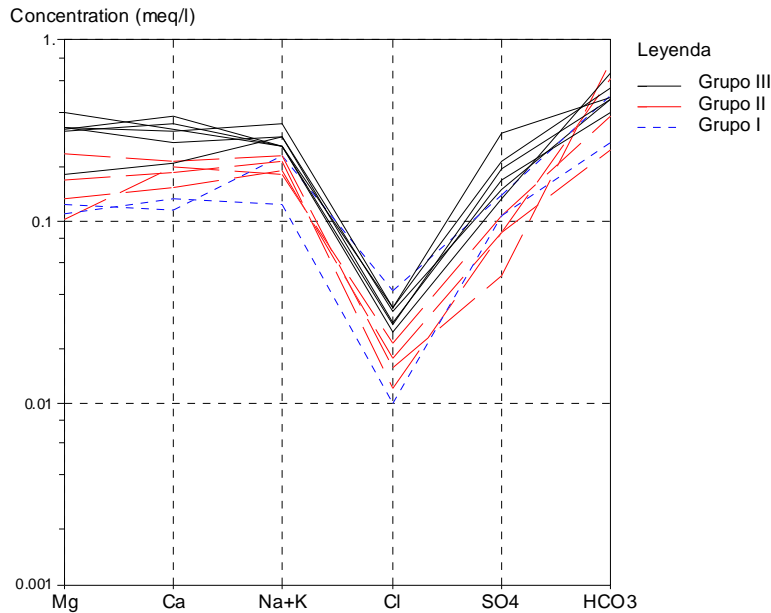
**Figura 2**

RELACIÓN a) TEMPERATURA DEL AGUA Y NA; b) TEMPERATURA DEL AGUA Y CL; c) CA Y NA; d) NA Y CL; e) CL+SO4 Y NA+K; f) NA+K Y CA+MG  
(Temperatura en °C, iones en mg/L)





**Figura 3**  
**DIAGRAMA SCHOELLER**

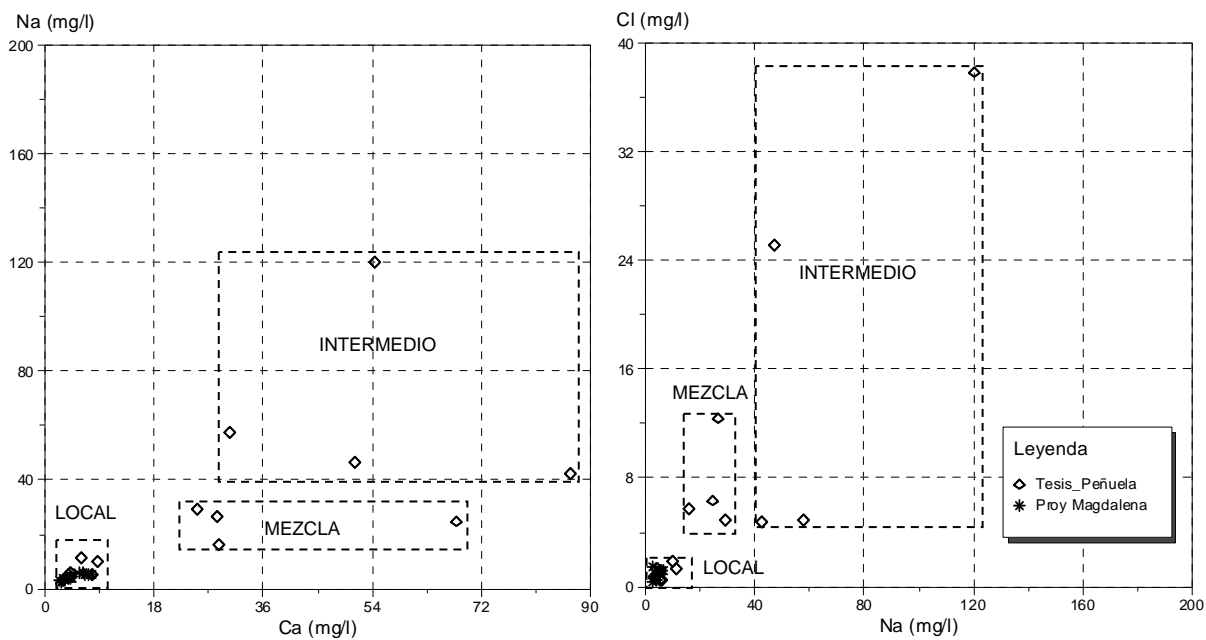


ANÁLISIS COMPARATIVO REGIONAL, SUR CUENCA DE MÉXICO

Teniendo en cuenta que todo estudio hidrogeológico debe incorporar un análisis regional que permita un mayor entendimiento del funcionamiento del sistema, se realizó una comparación entre los datos obtenidos en el presente estudio y aquellos resultados del trabajo de Peñuela (2007) para la porción sur de la Cuenca de México, abarcando las sierras Nevada y Las Cruces, donde se ratifica que las muestras de agua de manantial correspondientes a la Delegación Magdalena-Contreras están asociadas con sistemas de flujo local (*figura 4*). Sin embargo, esto no significa que en la delegación no existan sistemas intermedios o regionales, sino que la escala que se trabajó no permite apreciar el funcionamiento del flujo subterráneo en todo su sistema, simplemente en la delegación sale a superficie el agua de tipo local pero, de acuerdo con lo que se ha publicado en diversos estudios, el territorio sirve como zona de recarga de agua tipo intermedio principalmente y regional, éste último

más difícil de encontrar sus manifestaciones en forma natural en superficie por la falta de interés en inversión para investigación.

**Figura 4**  
COMPARACIÓN ENTRE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA PARTE SUR DE LA CUENCA DE MÉXICO



### 5.6.2 Análisis Isotópico

Los isótopos ambientales estables son una herramienta útil en estudios hidrogeoquímicos debido a que las relaciones entre los contenidos de isótopos estables pesados de oxígeno ( $^{18}\text{O}$ ) (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 agua-roca. Por esta razón, los isótopos son considerados trazadores del origen del agua subterránea, que permiten identificar procesos de recarga y reacciones geoquímicas, entre otros.

Sin embargo, existen casos donde la concentración de los isótopos pesados del agua subterránea cambia como consecuencia de procesos de evaporación y condensación del agua. Básicamente,

la teoría de los isótopos consiste en que el agua, en forma de vapor, en las nubes va perdiendo concentración en isótopos pesados a lo largo de su trayecto hacia el continente y a su vez, el agua va adquiriendo características propias del ambiente circundante.

Las muestras de agua tomadas en campo fueron enviadas al laboratorio del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona, teniendo en cuenta su calidad analítica y bajo costo con respecto a los existentes en México. De allí se obtienen las concentraciones relativas de isótopos estables ambientales ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) (Cuadro 3), con una precisión analítica en sus resultados de:  $\delta^2\text{H} \text{‰} = 0.9$  y  $\delta^{18}\text{O} \text{‰} = 0.08$ .

**Cuadro 3**

**CONCENTRACIÓN ISOTÓPICA DE LAS MUESTRAS DE AGUA  
TOMADAS EN CAMPO**

ID	Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰	Exceso deuterio ‰
1	Cieneguillas 1	-10.9	-73	15
2	Cieneguillas 2	-10.9	-73	14
3	Cerrerias	-10.0	-65	15
4	Piedra del Agua	-10.5	-70	14
5	Cañada de Cuervos	-10.8	-72	14
6	Cieneguillas	-10.9	-72	15
7	3er Dinamo	-10.7	-69	17
8	La Escondida	-10.6	-68	17
9	San Miguel	-10.9	-71	16
10	Dinamos 1	-10.8	-73	13
11	Dinamos 2	-10.7	-72	14
12	Montealegre	-11.0	-74	13

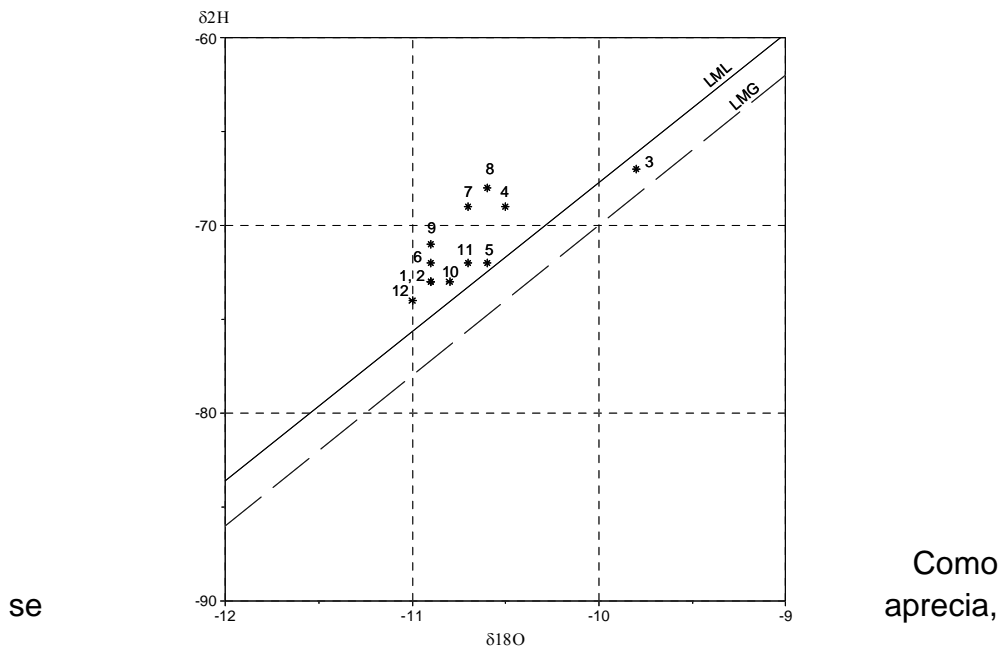
Asimismo, en el cuadro 3 se incorpora para cada muestra el valor calculado de exceso de deuterio, el cual se obtuvo a través de la ecuación  $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$  (Lachniet et al., 2002). Según los resultados, se aprecia que todas las muestras presentan un exceso de deuterio mayor al +10‰ típico de la línea meteórica global. El exceso de deuterio puede deberse a efectos de altitud o reciclaje de

humedad, esto se refiere a evaporación y re-precipitación del agua, sin embargo, debido a las limitantes del presente estudio (tiempo y presupuesto) no se pudo analizar el origen del exceso y sus efectos en el funcionamiento del agua subterránea, no obstante se presenta un análisis isotópico como contribución al conocimiento del flujo subterráneo, recordando nuevamente la importancia que tiene la continuación de este tipo de estudios para un mayor entendimiento del sistema.

De acuerdo con la distribución isotópica de las muestras (Figura 5), se aprecia que la mayoría se localiza hacia la izquierda de la línea meteórica local (LML:  $\delta^2\text{H} = 7.95 \delta^{18}\text{O} + 11.77$ ) determinada anteriormente para el área de la Sierra de Las Cruces<sup>17</sup>. Por su parte, la muestra Cerrerias presenta una distribución diferente del grupo, localizándose entre las líneas meteórica local y global (LMG:  $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ )<sup>18</sup>, aspecto que se encuentra en verificación.

**Figura 5**

**DISTRIBUCIÓN ISOTÓPICA DE LAS MUESTRAS DEL PRESENTE ESTUDIO**



<sup>17</sup> A Cortés and RN Farvolden, 'Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de Las Cruces, Mexico. *Journal of Hydrology*, 107, 1989, pp 147-153.

<sup>18</sup> H Craig, 'Isotopic variations in meteoric water'. *Science*, 133, 1961, pp 1702-3.

los valores isotópicos son muy cercanos, lo que indica que las zonas de recarga deben tener una altitud similar. El promedio calculado para los isótopos del presente estudio es  $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle = -10.68$  y  $\langle \delta^2\text{H} \rangle = -71.08$ , por su parte, los datos promedio obtenidos de otro estudio<sup>19</sup> ( $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle = -10.69$  y  $\langle \delta^2\text{H} \rangle = -73$ ) son valores muy cercanos a los obtenidos en el presente estudio, por lo que igualmente se puede atribuir una altitud y localización de zonas de recarga similar.

### 5.6.3 Cálculo de la Altitud de Precipitación

Debido a 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 parte montañosa de la parte central de México, la cual depende únicamente de la elevación topográfica de la zona donde se produce la precipitación, se determinó el efecto de altitud para el centro de México como una constante regional de  $-2.13\text{‰}$  por kilómetro de elevación y una ecuación que permite asignar un valor de concentración isotópica a la precipitación de determinado lugar<sup>20</sup>, cuando ésta es relativamente reciente, 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

Los datos de la *figura 5* sugieren que las muestras de agua tomadas en campo no sufrieron alteración importante del contenido isotópico por evaporación, por lo que esos valores representan las propiedades del agua de precipitación, es decir  $\delta^{18}\text{O}^*$ ; haciendo posible obtener la altitud del sitio que recibe la precipitación y

<sup>19</sup> A Cortés, RD Arizabalo y R Rocha, 'Estudio hidrogeoquímico isotópico de manantiales en la Cuenca de México'. *Geofísica Internacional*, 28 (2), 1989, pp 265-282.

<sup>20</sup> A Cortés y J Durazo, 'Tendencia del oxígeno-18 en la precipitación del centro de México'. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI (2), 2001, pp 93-102.



potenciales zonas de recarga para cada aprovechamiento, reemplazando simplemente el valor de  $\delta^{18}\text{O}^*$  en la ecuación 1.

Los resultados de este cálculo se presentan en el *cuadro 4 y Mapa (DS-5.4)*, donde se aprecia que la altitud predominante de precipitación (posible zona de recarga) corresponde a la cota 3.6 km snm. No obstante, es relevante analizar el significado del exceso de deuterio encontrado en las muestras de agua en posteriores estudios, así como analizar con mayor detalle los problemas encontrados en la determinación de la altitud de recarga para las muestras Cerrerías, Piedra del Agua y Cañada de Cuervos pues los resultados no concuerdan con la realidad ya que se obtienen altitudes de recarga menores con aquellas en las que se encuentran los manantiales.

#### Cuadro 4

#### RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA ALTITUD DE LA PRECIPITACIÓN

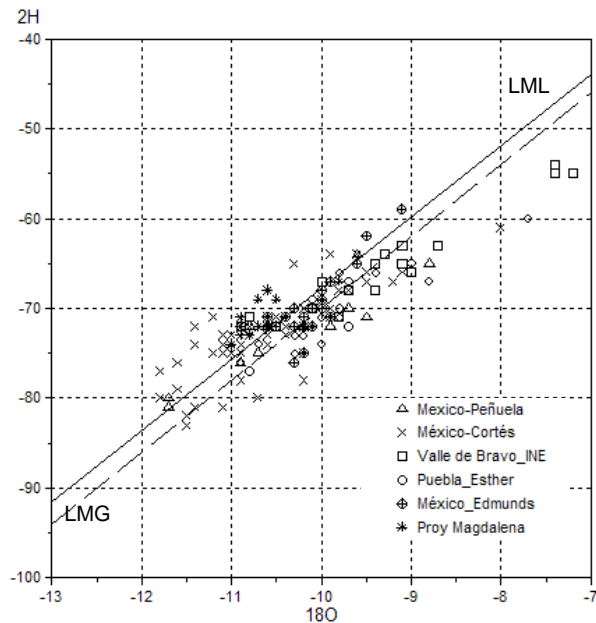
Posibles zonas de recarga al agua subterránea

ID	Muestra	$\delta^{18}\text{O}^*$	Z (km snm)
1	Cieneguillas 1	-10.9	3.6
2	Cieneguillas 2	-10.9	3.6
3	Cerrerías	-10.0	3.2
4	Piedra del Agua	-10.5	3.4
5	Cañada de Cuervos	-10.8	3.6
6	Cieneguillas	-10.9	3.6
7	3er Dinamo	-10.7	3.5
8	La Escondida	-10.6	3.5
9	San Miguel	-10.9	3.6
10	Dinamos 1	-10.8	3.6
11	Dinamos 2	-10.7	3.5
12	Montealegre	-11.0	3.6

### 5.6.4 Comparación Isotópica Regional

Haciendo una comparación regional entre datos de concentraciones isotópicas de la Cuenca de México de diferentes fuentes<sup>21</sup>, Valle de Bravo<sup>22</sup> y Puebla<sup>23</sup>, se tiene que la elevación topográfica de la precipitación de estos territorios es semejante (figura 6). En general, se puede decir que existe un promedio isotópico de  $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle = -10.36$  y  $\langle \delta^2\text{H} \rangle = -72$ , al cual le corresponde una altitud de precipitación promedio de 3.4 km snm y estará asociada con la zona de recarga de agua subterránea, especialmente cuando no exista alteración en el agua por efectos de evaporación.

**Figura 6**  
CONCENTRACIÓN ISOTÓPICA PARA LA CUENCA DE MÉXICO



<sup>21</sup> A Cortés and RN Farvolden, 1989, pp 147-153.

WM Edmunds, JJ Carrillo-Rivera, A Cardona 'Geochemical Evolution of Groundwater Beneath Mexico City'. *J. Hydrol.* Vol. 254, 2002, pp. 1-24.

Peñuela Arévalo, LA, Proceso de Recarga-Descarga de Agua Subterránea en Zonas Receptoras de Pago por Servicio Ambiental Hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México. Tesis de maestría. Instituto de Geofísica, UNAM, 2007.

<sup>22</sup> JJ Carrillo-Rivera, M Alconada, LA Peñuela-Arévalo, A Godoy, J Carbajal, G Parada, D Romero, Sistema de información hidrológica para el diseño de un programa de pago por servicios ambientales en un municipio con potencial para la instrumentación de un mercado de servicios hidrológicos. Convenio Instituto de Geografía (UNAM) y el Instituto Nacional de Ecología - INE, 2006.

<sup>23</sup> E Galicia, Espacios soporte del sistema hidrológico en el municipio de Puebla y zona conurbada. Tesis Doctorado. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, en proceso, México.



## Bibliografía

- Ángeles-Serrano G. 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, 2001.
- Carrillo-Rivera JJ, Cardona A, Hergt T, Huizar R, Kobr M. 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, 1999, p. 268.
- Carrillo-Rivera JJ, Alconada M, Peñuela-Arévalo LA, Godoy A, Carvajal J, Parada G, Romero D, *Sistema de información hidrológica para el diseño de un programa de pago por servicios ambientales en un municipio con potencial para la instrumentación de un mercado de servicios hidrológicos*. Convenio Instituto de Geografía (UNAM) y el Instituto Nacional de Ecología - INE, 2006.
- Cortés A, Arizabalo RD y Rocha R, 'Estudio hidrogeoquímico isotópico de manantiales en la Cuenca de México'. *Geofísica Internacional*, 28 (2), 1989, pp 265-282.
- Cortés A and Farvolden RN, 'Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de Las Cruces, Mexico'. *Journal of Hydrology*, 107, 1989, pp 147-153.
- Cortés A y Durazo J, 'Tendencia del oxígeno-18 en la precipitación del centro de México'. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI (2), 2001, pp 93-102.
- Craig H, 'Isotopic variations in meteoric water'. *Science*, 133, 1961, pp 1702-3.
- Edmunds WM, Carrillo-Rivera JJ, Cardona A 'Geochemical Evolution of Groundwater Beneath Mexico City'. *J. Hydrol.* Vol. 254, 2002, pp. 1-24
- Galicia E, *Espacios soporte del sistema hidrológico en el municipio de Puebla y zona conurbada*. Tesis Doctorado. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, en proceso, México.
- Gobierno del Distrito Federal – GDF, Estudio para la Recarga del Acuífero en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. GDF. Consorcio OPMAC (Overseas Project Management Consultants, Ltd.), Junio de 2000, p. 147.
- Hergt T, Carrillo-Rivera JJ, Morales-Manilla LM, Angeles-Serrano G, González-Abraham A, Rosales-Lagarde L. Asesoría sobre Consideraciones Geohidrológicas de la Relación Bosques-Agua en la Región Sierra Gorda. Informe final para el INE, Semarnat. IG, UNAM, México, 2002, p. 61.
- Huizar-Alvarez R, Carrillo-Rivera JJ, Angeles-Serrano G, Hergt T, Cardona A. Chemical Response to Groundwater Extraction Southeast of Mexico City. *Hydrogeol. J.* Vol. 12, 2004, pp. 436-450.



Lachniet M, Patterson W, 'Stable isotope values of Costa Rica surface waters'. *J. Hydrol.* Vol. 260, 2002, pp. 135-150

Peñuela Arévalo, LA, *Proceso de Recarga-Descarga de Agua Subterránea en Zonas Receptoras de Pago por Servicio Ambiental Hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México*. Tesis de maestría. Instituto de Geofísica, UNAM, 2007.

Tóth, J. A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada. *J. of Geophysical Res.* 67 (11), 1962. pp. 4375-4387.

Vázquez-Sánchez, E. *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 DF. 1995.