



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA SUBCUENCA
CHALCO-AMECAMECA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

P R E S E N T A:

LUIS ÁNGEL MORALES PÉREZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



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.

Datos del alumno

Luis Ángel Morales Pérez

309254962

Licenciatura en Ciencias de la Tierra

Facultad de Ciencias, UNAM

Datos del tutor

Dra. Elsa Leticia Flores Márquez

Instituto de Geofísica, UNAM

Datos del sinodal 1

Dra. Graciela del Socorro Herrera Zamarrón

Instituto de Geofísica, UNAM

Datos del sinodal 2

Dra. Erika Danaé López Espinoza

Centro de Ciencias Atmosféricas, UNAM

Datos del sinodal 3

Dr. Eric Morales Casique

Instituto de Geología, UNAM

Datos del sinodal 4

Dr. Oscar C. Valdiviezo Mijangos

Instituto Mexicano del Petróleo

Datos del escrito

Estudio hidrogeológico de la subcuenca Chalco-Amecameca.

92 p

2018

Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por la educación y oportunidad de ser una mejor persona y de la cual estaré siempre agradecido.

A la **Facultad de Ciencias** por darme acceso a infinitas herramientas para el conocimiento y de donde me llevo las mejores experiencias de mi vida.

Al **Instituto de Geofísica** por el apoyo otorgado para realizar mi trabajo de Tesis de Licenciatura. En especial a mi asesora de tesis la **Dra. Elsa Leticia Flores Márquez** que con su apoyo, paciencia, consejos y conocimientos compartidos ayudaron mucho para terminar esta tesis. Gracias por preocuparse por mi bienestar, sin duda una excelente investigadora y mujer.

A mis amigos que me brindaron su apoyo incondicional y motivaron para seguir siempre adelante, en especial a **Abel Gallardo** y **Daniela Vargas** que con sus valiosos consejos ayudaron a que comprendiera la importancia de ser una persona de bien.

Y a **Dios** por no abandonarme por más duro que fuera este proceso.

“A ti me querido padre, dedico este libro, modesta aportación mía al conocimiento del agua, cuyos problemas he visto en mi vida. Y aunque no aspiro sino a expresar, en forma amena, comprensible y útil algunas ideas, hechos y resultados, resalta mi gusto por la hidrogeología.”

ÍNDICE

Resumen	8
Introducción	9
• Problemática del acuífero Chalco-Amecameca	9
• Objetivos de la Tesis	10
• Justificación de la Tesis	10
CAPÍTULO I. Bases teóricas de la modelación matemática de aguas subterráneas	
1.1 Sistema acuífero	11
1.2 Concepto de cuenca	12
1.3 Balance hidrogeológico	12
1.4 Modelación de un sistema acuífero	13
1.5 Ecuación general de flujo	14
1.6 Evolución de los modelos de flujo y transporte	16
1.7 Acerca del modelador	19
CAPÍTULO II. Descripción del sistema acuífero Chalco-Amecameca	
2.1 Ubicación y límites del área de estudio	21
2.2 Clima	23
2.3 Fisiografía	24
2.4 Marco geológico	26
2.5 Hidrología superficial	32
2.6 Uso de suelo y cobertura vegetal	38
CAPÍTULO III. Estudios previos, información recopilada y análisis de la información	
3.1 Estudios geofísicos previos de la zona de estudio	40
3.2 Estudios geoquímicos previos de la zona de estudio	46
3.3 Estudios hidrogeológicos previos de la zona de estudio	49
3.4 Evolución histórica de los niveles estáticos	55
3.6 Unidades hidrogeológicas propuestas y modelo conceptual	58
CAPÍTULO IV. Modelo del flujo subterráneo	
4.1 Geometría del modelo	61
4.2 Capas que conforman el modelo	62
4.3 Parámetros hidrogeológicos	65
4.4 Condiciones iniciales	66
4.5 Condiciones de frontera	66
4.6 Modelo de flujo en estado estacionario	67
4.7 Pozos	68
4.8 Modelos de flujo en estado transitorio	70
4.9 Calibración	74
4.10 Escenarios de explotación del acuífero	75
Discusión de resultados	76
Conclusiones	79
Anexo	81
Bibliografía	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1.1	Esquema de discretización de un sistema acuífero.	18
1.2	Esquema de celda en diferencias finitas y su flujo asociado.	19
2.1	Ubicación de la subcuenca Chalco-Amecameca.	21
2.2	Municipios de la subcuenca Chalco-Amecameca.	22
2.3	Climas de la subcuenca Chalco-Amecameca.	24
2.4	Fisiografía de la subcuenca Chalco-Amecameca.	25
2.5	Mapa geológico de la subcuenca Chalco-Amecameca.	27
2.6	Sección estratigráfica para el acuífero superior Chalco-Amecameca, (tomada de Rodríguez, 2003).	27
2.7	Columnas estratigráficas de los pozos profundos cercanos.	29
2.8	Pozos cercanos, con información en la subcuenca Chalco-Amecameca.	31
2.9	Registro litológico de pozos en la subcuenca Chalco-Amecameca.	32
2.10	Hidrología superficial de la subcuenca Chalco-Amecameca.	33
2.11	Distribución espacial de lluvia (a) mensual, (b) evapotranspiración real y (c) recarga potencial en la Cuenca de México para junio de 1980-1983 (tomada de Carrera y Gaskin, 2008).	35
2.12	Uso de suelo y vegetación subcuenca Chalco-Amecameca 2015.	39
3.1	Modelo Hidrogeológico a lo largo de la batería de pozos Santa Catarina (modificada y tomada de Campos et al., 1997).	41
3.2	Sección geológica a lo largo de la batería de pozos Santa Catarina a partir de la integración de datos geofísicos existentes y el registro de pozos de agua (modificada y tomada de Chouteau y Krivovhieva, 2002).	42
3.3	Espesor del acuitardo en metros (tomada de Pérez, 2009).	43
3.4	Modelo geológico estratificado de velocidad de onda de corte (v_s) (tomado de Vergara, 2015).	43
3.5	Sección del registro geofísico del pozo San Lorenzo Tezonco (130–500 m de profundidad) y la columna litológica asociada (tomado de Lezama et al., 2016).	45
3.6	Identificación de geometría de flujo del pozo Vivero 1-B (tomado de Luna, 2017).	53
3.7	Identificación de geometría de flujo del pozo Ramal Mixqui-Sta. Catarina (tomado de Luna, 2017).	53
3.8	Identificación de geometría de flujo del pozo Tecómitl (tomada de Luna, 2017).	54
3.9	Camino a Chalco con los Volcanes (1891), José María Velazco.	55
3.10	Configuración de la elevación del nivel estático (modificada de Huizar, 1988).	56
3.11	Configuración de elevación del nivel estático (modificada de CONAGUA, 1996).	56
3.12	Configuración de elevación del nivel estático (modificada de CAEM, 2009).	57
3.13	Configuración de elevación del nivel estático (modificada de ODAPAS, 2016).	57
3.14	Modelo conceptual de la subcuenca Chalco-Amecameca.	60
4.1	Geometría modela en Visual MODFLOW.	62
4.2	Corte transversal S-N columna #58 de las capas del modelo.	64
4.3	Corte transversal O-E fila #60 de las capas del modelo.	64
4.4	Comportamiento de la condición de Frontera GHB.	66
4.5	Modelo de Flujo en estado estacionario.	67
4.6	Localización de los pozos de extracción y observación.	68
4.7	Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 1988.	70

4.8	Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 1996.	71
4.9	Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 2009.	72
4.10	Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 2016.	73
4.11	Calibraciones A) año 1988, B) año 1996, C) año 2009 D) año 2016	74
4.12	Superficie potenciométrica para el año 2021, con un aumento en el volumen de extracción general del 8.33%.	75
4.13	Superficie potenciométrica para el año 2026, con un aumento en el volumen de extracción general del 16.66%.	76
4.14	Diferencia potenciométrica en metros. A) 1988 - 1996, B) 1996 - 2009, C) 2009 - 2016 y D) 1988 - 2016.	77
4.15	Resultados observados vs resultados calculados. A) 1988, B) 1996, C) 2009 y D) 2016.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
1.1	Entradas y salidas en un balance hidrogeológico.	13
2.1	Distribución de la superficie en la subcuenca Chalco-Amecameca.	22
2.2	Distribución climática en la subcuenca Chalco-Amecameca.	23
2.3	Distribución fisiográfica de la subcuenca Chalco-Amecameca.	24
2.4	Distribución geológica de la subcuenca Chalco-Amecameca.	26
2.5	Balance hídrico, Cuenca de México CONAGUA 2010 y 2012.	34
2.6	Balance hídrico, subcuenca Chalco-Amecameca (Burns et al., 2011).	34
2.7	Balance hidrogeológico de las subregiones de la subcuenca Chalco-Amecameca (tomado de Birkle et al., 1998).	36
2.8	Procedencia del agua utilizada en la subcuenca Chalco-Amecameca (tomado de Burns et al., 2011).	37
2.9	Usos del agua en la subcuenca Chalco-Amecameca (tomado de Burns et al., 2011).	37
2.10	Distribución del uso de suelo y vegetación de la subcuenca Chalco-Amecameca.	38
3.1	Resultados del análisis geoquímico de 15 pozos de la subcuenca Chalco-Amecameca.	49
3.2	Datos generales de las pruebas de bombeo, análisis paramétrico y no paramétrico (tomado de Luna, 2017).	54
4.1	Coordenadas y alturas del área modelada.	62
4.2	Capas que conforma el modelo.	63
4.3	Propiedades hidrogeológicas atribuidas para el modelo.	65
4.4	Recarga y evapotranspiración del modelo.	65
4.5	Extracción de agua en pozo	69
4.6	Condiciones frontera GHB en el modelo.	79
Tabla 1	Anexo: Pozos utilizados para el registro litológico.	81
Tabla 2	Anexo: Pozos utilizados para las pruebas de bombeo.	81
Tabla 3	Anexo: Pozos del análisis geoquímico.	81
Tabla 4	Anexo: Pozos de observación 1996.	82
Tabla 5	Anexo: Pozos de observación 2009.	82
Tabla 6	Anexo: Pozos de observación 2016.	83
Tabla 7	Anexo: Pozos de extracción.	84

Resumen

Se presenta un modelo de flujo subterráneo de la subcuenca Chalco-Amecameca con base en los datos geofísicos e hidrogeológicos disponibles en la zona. Los primeros tres capítulos sintetizan la información de la búsqueda bibliográfica, la cual es importante para realizar el marco teórico que ayude a la construcción del modelo computacional.

Dada la naturaleza analítica de la tesis, fue necesario compilar la información de los niveles estáticos actuales y de años pasados de la zona, de metadatos topográficos y de relieve, así como la información de los métodos geofísicos del lugar.

Para modelar el sistema acuífero Chalco-Amecameca, fue necesario utilizar distintos softwares, por ejemplo: *Visual Mod-Flow*, *Surfer*, *Phython*, *Strater* y *Q-gis* los cuales permitieron el procesamiento de los datos y la obtención de los distintos escenarios geofísicos de la zona.

Por último, en la modelación del acuífero se simula la evolución de los niveles estáticos a través de estados transitorios, bajo distintos regímenes de extracción. Cabe mencionar que, el análisis de la información esta sostenido bajo los fundamentos teóricos de la hidrogeología, básicos para la realización del modelo geométrico, ya que su estructura se forma a partir del procesamiento y tratamiento de la información.

Con base en ello, el análisis de los resultados determinó que la subcuenca ha sufrido un descenso de 30 m del nivel estático, producto de la alta extracción de agua en la zona. Favoreciendo cada vez más el aumento de la subsidencia del lugar.

Introducción

Problemática del acuífero Chalco-Amecameca

El desarrollo urbano y el rápido crecimiento demográfico al oriente de la Ciudad de México, ha provocado la extracción de agua del acuífero Chalco-Amecameca. Este, abastece en gran parte las necesidades de los habitantes de la zona. Sin embargo, la alta demanda del recurso ha derivado en su sobreexplotación.

En la cuenca Chalco-Amecameca el cambio de uso de suelo y los asentamientos irregulares en las zonas de recargas, han modificado constantemente los márgenes de infiltración. La sobreexplotación del recurso ha propiciado problemas de escasez, mala calidad y una creciente disminución de los niveles estáticos. Por lo que actualmente el ciclo del agua de la cuenca Chalco-Amecameca se ve afectado, debido a que se extrae más agua del subsuelo que la que se infiltra.

Los problemas más comunes de toda la subcuenca son el abastecimiento de agua potable, la mala calidad del agua, su desperdicio por fugas y su tratamiento insuficiente. El mal manejo ha provocado cada vez más, problemas de salud que podrían ir aumentando si no se atiende el problema.

Otro problema se produce por la deforestación, una disminución de la cubierta vegetal modifica los procesos hidrológicos de drenaje de la cuenca. Un aumento en esta acción humana causaría cambios irreversibles, en la dinámica de los sistemas fluviales.

La situación se agrava más en la parte baja de la cuenca, donde las características físicas del terreno propician, el aumento del fenómeno de subsidencia, que a su vez produce deformaciones, fracturas y agrietamiento del subsuelo, estos últimos provocando daños a la infraestructura de abastecimiento y drenaje urbano. Incrementando también el riesgo y vulnerabilidad a sismos e inundaciones.

Objetivos de la Tesis

Realizar un modelo de flujo de la subcuenca Chalco-Amecameca para caracterizar su sistema acuífero subterráneo, teniendo en cuenta la integración de los datos geofísicos e hidrogeológicos disponibles de la zona.

Para cumplir este objetivo se revisaron y analizaron los procesos hidrogeológicos, que determinan las relaciones e interacciones entre la recarga, la extracción y el flujo subterráneo, así como el uso y los efectos que se producen en la calidad y cantidad del agua.

También, se recopilaron y revisaron todos los estudios geofísicos previamente realizados en la zona, para construir el modelo geométrico del sistema acuífero. Mediante la simulación de escenarios transitorios que se calibraron para reproducir los niveles potenciométricos del acuífero actual y futuro.

Justificación de la Tesis

La exploración integral de los recursos hídricos, integrado al conocimiento geofísico, proporcionan los conocimientos necesarios para realizar modelos geométricos y conceptuales de un sistema acuífero.

Estos modelos son útiles y necesarios para reproducir el comportamiento del sistema, mediante escenarios transitorios propuestos. Estudios de esta naturaleza son de gran utilidad para la planificación territorial, dado que permiten hacer recomendaciones, a los organismos responsables de la administración del agua, para que tomen decisiones adecuadas, enfocadas a:

- Identificar las principales características que ocasionan la problemática de la subcuenca.
- Minimizar la contaminación y desabasto de los recursos hídricos subterráneos.
- Determinar la gestión y planeación sustentable con un manejo eficiente y apropiado del agua subterránea.

Bases teóricas de la modelación matemática de aguas subterráneas

En este capítulo se definen algunas nociones fundamentales útiles para el análisis hidrogeológico. Aunque existen varias definiciones para la hidrogeología la más completa es quizás la siguiente:

La hidrogeología comprende el conocimiento de las condiciones geológicas, hidrológicas y de las leyes físicas que rigen el origen, la presencia, el movimiento y las propiedades de las aguas subterráneas. Incluye también la aplicación de estos conocimientos a los aprovechamientos humanos, como son la investigación, prospección, captación, explotación, gestión y protección de las aguas subterráneas (Sanz et al., 2014).

Aceptando esta definición es necesario limitar las partes de la hidrogeología, que atañen al control y aprovechamiento del agua subterránea, útiles para el estudio de acuíferos. Así mismo la necesidad de su investigación deriva del desarrollo económico y poblacional, factores que han acelerado su explotación para el abastecimiento de agua.

1.1 Sistema acuífero

Desde el punto de vista hidrogeológico es clásica, la clasificación de un acuífero dependiendo de sus velocidades de transmisión de agua. En la definición técnico-científica, un acuífero, hace referencia a una formación geológica. Así entonces un sistema acuífero sería:

Un conjunto delimitado que regula el funcionamiento hidrogeológico, que comprende el aporte de agua en diversas direcciones y su acumulación en un conjunto de rocas, que contribuye a transportar y almacenar agua.

Considerados como embalses subterráneos, los acuíferos constituyen sistemas dinámicos en los que se operan entradas y salidas, y en los que se cumplen las ecuaciones de flujo y transporte (Sanz et al., 2014).

1.2 Concepto de cuenca

Una cuenca superficial es una unidad territorial con límites bien definidos por puntos de mayor nivel topográfico, salidas puntuales y unidades funcionales controladas por características geomorfológicas. La ventaja de trabajar con una cuenca como unidad de estudio es, que ayuda a entender los procesos hídricos superficiales, que posteriormente se relacionan a los subterráneos.

Cabe mencionar que la delimitación de un acuífero subterráneo depende de las propiedades hidráulicas de las formaciones y la estructura del subsuelo; y no necesariamente coincide con el parteaguas topográfico (Morales-Casique et al., 2014).

El análisis de cuenca superficial, pone énfasis principal en la cantidad y calidad de los cuerpos de agua, permitiendo observar las relaciones que se establecen entre usuarios cuenca arriba, cuenca abajo y entender los problemas considerando sus causas y consecuencias. Por lo que una buena caracterización de un acuífero requerirá un manejo integral; el cual se enmarca en cuatro fases básicas: el diagnóstico, planeación, implementación y evaluación.

1.3 Balance hidrogeológico

Se sabe que el balance de masa es una expresión de la conservación de la materia, y definir un sistema mediante el uso de entradas y salidas permite explicar dicho sistema. Así que al diseñar un modelo de flujo de aguas subterráneas es indispensable recurrir al balance hidrogeológico.

También conocido como balance de aguas subterráneas, es la diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga) y representa el volumen de agua perdido o ganado anualmente por almacenamiento no renovable del subsuelo (Silva, 2003).

De acuerdo a la ley de la conservación, la ecuación de balance volumétrico es la siguiente:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de almacenamiento} \quad (1)$$

Aplicando esta ecuación al estudio del sistema acuífero las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total (Tabla 1.1) y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica (Silva, 2003).

Entradas	Salidas
Precipitación	Extracción por bombeo
Escorrentía	Evapotranspiración
Infiltración vertical y lateral	Salidas de aguas superficiales y laterales
Aguas de retorno	Salidas de corrientes subterráneas e infiltración

Tabla 1.1 Entradas y salidas en un balance hidrogeológico.

Actualmente es imposible tener un control exacto del balance hidrogeológico, ya que se calcula sin considerar a todos los elementos que participan y de esta manera sus resultados se ven como volúmenes aproximados.

1.4 Modelación de un sistema acuífero

En esta sección se limitará a la teoría elemental del flujo del agua en los medios porosos saturados, empleando el uso de las ecuaciones diferenciales que permitirán conocer el comportamiento hidrogeológico referente al almacenamiento y movimiento del agua subterránea.

Construcción de un modelo

Los estudios básicos para determinar el balance general de un sistema acuífero son investigaciones geológicas, geofísicas y geoquímicas las cuales deben estar sintetizadas a un esquema básico para su entendimiento.

Estos campos de estudio distintos pero interdependientes, en conjunto forman el conocimiento para conocer el marco de referencia que condiciona la hidrogeología.

Como primera parte del procedimiento, es necesaria la recopilación de antecedentes, esencialmente los estudios previos de la zona objeto de investigación.

Siendo de especial intereses los siguientes:

1. Investigación Geológica

- Historia geológica.
- Estudios geológicos previos que determinen tipos de roca en superficie y estratos.
- Identificación de estructuras geológicas y relieve.

2. Investigación Geofísica

- Estudios geofísicos previos.
- Topografía (Modelos digitales de elevación).
- Profundidad de las diversas litologías y basamento.

3. Investigación Geoquímica

- Análisis químicos de agua de diversos pozos.
- Estudio de trazadores (en escalas pequeñas).

4. Información Hidrogeológica

- Reconocimiento de pozos existentes y datos de estos como: ubicación, nivel estático, nivel dinámico, régimen de extracción, nivel de brocal y nivel topográfico.
- Balances hidrogeológicos previos.
- Reporte geológico de pozo.

Una vez recopilada y analizada la información contenida en los trabajos, esta se tendrá que complementar con trabajo de campo.

1.5 Ecuación general de flujo

La deducción mediante el balance de medios continuos se utiliza en las ecuaciones de flujo y transporte. Esto considera que, para un flujo transitorio se requiere que la cantidad de masa, que gana o pierde un volumen especificado (p.ej. un acuífero) durante un intervalo de tiempo, es igual al cambio que entra en el volumen menos la cantidad que sale.

Por ello si la ecuación considera un flujo en régimen permanente o estacionario, y que además el medio acuífero es homogéneo e isotrópico la ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

en donde:

h = carga hidráulica [m]

x, y, z = coordenadas UTM [m]

que comúnmente es denominada como la ecuación de Laplace de tipo elíptico de segundo orden, y que representa procesos estacionarios. En forma reducida esta ecuación se puede escribir como:

$$\nabla^2 h = 0 \quad (3)$$

donde ∇^2 es el operador Laplaciano.

Ahora bien, si consideramos que el medio poroso es homogéneo pero anisotrópico ($K_x, K_y, K_z \neq 0$) con respecto a la conductividad hidráulica, la ecuación se escribe como:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

en donde:

K = conductividad hidráulica en sus tres componentes (K_x, K_y, K_z) [m/s]

S_s = coeficiente de almacenamiento específico [m^{-1}]

t = tiempo [s]

Y para cuando, el flujo uniforme en un medio poroso saturado heterogéneo e isotrópico, considerando al agua con densidad constante, se representa por medio de la siguiente ecuación en derivadas parciales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

Por último, en el caso cuando la ecuación representa un medio poroso saturado heterogéneo y anisotrópico con densidad constante, bajo condiciones transientes se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

Así entonces cuando la ecuación de flujo subterráneo (6) considera fuentes y sumideros tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$

Donde q_s es el volumen de agua añadida por fuentes o extraída por sumideros por unidad de tiempo (s^{-1}).

Excepto en sistemas muy simples, obtener soluciones analíticas de las ecuaciones (2) a (7) es raramente posible, por lo cual se utilizan los métodos numéricos para obtener esas aproximaciones.

Para crear un modelo de ecuaciones diferenciales parciales es necesario definir las condiciones de frontera y las condiciones iniciales para predecir la distribución de resultados en tiempos sucesivos, simulando así un régimen de escenarios transitorios.

1.6 Evolución de los modelos de flujo y transporte

En los años sesentas se desarrollaron aplicaciones de las ecuaciones de transporte en su forma analítica, Harleman y Rumer (1962); Bachmat (1967). Ya para finales de los sesenta aparecen las primeras soluciones numéricas para la ecuación de transporte, Shamir y Harleman (1967). Después de eso y con el acelerado desarrollo de la computación en hardware y software permitió extender las aplicaciones para modelar sistemas más complejos (Silva, 2003).

Años posteriores el avance numérico de la simulación de flujo influyó positivamente en el desarrollo de la simulación numérica del transporte de contaminantes. El manejo de modelos de flujo tridimensional, y la incorporación de la aplicación de los métodos de elemento finito a la discretización de las ecuaciones diferenciales correspondientes, permitió el manejo de heterogeneidades macroscópicas en los modelos de transporte y condujo al reconocimiento general de estas, como la causa primaria de la dispersión en problemas a escala real (Schwartz, 1977).

Diversos trabajos han generado el desarrollo de modelos computacionales prácticos de flujo y transporte que actualmente, son de uso común tanto en el ámbito científico como en el empresarial.

Métodos numéricos

La descripción del flujo de agua subterránea requiere el uso de ecuaciones diferenciales, con condiciones iniciales y límites frontera. Las técnicas numéricas permiten encontrar soluciones en áreas con límites irregulares o cuando las condiciones de los límites varían en el tiempo, por ejemplo, los acuíferos cuyos parámetros de espacio varían a medida que el fluido es extraído o inyectado.

Bunduschuh y Suárez-Arriaga, (2010) mencionan que la característica de los métodos numéricos, en términos generales es, la sustitución de las ecuaciones diferenciales parciales por sistemas de ecuaciones algebraicas o por ecuaciones diferenciales ordinales que pueden resolverse mediante diferentes algoritmos. Es una herramienta que ha permitido tratar problemas prácticos de mayor complejidad. Generalmente una solución con métodos numéricos obtiene resultados más rápidos que los métodos analíticos.

La disponibilidad de computadoras para resolver ecuaciones diferenciales utilizando métodos numéricos y algoritmos es esencial no sólo para tareas de programación, sino también para el uso de programas de modelado comercialmente disponibles que se emplean comúnmente para resolver problemas hidrogeológicos (Bunduschuh y Suárez-Arriaga, 2010).

Método de diferencias finitas

Los métodos de diferencias finitas son una técnica clásica de soluciones numéricas que, a pesar de sus limitaciones, sigue siendo ampliamente utilizada en el modelado de sistemas de agua subterránea y geotérmica debido a su simplicidad y facilidad de programación.

La base del método de diferencias finitas consiste en reemplazar expresiones diferenciales por cocientes de diferencias. Los numeradores de esos cocientes son las diferencias que incluyen los valores de las incógnitas. Así, las soluciones de las ecuaciones diferenciales parciales se aproximan por medio de un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden llevar un número largo de operaciones aritméticas para ser resueltas (Bunduschuh y Suárez-Arriaga, 2010).

El área para modelar debe primero ser discretizada espacialmente (Figura 1.1), esto se hace dividiendo el dominio bajo consideración (área del modelo) en un número finito de celdas cuyas ubicaciones se describen en términos de renglones, columnas y capas. Dentro de cada celda hay un punto llamado “nodo” al que se le atribuyen propiedades hidrogeológicas como por ejemplo la velocidad de flujo.

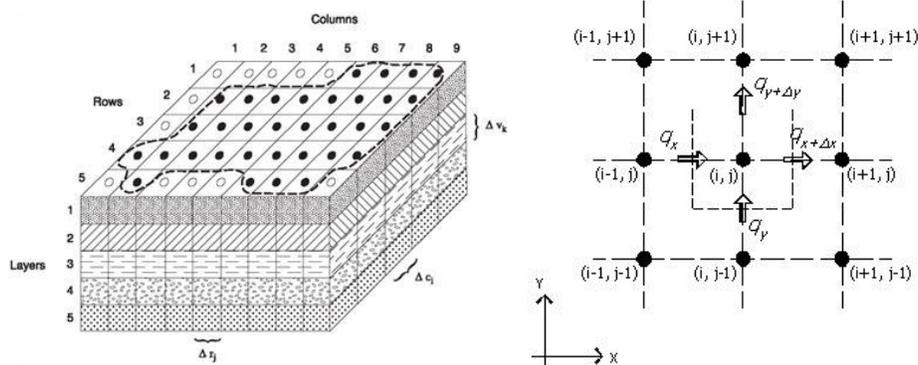


Figura 1.1 Esquema de discretización de un sistema acuífero.

Una de esas aproximaciones es el método de diferencias finitas en el que, el espacio y tiempo continuo son reemplazados por un conjunto finito de puntos discretos en el espacio y el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por ecuaciones en diferencias que involucran a valores de carga hidráulica en esos puntos.

El proceso lleva a sistemas simultáneos de ecuaciones lineales; su solución son valores de carga hidráulica en puntos y tiempos específicos. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución continua de cargas hidráulicas variando en el tiempo que entregaría una solución analítica de la ecuación diferencial parcial de flujo.

Este proceso lo realiza MODFLOW, haciendo posible la solución del problema, si se tiene los valores de carga hidráulica correctos.

1.6 Acerca del simulador

A continuación, se sintetiza la información del simulador numérico utilizado en el trabajo, que reproduce el flujo de agua en sistemas subterráneos.

MODFLOW

Es un código libre para computadora que resuelve numéricamente las ecuaciones del flujo de agua subterránea para un medio poroso. Basado en el programa original del United States Geological Survey (USGS), McDonald y Harbaugh (1988) se convierte en el estándar mundial para la modelación tridimensional de flujo y transporte.

El método numérico que utiliza para resolver la ecuación de flujo transitorio es, un bloque centrado en diferencias finitas, utilizando métodos iterativos para obtener la solución del sistema de ecuaciones que simula el transporte de fluido en un medio poroso (Figura 1.2).

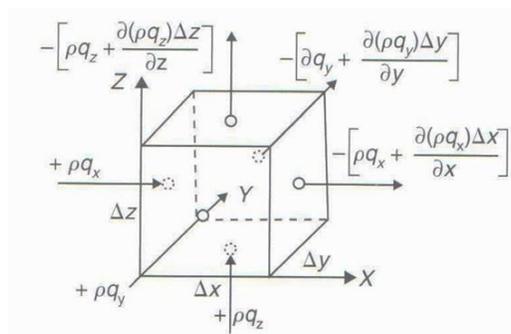


Figura 1.2 Esquema de celda en diferencias finitas y su flujo asociado.

MODFLOW resuelve, para un incremento de tiempo, un enorme sistema de ecuaciones lineales, tomando como datos de partida los niveles iniciales de cada celda, y siendo los resultados los niveles finales en cada celda. Esos niveles finales los considera como niveles iniciales para el siguiente incremento de tiempo.

Interfaz gráfica Visual MODFLOW

Visual MODFLOW es una interfaz gráfica para computadora publicada por primera vez en el año de 1994 por la empresa *Waterloo Hydrogeologic Inc.* Es uno de los softwares comerciales más utilizados y reconocido internacionalmente en el área de la hidrogeología para la simulación de flujo.

Una herramienta computacional muy útil y fácil de operar, por sus características visuales y de manejo de datos, que presenta ventajas en la representación gráfica de los sistemas a modelar y sus resultados.

Como descripción general de este software se puede mencionar que es capaz de abordar simulaciones del flujo de aguas subterráneas en tres dimensiones, las cuales en conjunto con una serie de paquetes que posee el programa, permite abordar problemas de transporte de contaminantes.

Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic, 2015), proporciona al usuario las siguientes paqueterías: MODFLOW que es la que se utilizara en este trabajo, y otras como: MODPATH que describe la trayectoria descrita por las partículas de fluido que le hayamos indicado; ZONEBUDGET que calcula el balance hídrico de cada zona que establezcamos dentro del modelo, y MT3D que calcula el transporte de solutos.

El objetivo de usar Visual MODFLOW es la obtención de los siguientes resultados gráficos:

- 1.- La evolución de los niveles de agua subterránea, $h(x, y, z, t)$.
- 2.- Las velocidades de flujo en el entorno definido como: $v(x, y, z, t)$.

Descripción del sistema acuífero Chalco-Amecameca

2.1 Ubicación y límites del área de estudio

Ubicada al sureste de la Ciudad de México la subcuenca Chalco-Amecameca (Figura 2.1), se localiza dentro del territorio de once municipios del estado de México y dos delegaciones de la Ciudad de México como se muestran en la tabla 2.1 y la figura 2.2.

De acuerdo con su ubicación geográfica está incluida en la Región Hidrológica Administrativa (RHA) No. XIII Aguas del Valle de México, que por su carácter administrativo representa a la Región Hidrológica (RH) No. 26 Panuco, de la cual es perteneciente la Cuenca de México (Figura 2.1) (CONAGUA, 2015).

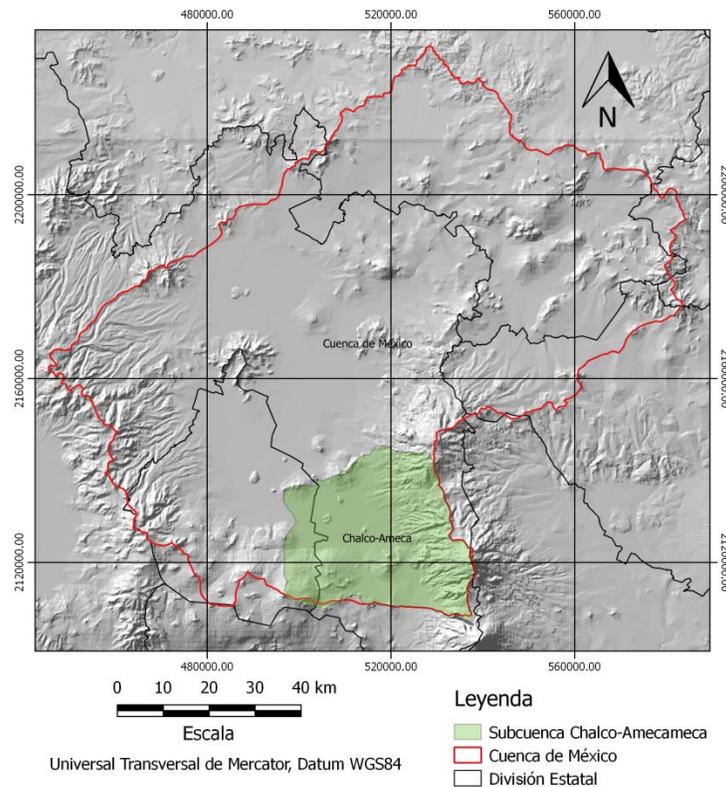


Figura 2.1 Ubicación de la subcuenca Chalco-Amecameca.

Tiene una altitud cercana a los 2240 msnm en la parte baja y una altura de 5200 msnm en su parte más alta, presentando una diferencia de 2960 m de altura. Para el presente trabajo se considerará una superficie de 1150.62 km² por lo que es considerada como una cuenca de tamaño intermedia-grande.

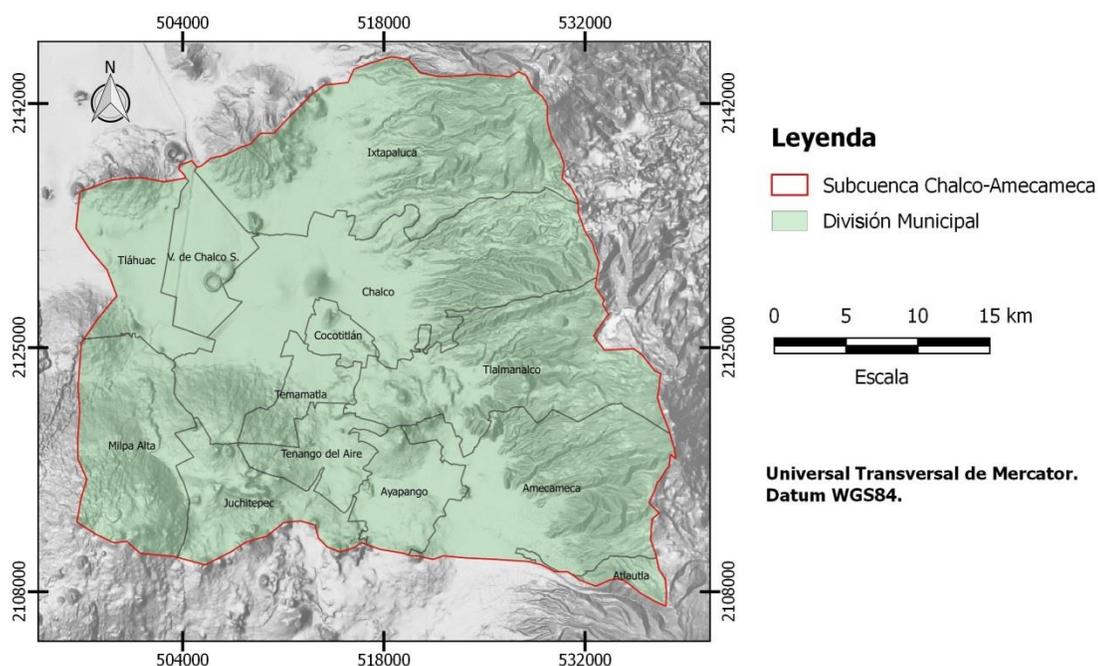


Figura 2.2 Municipios de la subcuenca Chalco-Amecameca.

NO.	ESTADO	DELEGACIÓN O MUNICIPIO	ÁREA km ²	%
1	CDMX	MILPA ALTA	102.49	8.91
2		TLÁHUAC	66.31	5.76
3	MÉXICO	AMECAMECA	154.39	13.42
4		ATLAUTLA	12.17	1.06
5		AYAPANGO	47.19	4.10
6		CHALCO	226.59	19.69
7		COCOTITLAN	14.94	1.30
8		IXTAPALUCA	210.82	18.32
9		JUCHITEPEC	62.85	5.46
10		TEMAMATLA	29.55	2.57
11		TENANGO DEL AIRE	38.36	3.33
12		TLALMANALCO	138.6	12.05
13		V. DE CHALCO SOLIDARIDAD	46.36	4.03
		TOTAL	1150.62	100

Tabla 2.1 Distribución de la superficie en la subcuenca Chalco-Amecameca.

2.2 Clima

En la zona de estudio convergen dos grupos de tipos de clima. El primero se presenta en las porciones con mayor elevación sobre el nivel medio del mar, mientras el segundo hacia la región central. Esta división se formula al tomar en cuenta los tipos de clima según la clasificación realizada por Köppen y modificada por García (1998), para las condiciones de la República Mexicana.

La modificación del clima resulta transicional respecto de la orografía de la región, de la distribución de temperatura y del comportamiento de la precipitación. La variación climática es notoria al largo de la cuenca, ya que pueden diferenciarse el grupo de los climas templados subhúmedos en la parte baja-central, y los semifríos subhúmedos en la parte alta (García, 1998). La distribución espacial por unidad de superficie se indica en la tabla 2.2.

GRUPO	CLIMA	DESCRIPCIÓN	ÁREA km ²	%
1	Bs1Kw	SEMIARIDO, TEMPLADO	6.87	0.60
2	C(wo)	TEMPLADO, SUBHUMEDO	208.23	18.10
	C(w1)	TEMPLADO, SUBHUMEDO	414.57	36.03
	C(w2)	TEMPLADO, SUBHUMEDO	220.76	19.19
3	Cb'(w2)	SEMIFRIO, SUBHUMEDO	300.19	26.09
		TOTAL	1150.62	100

Tabla 2.2. Distribución climática en la subcuenca Chalco-Amecameca.

Con base a ello en la figura 2.3 se indica la distribución de los tipos de climas en la subcuenca Chalco-Amecameca, en donde domina el grupo de los climas templado-subhúmedos que se ubican en la porción central perteneciente a la planicie de Chalco, caracterizados por presentar temperaturas medias anuales entre 12° y 18°C y precipitaciones en verano.

En cuanto a la presencia del clima semifrío subhúmedo se tiene que está presente en la superficie que ocupan las sierras Río Frío, Nevada y Chichinautzin. Se caracteriza por bordear en gran parte la porción oriente de la subcuenca y se clasifica como un clima con temperaturas medias anuales entre 5° y 12°C, con lluvias en verano e invierno.

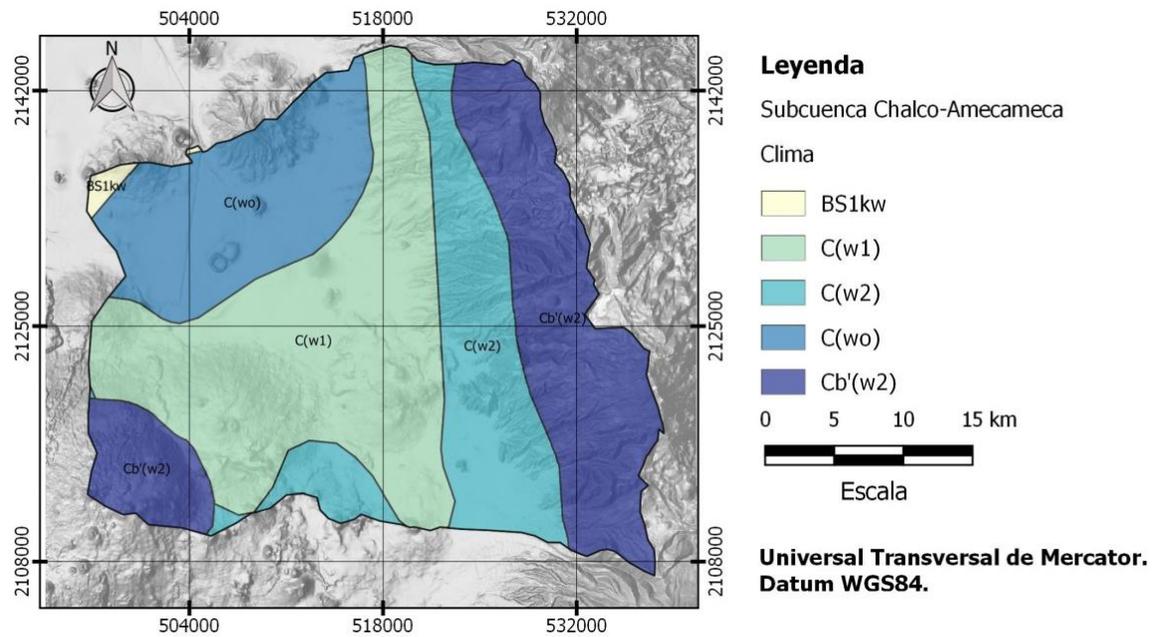


Figura 2.3 Climas de la subcuenca Chalco-Amecameca.

2.3 Fisiografía

La descripción de la fisiografía de la subcuenca Chalco-Amecameca (Figura 2.4), está basada en su mayoría en el conjunto de datos vectoriales fisiográficos continuo nacional escala 1 a 1: 000,000 (INEGI, 2001) que muestra las diferentes provincias fisiográficas, subprovincias y sistemas de topoformas.

En general, esta porción de la cuenca de México se caracteriza por tener un paisaje en el que predominan conos cineríticos, abanicos volcánicos, laderas y coladas de lava, todos ellos afectados por procesos de erosión, así como cañadas, valles y planicies lacustres (Rodríguez y González, 1989). Dentro de la subcuenca Chalco-Amecameca se pueden localizar un conjunto fisiográfico de diversas topoformas las cuales se muestran en la tabla 2.3.

NO.	RASGO FISOGRÁFICO	ÁREA km ²	%
1	SIERRA	402.31	34.96
2	MESETA	80.15	6.97
3	LOMERÍO	280.73	24.40
4	LLANURA	387.43	33.67
	TOTAL	1150.62	100

Tabla 2.3. Distribución fisiográfica de la subcuenca Chalco-Amecameca.

Comprendida dentro de ella se pueden encontrar las sierras de Río Frío y Nevada como una región montañosa con pendientes superiores a los 25° que separan el escurrimiento de las aguas y sirven como límite en la parte más alta al oriente de la subcuenca.

Muestra una extensión alargada de norte a sur y albergan también las estructuras volcánicas conocidas como Popocatépetl e Iztaccíhuatl.

La segunda corresponde a una superficie limitada al norte, representada como una región de lomerío con pendientes que van de los 7° a los 25° que lleva por nombre sierra Santa Catarina. Al suroeste y con un área pequeña en distribución conformada también con pendientes entre los 7° y 25° por una región montañosa de sierras, mesetas y lomeríos se localiza la sierra Chichinautzin.

Por último, en la parte central se pueden apreciar las elevaciones más bajas de toda la cuenca con pendiente menores a los 6° correspondientes a la denominada planicie de Chalco conformada por una serie de formaciones volcánicas monogénicas, llanuras y planicies.

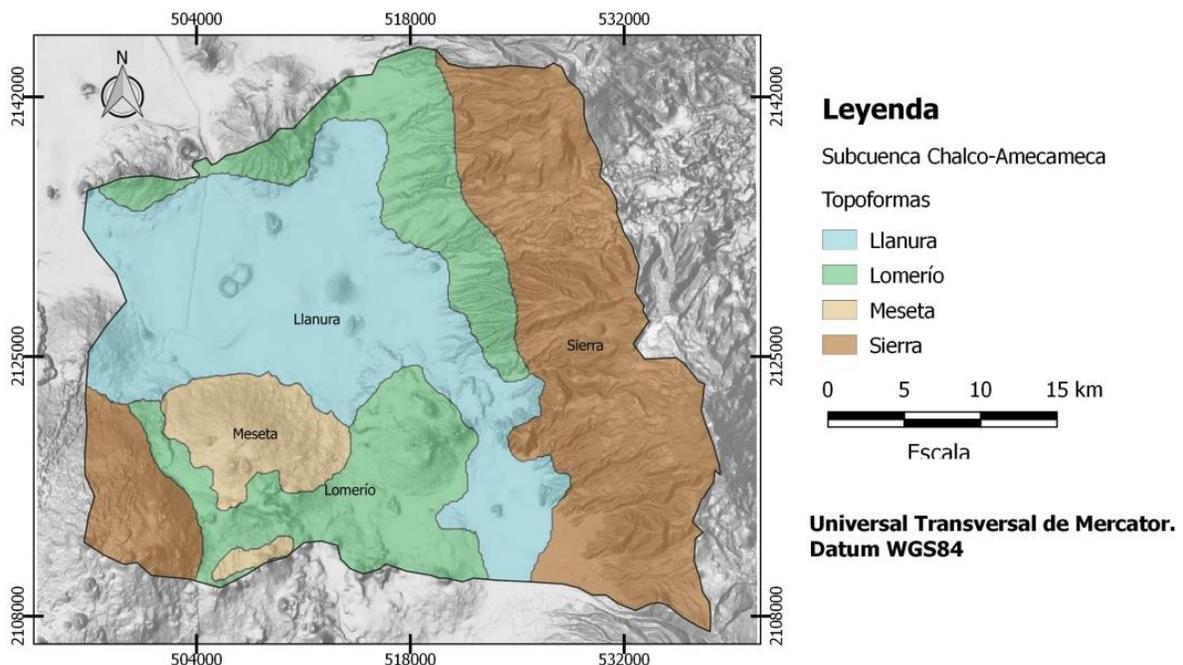


Figura 2.4 Fisiografía de la subcuenca Chalco-Amecameca.

2.4 Marco geológico

El marco que se presenta, es una descripción geológica y estratigráfica de la subcuenca Chalco-Amecameca. Área en la que se llevó a cabo el estudio hidrogeológico. Para el fin de este trabajo únicamente se consideró la información más representativa y se presenta de manera resumida a continuación.

Geología de la Subcuenca Chalco-Amecameca

Litológicamente está constituida por rocas volcánicas del Terciario (Plioceno tardío) y depósitos no consolidados de origen fluvio-lacustre del Cuaternario tardío (Herrera, 2011). Las rocas volcánicas del Terciario y parte del Cuaternario afloran en la sierra Nevada; éstas incluyen rocas de composición andesitas del Plioceno-Pleistoceno (Iztaccíhuatl), tobas de composición andesítica y depósitos de lahar del Pleistoceno tardío (SGM, 2002), (Figura 2.5) y (Tabla 2.4).

Las rocas más recientes estrictamente cuaternarias, afloran en las sierras de Chichinautzin y Santa Catarina. Ambas de composición basáltico-andesítica, con edades pleistocénicas y holocénicas (Herrera, 2011), (Figura 2.5).

CLAVE	CLASE	TIPO	ERA	SISTEMA	ÁREA Km ²	%
TplQptA	ÍGNEA EXTRUSIVA	ANDESITA	CENOZOICO	TERCIARIO	288.81	25.10
QptLh-TA2	VULCANO SEDIMENTARIA	LAHAR-TOBA ANDESÍTICA	CENOZOICO	CUATERNARIO	235.42	20.46
Qhoal - Qhola	SEDIMENTARIA	ALUVIÓN Y LACUSTRE	CENOZOICO	CUATERNARIO	278.35	24.19
Qptho B-A	ÍGNEA EXTRUSIVA	BASALTO - ANDESITA	CENOZOICO	CUATERNARIO	348.04	30.25
				TOTAL	1150.62	100

Tabla 2.4 Distribución geológica de la subcuenca Chalco-Amecameca.

Más específicamente la sierra de Santa Catarina es un conjunto de conos volcánicos cuaternarios constituida principalmente por lavas fenobasálticas y tobas del Plioceno y del Cuaternario, con sucesiones de lavas basáltico-andesíticas, e intercalaciones de piroclastos (Rodríguez y González, 1989). Estas rocas también afloran en el centro de la llanura sedimentaria (Figura 2.5), donde resaltan los conos cineríticos que constituyen una prominente estructura que se eleva directamente del piso del antiguo lago (Rodríguez y González, 1989).

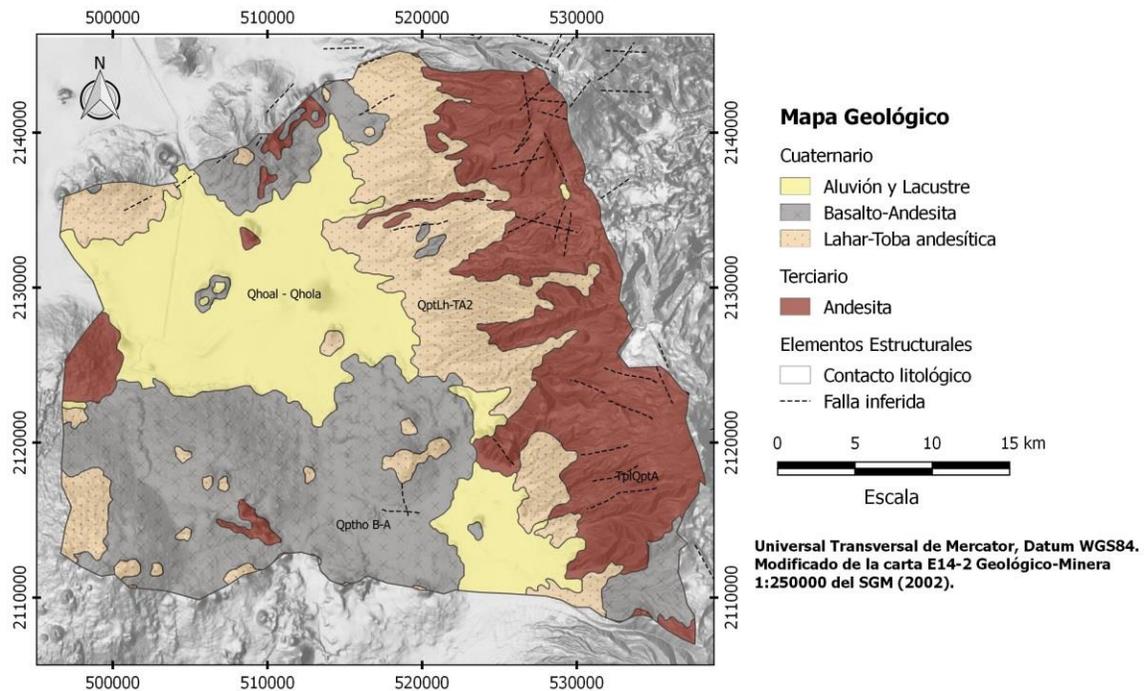


Figura 2.5 Mapa geológico de la subcuenca Chalco-Amecameca.

Estratigrafía de la Subcuenca Chalco-Amecameca

A nivel regional la Cuenca de México cuenta con trabajos geológicos, estratigráficos y estructurales entre los que destacan los elaborados por Vázquez y Palomera (1989), Enciso (1992), y Pérez (1988). Los cuales han establecido secuencias estratigráficas de las unidades litológicas más representativas de la cuenca (Figura 2.6). A continuación, se presenta una breve descripción de solo aquellas que se consideran parte del sistema acuífero superior Chalco-Amecameca.

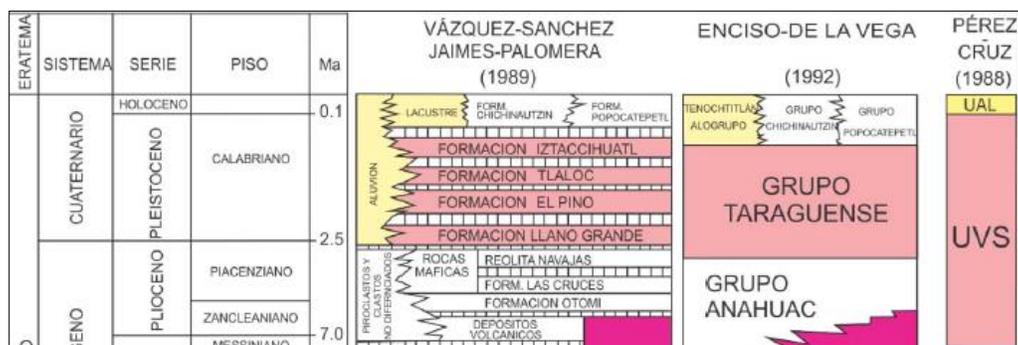


Figura 2.6 Sección estratigráfica para el acuífero superior Chalco-Amecameca, (tomada de Rodríguez, 2003).

Unidad Volcánica Superior (UVS)

Esta unidad litológica está comprendida del periodo Neógeno superior hasta nuestra época actual el Holoceno. Enciso (1992), sugiere que esta unidad es producto de la actividad ígnea del grupo Anáhuac y posteriormente por el grupo Taranguece. Dentro de ella, destacaría como parte del sistema acuífero solo la formación Iztaccihuatl que es considerada como secuencias principalmente efusivas cuya composición varía de andesítica basáltica andesítica.

Seguida por el grupo Popocatepetl que consiste de rocas provenientes de los eventos de actividad efusiva y explosiva; los cuales dieron origen a la formación del volcán Popocatepetl y que cubren la formación Iztaccihuatl.

Finalmente se tiene el grupo Chichinautzin compuesta de conos volcánicos, domos y derrames de lava de características vesiculares, masivas y fracturadas provenientes de un vulcanismo monogenético estromboliano (Rodríguez-Chávez, 2003). Esta unidad probablemente se combina del material del grupo Popocatepetl y Chichinautzin, así como material de desglaciaciones.

Unidad de Arcillas Lacustres (UAL)

Esta unidad se conforma por la acumulación de aportes ígneos y sedimentarios de los edificios circundantes. Totalmente Cuaternaria y contemporánea al emplazamiento de la Sierra de Chichinautzin y a la evolución volcánica del Popocatepetl (Rodríguez-Chávez, 2003). La UAL se define como una secuencia de depósitos lacustres y aluviales.

Caracterizada por Enciso (1992) como Alogrupo Tenochtitlán que va del Pleistoceno superior al Holoceno destacan los depósitos Qal y Qla mencionados de manera resumida a continuación.

- *Depósitos aluviales (Qhoal):* Son acumulaciones con espesores grandes conformada por fragmentos de grava, arena, limo y arcilla. Este material se puede localizar como relleno de los valles, así como en depresiones tectónicas como la del graben de Chalco (Rodríguez-Chávez, 2003).

- *Depósitos lacustres (Qhola)*: Consiste en arenas, limos y arcillas derivadas de la alteración de brechas y cenizas volcánicas (Campos et al., 1997). Pertenecientes a la actividad volcánica del cuaternario posterior al grupo Tarangunce. Esta unidad se compone principalmente por productos clásticos y piroclásticos depositados en ambientes lacustres y distribuidos mayoritariamente en la planicie de la subcuenca Chalco-Amecameca.

Registró litológico de pozo

En la inmediación a la subcuenca Chalco-Amecameca, se tiene registro de dos perforaciones profundas, la primera es la del pozo Tulyehualco-I realizada por PEMEX en la interpretación de los estudios de reflexión sísmica y descrita por Pérez (1988). Y la segunda del pozo San Lorenzo Tezonco, perforado en el 2012 por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) e interpretado por Arce y colaboradores (2013) (Figuras 2.7 y 2.8).

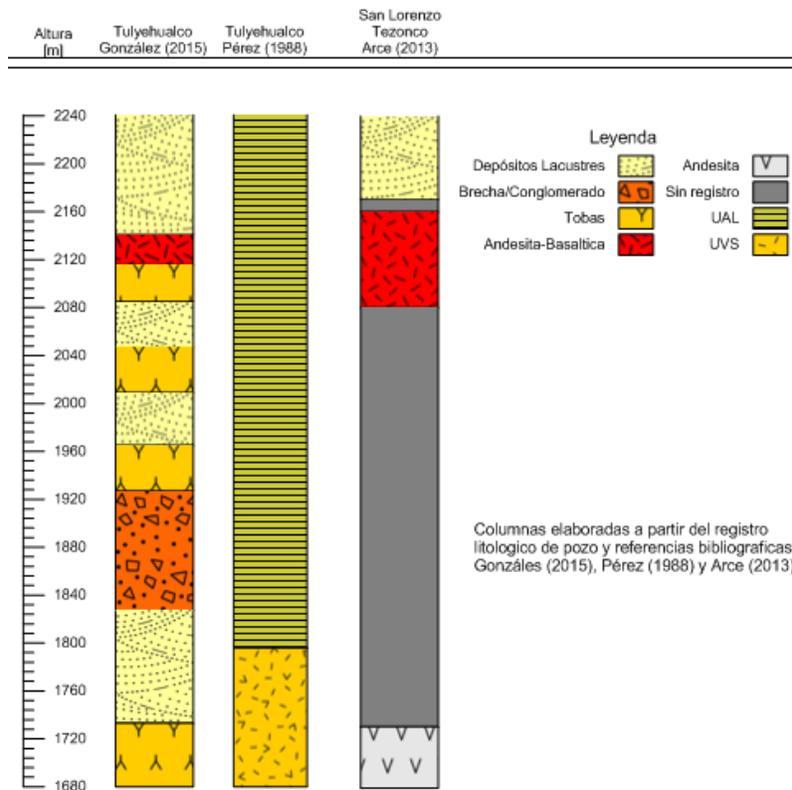


Figura 2.7 Columnas estratigráficas de los pozos profundos cercanos.

De acuerdo a la descripción y nomenclatura utilizada por Pérez (1988), la UAL (Unidad de Arcillas Lacustres) se conforma de diversas secuencias de distintas litologías, una de ellas es la que consiste en cenizas y arena volcánica intercalada con arcillas que tiene un espesor promedio de 100m.

Otra es la conformada por gravas de origen volcánico con intercalaciones de delgados horizontes arenosos-arcillosos y con presencia de algunos flujos volcánicos.

Se estima que esta unidad tiene un espesor de entre 100 y 200 m. Pero Rodríguez-Chávez (2003) menciona que presenta su espesor más significativo de sedimentos en el centro de Chalco, con una base de 300 m de profundidad basándose en el pozo exploratorio Tulyehualco 1.

Por lo que refiere a la UVS (Unidad Volcánica Superior), está constituida esencialmente por rocas piroclásticas, con una menor proporción de rocas efusivas.

La UVS tiene en la base rocas volcánicas fracturadas correspondientes con basaltos y se encuentra aproximadamente a 445 m de profundidad (Pérez, 1988). Respecto a la perforación del pozo profundo San Lorenzo Tezonco, esta ha aportar información reciente sobre la litología, así como, mayor detalle cronológico de las unidades que constituyen el entorno geológico de la zona (González et al., 2015).

Arce y colaboradores (2013) describen que dicha columna litológica está conformada en su parte superior por sedimentos lacustres y fluviales (arenas, limos y arcillas) con espesor de 0 – 70 m de profundidad.

Debajo de ella detalla la presencia de un paquete que consiste en dos tipos de lava, ambos de color gris oscuro, de composición andesítico-basáltica y andesítica que va de los 71 - 580 m de profundidad (Figura 2.7), y que correlaciona con productos del Campo Volcánico Chichinautzin.

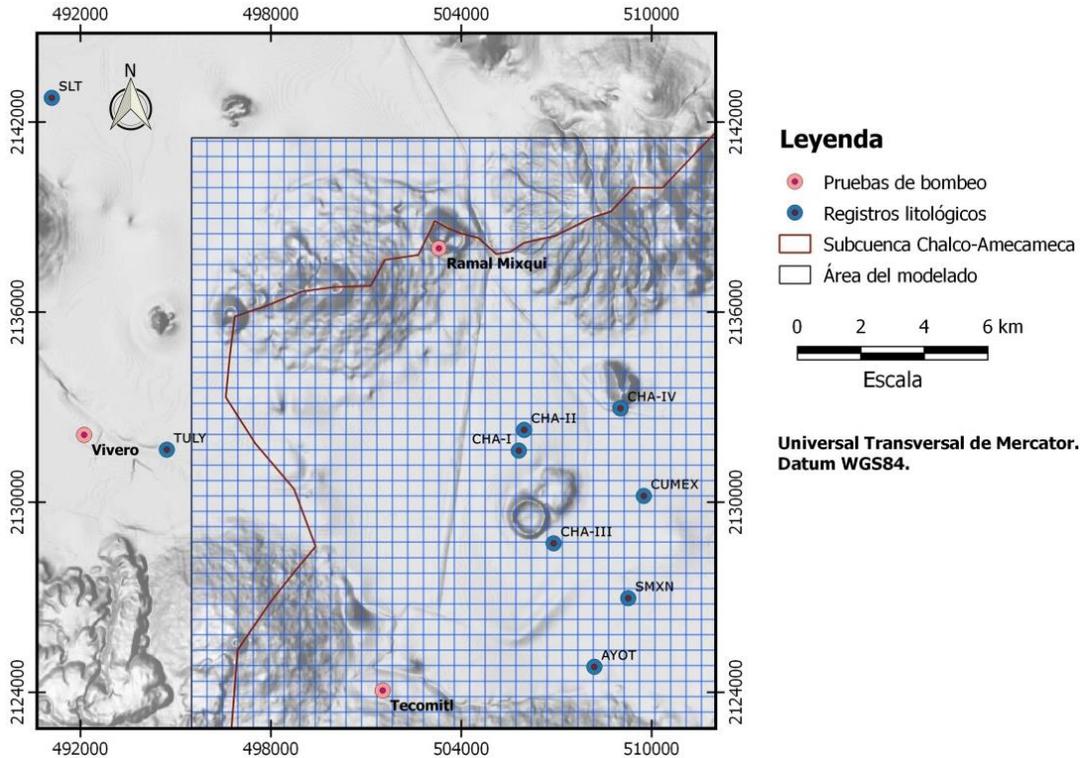


Figura 2.8 Pozos cercanos, con información en la subcuenca Chalco-Amecameca.

En tanto a información de pozos con registro litológico dentro de la subcuenca Chalco-Amecameca, se tienen 7 perforaciones, interpretadas por una empresa privada, para la Comisión de Aguas del Estado de México (CAEM) (Figura 2.8).

En la figura 2.9 se puede observar la presencia en los primeros estratos de depósitos sedimentarios compuestos de material lacustre, arcillas y arenas, los cuales llegan a tener su mayor espesor a 200 m de profundidad en el pozo de San Martín Xico Nuevo.

Las litologías posteriores corresponden a conglomerados y tobas, los cuales podrían estar asociados a los eventos de actividad efusiva y explosiva del Popocatepetl y corresponderían a la unidad granular del acuífero superior Chalco-Amecameca, a la cual se refieren algunos autores.

Como última unidad litológica (de manera frecuente y constante) se tiene la presencia de basaltos, los cuales en el reporte litológico se identifican de color

negro, y fracturados. A lo que hace referencia también el acuífero superior, que se identifica como una unidad volcánica fracturada, que según los reportes litológicos subyace aproximadamente entre los 280 – 400 m de profundidad.

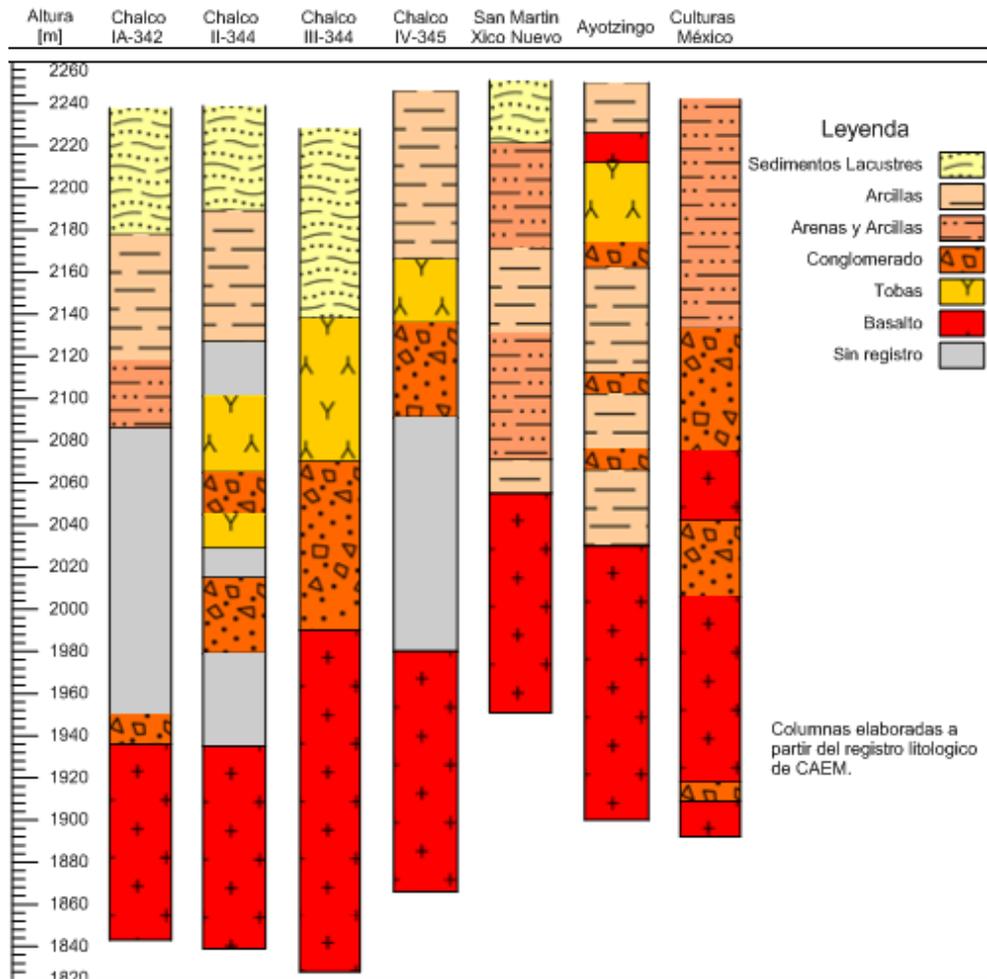


Figura 2.9 Registro litológico de pozos en la subcuenca Chalco-Amecameca.

2.5 Hidrología superficial

La subcuenca Chalco-Amecameca funciona como un gran colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos. Esta transferencia se realiza con pérdidas y es una función bastante compleja de numerosos factores, entre los que predomina el clima, la geología, y la configuración del terreno.

Hidrologicamente posee, en su mayor parte, escurrimientos superficiales intermitentes en la parte alta y media de la cuenca, un patrón de drenaje dendrítico y radial que evacua sus aguas en condiciones endorreicas (Figura 2.10).

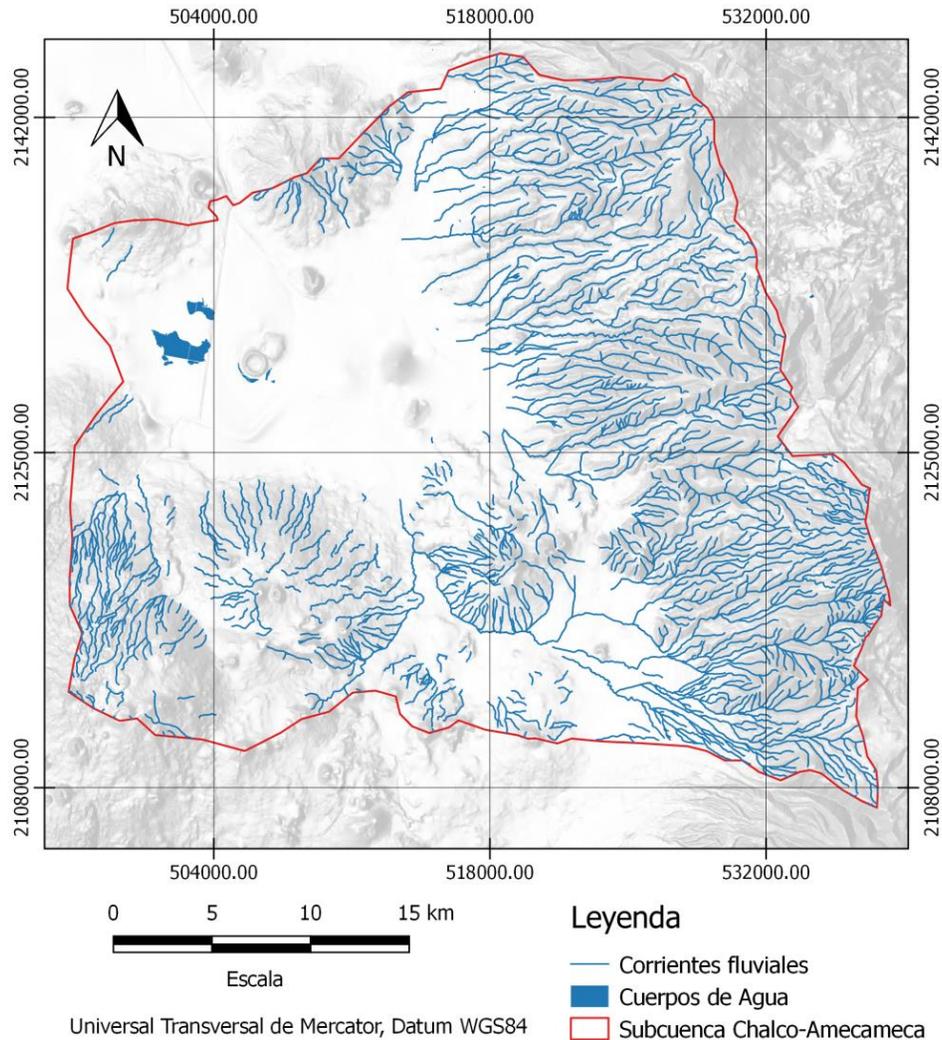


Figura 2.10. Hidrología superficial de la subcuenca Chalco-Amecameca.

Balance Hídrico

A nivel regional la Cuenca de México cuenta con diversos trabajos que cuantifican los niveles promedios anuales de precipitación, evapotranspiración, escurrimientos y recarga del acuífero. La principal institución encargada de la gestión hídrica del país, CONAGUA muestra un ciclo hidrológico para la cuenca de México, muy generalizado que se muestra en la tabla 2.5.

AUTOR	PRE. [m³/s]	EVA. [m³/s]	ESC. [m³/s]	INF. [m³/s]	EXT. [m³/s]
CONAGUA 2010	214.7	159.4	23.7	31.6	59.5
CONAGUA 2012	211.76	158.06	25.37	28.33	60.37

Tabla 2.5 Balance hídrico, Cuenca de México CONAGUA 2010 y 2012.

En él se puede observar que del 100% del agua que llega en forma de lluvia el 74% se consume por evapotranspiración, el 11% se encuentra como escurrimientos superficiales y solo el 15% se llega a infiltrar al sistema acuífero. Lo lamentable de esto es, que la extracción llega a superar hasta el doble a la infiltración, lo que indica una alta dependencia al abastecimiento de agua subterránea en la Cuenca de México.

Localmente la Subcuenca Chalco-Amecameca cuenta con un estudio de balance hídrico, realizado por la Comisión de Cuenca de los Ríos Amecameca y la Compañía en colaboración con la UAEM (Universidad Autónoma del Estado de México y publicado en el 2011. (Tabla 2.6)

AUTOR	PRE. [m³/s]	EVA. [m³/s]	ESC. [m³/s]	INF. [m³/s]	INYECCIÓN DE POZO [m³/s]	EXTRACCIÓN [m³/s]	RECARGA LATERAL [m³/s]
COMISION DE CUENCA Y UAEM	29	21.7	3	4.3	0.40	5.60	1

Tabla 2.6 Balance hídrico, subcuenca Chalco-Amecameca (Burns et al., 2011).

Sus números a lo igual que a nivel regional tienen la misma tendencia, un índice de evapotranspiración del 74.8%, un escurrimiento superficial del 10.4% y una infiltración natural del 14.8%. Que si se le suma al agua introducida por inyección de pozo llegaría al 16.2%.

Lamentablemente, el balance hídrico presentado por estas instituciones y organismos se genera a partir, de la información reportada por los municipios y delegaciones, la cual muchas veces está incompleta y carece de veracidad. En cuanto a información generada por investigación científica, se tienen dos estudios, muy interesantes, que muestran las estimaciones regionales del balance de aguas en la Cuenca de México.

El primero, es un artículo que lleva por título “Análisis espaciotemporal del potencial acuífero recarga: aplicación a la Cuenca de México”, realizado por Carrera y Gaskin (2008). En donde se muestra un análisis espacio temporal de la recarga de los acuíferos, para el periodo 1975-1986, a partir del uso y procesamiento de imágenes satelitales y una metodología que incluye las variables de suelo y vegetación para su modelación. Ya que, según los autores, estas variables influyen mucho en los procesos de evapotranspiración y recarga del acuífero, sus resultados se observan en la figura 2.11.

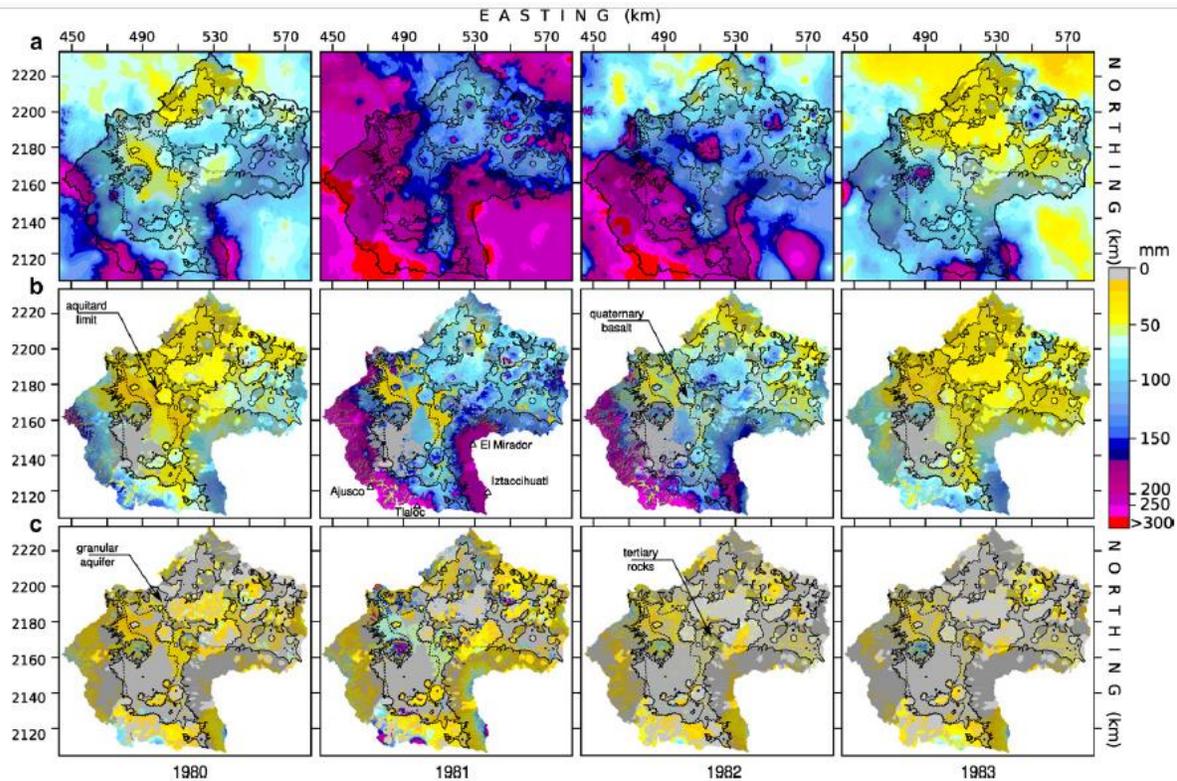


Figura 2.11 Distribución espacial de lluvia (a) mensual, (b) evapotranspiración real y (c) recarga potencial en la Cuenca de México para junio de 1980-1983 (tomada de Carrera y Gaskin, 2008).

Mediante la aplicación de este modelo, se ha demostrado que las montañas, que encierran a la Cuenca de México, son las principales áreas de recarga del sistema acuífero regional de la Cuenca. Haciendo que el crecimiento urbano tenga un impacto mínimo en la recarga del acuífero, aunque haya disminuido la recarga en la llanura aluvial (Carrera y Gaskin, 2008).

Además, mencionan que la distribución espacial de la posible recarga de acuíferos en la Cuenca no es uniforme, ya que las mayores tasas se encuentran al sur de la Cuenca, en las Sierras de Chichinautzin y Nevada, donde la lluvia está influenciada por la topografía y donde los suelos tienen grandes valores de permeabilidad.

Y con los valores mensuales de recarga muestran que los tres meses con las mayores tasas de recarga de acuíferos potenciales son junio, julio y agosto con un flujo equivalente de (87.9, 41.1 y 36.6 m³/s) mientras que diciembre y noviembre tienen las tasas más bajas (1 y 4.5 m³/s) confirmando la importancia que tiene la temporada de estiaje y de lluvias en la recarga del acuífero.

El segundo artículo titulado “El balance de agua para la Cuenca del Valle de México e implicaciones para el futuro consumo de agua”, (Birkle et al., 1998) presenta los cálculos de la cantidad de precipitación, evapotranspiración e infiltración, de las principales áreas de recarga que se caracterizan dentro de la cuenca por su contexto geológico e hidrogeológico (Tabla 2.7).

SUBREGIONES		TEM. [°C]	SUP. [km ²]	PRE. [mm/yr]	PRE. [m ³ /s]	EVA. [mm/yr]	EVA. [m ³ /s]	REC. [mm/yr]	REC. [m ³ /s]
N-E SIERRA NEVADA	MONTAÑAS	13.50	314.50	800	7.98	561.95	5.61	238.05	2.37
	ESTRIBACIONES	14.70	52.00	650	1.02	527.67	0.83	122.33	0.19
PARTE CENTRAL	CD. DE MÉXICO, TEXCOCO Y CHALCO	15.00	1160.3	600	22.08	475.9	17.51	124.22	4.57
SIERRA CHICHINAUTZIN	MONTAÑAS	12.40	765.63	890	21.65	575.93	14.01	314.07	7.64
	FLANCO S-W	12.50	14.38	1450	0.66	626.39	0.29	823.61	0.37
SIERRA SANTA CATARINA	VOLCÁNICOS CUATERNARIOS	16.00	135.63	650	2.80	510.18	2.20	139.82	0.60

Tabla 2.7 Balance hidrogeológico de la subregión de la subcuenca Chalco-Amecameca (tomado de Birkle et al., 1998).

Demanda de Agua

En total el agua utilizada en la subcuenca Chalco-Amecameca en su mayoría proviene de la extracción de agua subterránea y en menor proporción al deshielo de los glaciares de la Sierra Nevada y al tratamiento de aguas residuales que se da en la CDMX y carece en los municipios del EDOMEX. (Tabla 2.8).

AUTOR	EXTRACCIÓN EDOMEX [m³/s]	EXTRACCIÓN CDMX [m³/s]	DESHIELO [m³/s]	AGUAS TRATADAS [m³/s]	TOTAL [m³/s]
COMISION DE CUENCA Y UAEM	3.5	2.1	0.2	0.6	6.4

Tabla 2.8 Procedencia del agua utilizada en la subcuenca Chalco-Amecameca (tomado de Burns et al., 2011).

Esta agua se utiliza principalmente para el uso público de los habitantes de la subcuenca, seguida de una exportación a la Ciudad de México y pérdidas en fugas por el desgastado y mal mantenimiento del sistema de tuberías (Tabla 2.9).

El cual irá en aumento por los problemas de subsidencia y peligro sísmico. Ya en menor proporción se tienen el uso de agua para la industria y la agricultura de la zona chinampera y de riego que utiliza en su mayoría aguas tratadas para su producción de alimentos.

AUTOR	USO PUBLICO [m³/s]	EXPORTACIÓN [m³/s]	FUGAS [m³/s]	USO AGRICOLA [m³/s]	USO INDUSTRIAL [m³/s]	TOTAL [m³/s]
COMISION DE CUENCA Y UAEM	3.00	1.20	1.20	0.7	0.3	6.40

Tabla 2.9 Uso del agua en la subcuenca Chalco-Amecameca (tomado de Burns et al., 2011).

El balance de agua en la zona está en fuerte desequilibrio, debido a que la tasa de extracción por año no es compensada por una recarga natural.

La explotación excesiva de agua subterránea está causando una disminución constante de los niveles potenciométricos en los acuíferos más superficiales, que probablemente, también estén causando los efectos locales, como la disminución de la calidad del agua y las considerables cantidades de un hundimiento del suelo debido a las cambiantes direcciones del flujo subterráneo.

Por estas causas, la corrección del balance hídrico negativo depende principalmente de mantener un equilibrio entre la recarga natural y la tasa de extracción, para encontrar una pronta recuperación.

2.6 Uso de suelo y cobertura vegetal

Las faldas de la sierra Nevada cuentan con bosques densos, los cuales, hacia el norte (Chalco-Ixtapaluca) han sufrido graves dinámicas de deforestación. En 1990, la expansión urbana aceleró en la zona, y empezó a tapizar las zonas de recarga en Ixtapaluca y Chalco en donde afortunadamente se ha conservado importantes zonas de riego a pie de monte.

Por lo que se puede apreciar en la figura 2.12, realizada a partir de metadatos de USV (Uso de suelo y vegetación), INEGI (2015) y la tabla 2.10, los suelos de la subcuenca son altamente productivos debido a la geología de la zona, donde la agricultura de temporal es el uso de suelo más común de la Subcuenca.

También se puede encontrar densos bosques de pino y oyamel, con remanentes de bosques de encino en la franja media y pastizales en la parte de alta de la Sierra Nevada.

NO.	TIPO DE USO	ÁREA Km ²	%
1	AGRICULTURA	540.51	46.98
2	ASENTAMIENTOS HUMANOS	46.72	4.06
3	BOSQUE CULTIVADO	16.19	1.41
4	BOSQUE DE ENCINO	31.39	2.73
5	BOSQUE DE OYAMEL	64.09	5.57
6	BOSQUE DE PINO	189.53	16.47
7	CUERPO DE AGUA	5.05	0.44
8	MATORRAL	0.91	0.08
9	PASTIZAL HALOFILO	0.94	0.08
10	PASTIZAL INDUCIDO	106.57	9.26
11	PRADERA ALTA MONTANA	20.72	1.80
12	SIN VEGETACIÓN	6.89	0.60
13	VEGETACIÓN SECUENDARIA	49.9	4.34
14	ZONA URBANA	71.21	6.19
	TOTAL	1150.62	100

Tabla 2.10 Distribución del uso de suelo y vegetación de la Subcuenca Chalco-Amecameca.

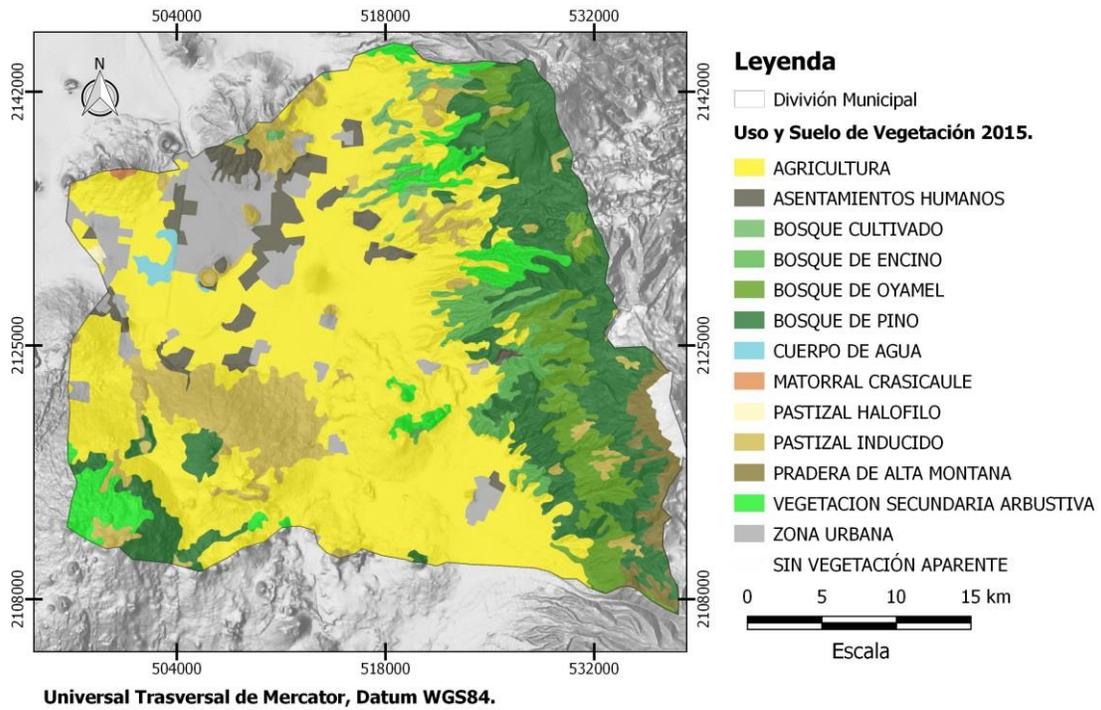


Figura 2.12 Uso de suelo y vegetación subcuenca Chalco-Amecameca 2015.

Estudios previos, información recopilada y análisis de la información

En este capítulo se analizan los trabajos geofísicos e hidrogeológicos existentes en la zona de estudio, aplicables para la caracterización y construcción del modelo numérico de flujo, del sistema acuífero de la subcuenca Chalco-Amecameca. Así como una breve descripción de las diversas técnicas geofísicas, las cuales se presentan a continuación.

3.1 Estudios geofísicos previos de la zona de estudio

Las unidades estratigráficas descritas en el Capítulo 2 han sido corroboradas por diversos estudios geofísicos que se han llevado a cabo en esta área con alcances regionales y locales, entre los que destacan:

1. El Levantamiento gravimétrico hecho por Hernández y Gragüel (1954).
2. El de resistividad y refracción sísmica de Benhumea y Vázquez (1988).
3. La caracterización del sistema hidrogeológico hecha por Rodríguez y Gonzáles (1989) a partir de sondeos eléctricos verticales.
4. El modelo hidrogeológico elaborado con los sondeos electromagnéticos desarrollados por Chouteau et al. (1994) y Chouteau y Krivovhieva (2002).
5. Los estudios geotécnicos para conocer el hundimiento y acuitardo de la cuenca de México de Pérez (2009).
6. Y el de vibraciones ambientales mediante cocientes espectrales H/V realizado por Vergara (2015).

Las tres primeras investigaciones fueron sintetizadas y resumidas por Campos y colaboradores (1997) en su trabajo “La estructura subsuperficial de la subcuenca de Chalco (Ciudad de México) inferido a partir de datos geofísicos”. En él, muestra

la interacción: (1) entre los sedimentos lacustres (acuitardo) y el acuífero granular y (2) entre el acuífero granular y el contenedor basáltico.

Sus resultados de gravedad (inversión y modelado directo) indican la interfaz de densidad entre el contenedor basáltico y el relleno volcánico-sedimentario, mientras que la interfaz de resistividad eléctrica indica posible agua dulce en un basalto fracturado inmediatamente debajo del relleno volcánico-sedimentario. La profundidad del basamento es de aproximadamente 520 m, que concuerda con el pozo Tulyehualco-1 y corresponde a la estimación más superficial de Chouteau y colaboradores (1994) (Figura 3.1).

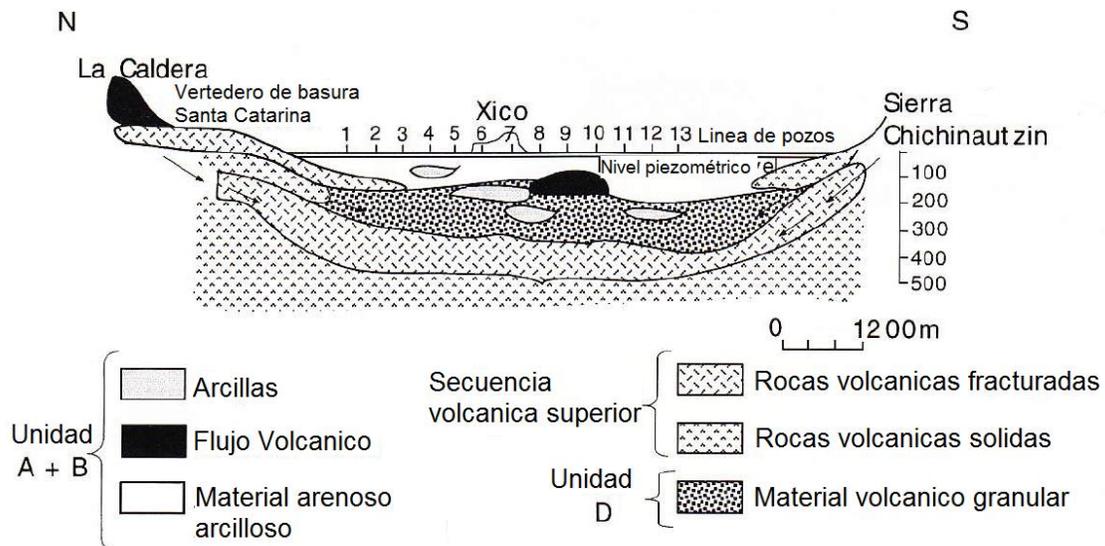


Figura 3.1 Modelo Hidrogeológico a lo largo de la batería de pozos Santa Catarina (modificada y tomada de Campos et al., 1997). La ubicación de los estratos corresponde a los perfiles de gravedad y resistividad eléctrica.

En la figura 3.1 consideran que la parte inferior del acuífero comprende basaltos fracturados (de alta permeabilidad) que también podría incluir la parte superior del basamento (de baja permeabilidad).

La cuarta investigación elaborada en la región de Santa Catarina por Chouteau y Krivovhieva (2002) mediante estudios magnetotelúricos (MT) y electromagnéticas en el dominio del tiempo (TDEM), menciona que el sistema acuífero consiste en tres unidades (Figura 3.2).

En la primera (Zona 1) la permeabilidad es muy baja y contiene capas de arenas, ceniza y arcillas de 20 a 40 m de espesor.

La segunda (Zona 2) correspondería al acuífero granular que se caracteriza por ser una capa conductora de 200 m de espesor de arena y ceniza, saturada con agua altamente mineralizada.

Y finalmente una zona con aumento de resistividades (Zona 3), interpretada como una unidad profunda permeable compuesta de rocas volcánicas fracturadas. Este sistema posiblemente tiene como basamento rocas volcánicas masivas con baja permeabilidad.

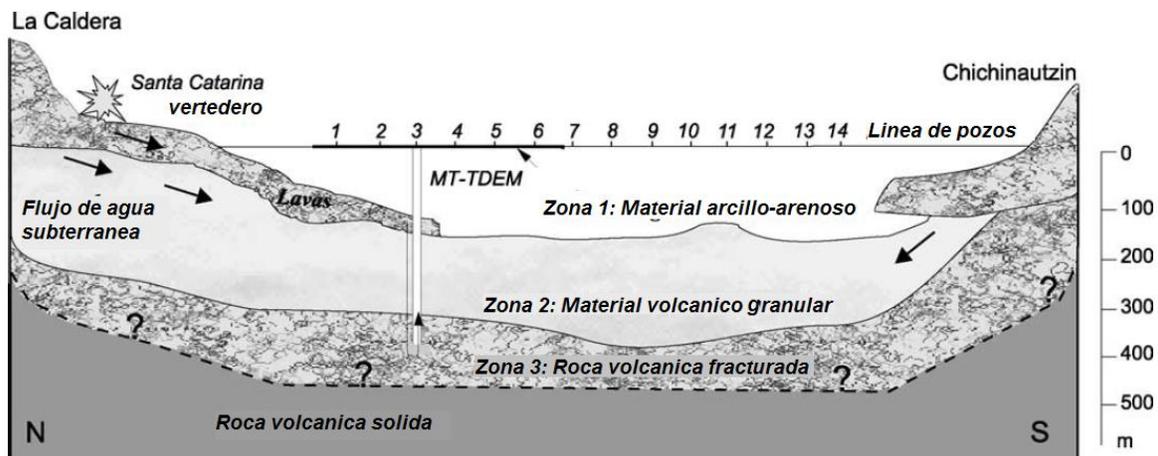


Figura 3.2 Sección geológica a lo largo de la batería de pozos Santa Catarina a partir de la integración de datos geofísicos existentes y el registro de pozos de agua (modificada y tomada de Chouteau y Krivovhieva, 2002).

En cuanto a la geometría del acuitardo Pérez (2009) con su trabajo “Modelado del hundimiento de la zona lacustre del valle de México, aspectos estratigráficos y piezometricos”, muestra el espesor estimado del acuitardo mediante el procesamiento de sondeos geotécnicos, los cuales ubican el mayor espesor de arcilla en la zona de estudio, al norte de cerro de Xico (Figura 3.3).

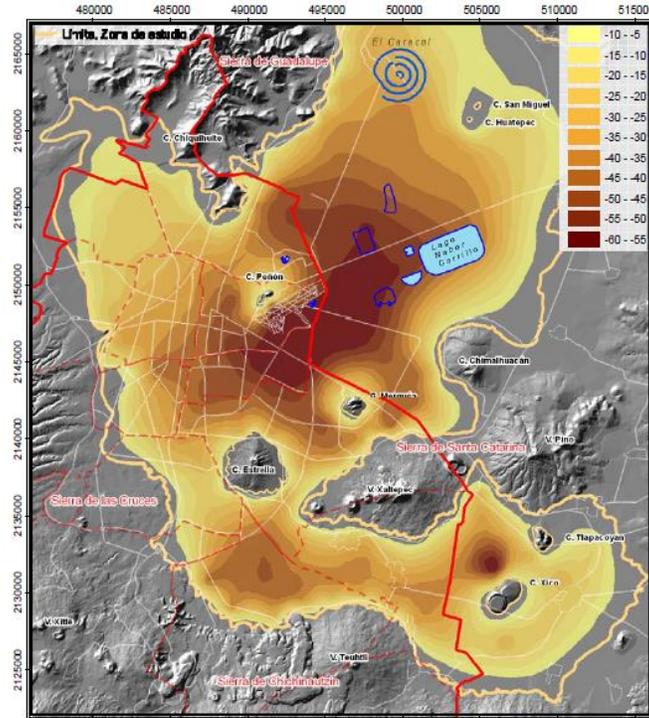


Figura 3.3 Espesor del acuitardo en metros (tomada de Pérez, 2009).

Finalmente, el modelo de velocidades sísmicas mediante el análisis de cocientes H/V realizado por Vergara (2015), usando el registro de vibraciones ambientales en una zona cercana al lago de Chalco, permitió estimar tres unidades estratigráficas (Figura 3.4).

Unidad Estratigráfica	Espesor [m]	Velocidad “ β ” [m/s]	Densidad [T/m ³]
Arcillas lacustres	80 - 100	70 - 80	1.25
Material volcánico granular	180 - 200	400 - 420	1.85
Basaltos fracturados y sanos	500	1000	2.55

Figura 3.4 Modelo geológico estratificado de velocidad de onda de corte (v_s) (tomado de Vergara, 2015).

La primera tiene un rango de espesores comprendido entre 80-100 m, alcanzando su mayor espesor en las inmediaciones del lago de Chalco con una profundidad de 300 m, una densidad en promedio de 1.25 T/m³ y un rango de velocidad de

onda de corte de entre 70-80 m/s (Vergara, 2015). Se encuentra en la cima y la correlaciona a la unidad de arcillas lacustres propuesta por Pérez (1988).

Para la segunda unidad menciona que está comprendida entre los 180-200 m, con una densidad de promedio de 1.85 T/m^3 y un intervalo de velocidad de onda de corte de entre 400-420 m/s que corresponde a las características de un material volcánico granular.

Finalmente, la última unidad, la correlaciona con la secuencia de basalto sano y basalto fracturado de la nomenclatura de Pérez (1988), la cual estima con una densidad promedio de 2.55 T/m^3 y una velocidad de onda de corte de 1000 m/s.

Registro geofísico del pozo SLT

La información que brinda el registro geofísico de pozo representa un aporte a la descripción litológica del subsuelo. La descripción que se presenta a continuación: es la del pozo San Lorenzo Tezonco (SLT), interpretación realizada por Lezama y colaboradores (2016) y la cual es la más cercana a la zona de estudio y se muestra en la figura 3.5.

En ella presentan un análisis con base en las curvas de resistividad eléctrica y rayos gamma; que complementa con descripciones petrológicas y estratigráficas reportadas en la literatura para su interpretación. El estudio presenta tres etapas, de la cual solo presentare la primera por las características de la tesis. Para la sección de corte con el rango de 0-130 m de profundidad echan mano de las muestras recuperadas del pozo.

En ella indican que los primeros metros corresponden a una capa de arcillas lacustres, con aproximadamente 70 m de espesor. Seguida a los 80 m por un cuerpo constituido por lavas de composición andesítico-basáltica, reportada por Arce y colaboradores (2013), que se prolonga hasta una profundidad de 130 metros.

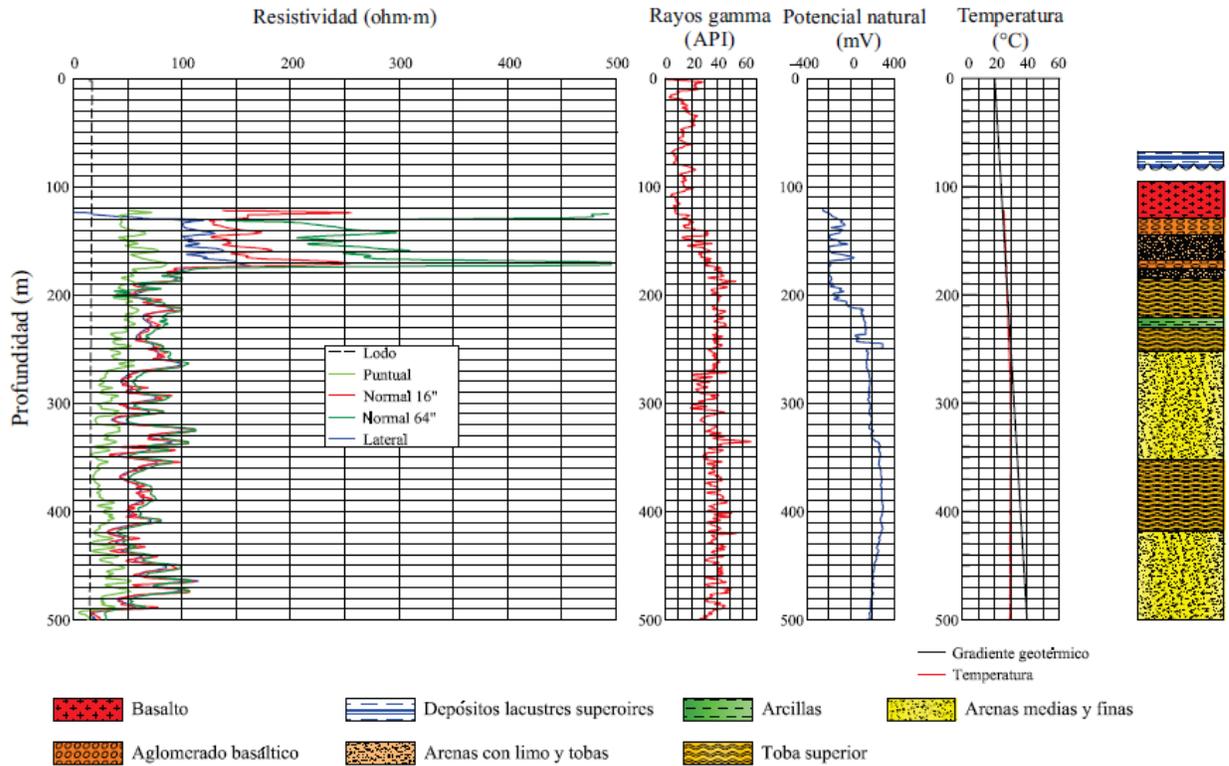


Figura 3.5 Sección del registro geofísico del pozo San Lorenzo Tezonco (130–500 m de profundidad) y la columna litológica asociada (tomado de Lezama et al. 2016).

Para la profundidad de 130-175 m y utilizando los valores de resistividad de la curva, describen una capa compuesta de material volcánico fragmentado (descrito como tezontle, gravas y basalto en los cortes de pozos cercanos), que podrían corresponder a depósitos piroclásticos de escoria y ceniza basáltica, muy característico de los conos de escoria (Lezama et al., 2016).

En esta sección también sugieren zonas permeables, probablemente debidas a fracturamiento de la lava, así como por la porosidad de los depósitos piroclásticos, los cuales son muy permeables. Esta interpretación se hace a partir de la separación en las curvas de resistividad, que podría deberse a la invasión del lodo de perforación dentro de la formación (Lezama et al., 2016).

A partir de los 175 metros y hasta los 210 metros mencionan la presencia de una capa poco permeable compuesta por arenas medias y finas con tezontle, con una

intercalación de arcilla en los 195 y 200m. La cual justifican por el comportamiento de las curvas de resistividad eléctrica y la respuesta del registro de potencial natural.

Finalmente, para el tramo entre los 210 y 500 m, basándose en la respuesta de los registros geofísicos y la invasión del lodo de perforación, los autores interpretan una zona donde predominan, las arenas medias y finas con intercalaciones de materiales heterogéneos, que corresponderían a material volcánico, piroclásticos y lavas que adicionalmente tiene un estrato de arcillas entre los 240 y 250 metros.

Los eventos eruptivos, que dieron origen a los materiales volcánicos en esta sección, son contemporáneos a la formación Chichinautzin, y recientemente han sido asociados a los eventos de la Sierra de Santa Catarina y el Cerro de la Estrella (Arce et al., 2015).

3.2 Estudios geoquímicos previos de la zona de estudio

Los estudios geoquímicos se han dedicado a definir la calidad del agua en pozos y manantiales, con respecto a normas y estándares de diversos organismos nacionales e internacionales. En ellos se define la familia a la que pertenece, de acuerdo con la clasificación del ión dominante y se menciona, si el recurso posee la calidad aceptable para consumo humano, o, si es o no, apto para algún uso específico.

La información encontrada de estos estudios en la zona es limitada, pero entre lo que existe de ella, destacan los siguientes trabajos:

1.- "*Estudio Geohidrológico y geoquímico de las aguas subterráneas de la sección de Chalco*", realizado por Molina (1959). Es el primer trabajo en realizar una interpretación geoquímica de las aguas existentes en la zona de Chalco.

El cual, en base a datos recabados de las aguas de 57 pozos y norias determinó, que en general estas aguas pertenecen al tipo químico: bicarbonatada-sulfatada-magnésica-sódica, que tienen en mayor proporción un origen de tipo meteórica.

2.- *“Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el valle de México”* de Cardona y Hernández (1995). En este trabajo, los autores identifican los procesos dominantes responsables de la evolución química del agua subterránea en el valle de México, a partir de la interpretación química de los elementos mayores y algunos elementos traza, cálculos de balance de masa e identificación de reacciones químicas entre minerales y agua subterránea.

En él, se menciona que en la subcuenca de Chalco existe una variación de las concentraciones de cloruro en los sedimentos lacustres. En particular se puede encontrar valores máximos del orden de 4000 mg/L entre los 70-85 m de profundidad que curiosamente es cercana a la que se reporta el acuitardo; y concentraciones entre 20 -100 mg/L de cloruro a profundidades someras.

También indican la presencia de reacciones importantes como la del Intercambio iónico en la matriz arcillosa del acuífero que pudiera llegar a amortiguar la movilidad en el agua subterránea, de algunos elementos traza y contaminantes. Y reacciones de oxidación-reducción que condiciona la movilidad de algunos elementos como la disminución del sulfato con un incremento paralelo del ión bicarbonato el cual se observa en pozos cercanos a la zona de estudio.

3.- El último es el realizado por Flores V. y colaboradores (2009) y se titula *“Agua potable en tres municipios del acuífero Chalco-Amecameca”*. En él se tomaron muestras a 60 pozos de agua potable en los municipios de Tlalmanalco, Chalco e Ixtapaluca y se midieron parámetros de campo y fisicoquímicos como pH, temperatura, cloro residual libre, color, turbiedad, dureza total, SDT, DBO5 y DQO con la finalidad de conocer la calidad del agua del acuífero que consume y usa la población de la región.

Sus conclusiones señalan que la concentración de sólidos disueltos totales y la concentración de dureza, presentes en el agua proveniente a las cercanías de Tlalmanalco presenta los niveles más bajos, lo cual puede obedecer a las características geológicas de la región, en donde se infiltra el agua de escurrimiento de los volcanes y una vez que ésta llega al acuífero, ha disminuido

la concentración de algunas sales que se encontraban presentes (a causa del intercambio iónico, absorción y/o adsorción en arcillas, entre otros fenómenos fisicoquímicos).

Mientras tanto el agua proveniente del acuífero Chalco-Amecameca que se encuentra en el municipio de Chalco contiene la menor concentración de materia orgánica biodegradable.

En los casos en donde el agua de los pozos rebasa los niveles permisibles de contaminantes, se encontró que en la mayoría, las concentraciones de turbiedad y el color eran altas, lo cual explica que puede deberse a factores externos, como lo son: la falta de mantenimiento de los pozos, fallas de planeación en la adquisición de faltantes y/o refacciones para operar eficientemente el pozo.

4.- Por último, existe también la descripción Hidrogeológica de CONAGUA (2012) donde se caracteriza el tipo de acuífero y la clase química a partir del análisis de agua de diversos pozos. Y que para su entendimiento se muestra en la Tabla 3.1.

En ella se detallan algunos parámetros que ayudan a inferir la conducta hidrogeoquímica del acuífero.

NO.	NOMBRE	TEMPERATURA [C°]	TIPO DE ACUIFERO	SABOR	FAMILIA	OBSERVACIÓN
1	Santa Catarina	21.8	Libre	Salada	Sódica-Sulfatada Bicarbonatada	El agua es de color verde, se envía a filtros.
2	San Marcos	22	Libre	Dulce	Mixta- Bicarbonatada	Se ubica en un ligero lomerío.
3	Chalco No. 8	21	Confinado	Dulce	Mixta- Bicarbonatada	Localizado en relleno aluvial, al norte de Chalco.
4	Amalinalco	24.2	Libre	Dulce	Magnésica Sódica- Bicarbonatada	La muestra se toma de estanque.
5	San Luis	16.4	Confinado	Dulce	Mixta- Bicarbonatada	Zona de transición roca-material lacustre.
6	Volcanes	19.2	Libre	Dulce	Mixta- Bicarbonatada	La muestra se toma tanque de almacenamiento.
7	Xotepingo	15.4	Libre	Dulce	Sódica- Bicarbonatada	Ubicado en un medio fracturado (basaltos).
8	Álamos	18.4	Libre	Dulce	Mixta- Bicarbonatada	- - - -
9	Purísima	21.8	Libre	Salada	Sódica-Mixta	El agua se envía a filtros de carbón.

10	Chimalpa	18.9	Libre	Salada	Sódica-Bicarbonatada	El agua se filtra y presenta un ligero color amarillo.
11	Tecomitl	16.7	Libre	Dulce	Sódica-Bicarbonatada	El agua presenta ligero olor a materia orgánica y color verde.
12	Temamatla	18.4	Libre	Dulce	Magnésica Sódica-Bicarbonatada	Localizado en el centro de la localidad, en un relleno aluvial.
13	Tlachique	19.6	Libre	Dulce	Mixta-Bicarbonatada	Localizado en un posible basalto fracturado.
14	Amecameca	15.3	Libre	Dulce	Mixta-Bicarbonatada	Perforado al lado del cerro Sacromonte (basaltos).
15	Ayapango	16	Libre	Dulce	Mixta-Bicarbonatada	Ubicado a un lado de granja y rastro.

Tabla 3.1 Resultados del análisis geoquímico de 15 pozos de la subcuenca Chalco-Amecameca.

3.3 Estudios hidrogeológicos previos de la zona de estudio

1. “*Estudio geohidrológico y geoquímico de las aguas subterráneas de la sección de Chalco*”, realizado por Molina (1959). Este estudio señala en base a la concentración y el análisis geoquímico de Sólidos Totales, Zinc, Boro y Cloruros, el comportamiento del flujo en la zona sur de la cuenca, el cual es en dirección a Amecameca.
2. “*Aspectos geohidrológicos de la Ciudad de México*”. Realizado por Lesser y colaboradores (1990). Se divide el funcionamiento de la cuenca de México en tres subsistemas. Uno de ellos, el perteneciente a la zona de Xochimilco-Tlahuac-Chalco, se caracteriza como un acuífero que incluye un paquete de aluviones en su parte central y basaltos con piroclástos en las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin.
3. Niedzielski (1991) con su trabajo “*Sección Hidrogeológica a través del valle de Chalco, México*”. Realizó la medida de diversos parámetros hidrogeológicos, donde destacan los siguientes valores un coeficiente de conductividad de 5.45×10^{-5} m/s, transmisividad de 1.08×10^{-2} m²/s, porosidad efectiva de 0.144 y una extracción de 7.5 l/s. Para trece pozos ubicados en el Ramal Mixquic-Santa Catarina.

4. Años posteriores Ramírez (1995), analizó la relación entre el acuífero y el acuitardo, así como las condiciones hidráulicas en la subcuenca Chalco. Sus resultados obtenidos con la medición de 15 piezómetros determinaron que el movimiento preferencial del agua subterránea es descendente.
5. Vargas en 1995 con su estudio titulado "*La distribución de la conductividad hidráulica en el acuitardo lacustre de la subcuenca de Chalco*". Menciona en base a 136 pruebas piezométricas de recuperación en la unidad correspondiente al acuitardo, que la conductividad hidráulica disminuye a medida que aumenta la profundidad Asociando valores de K de 6.6×10^{-8} m/s para los primeros 25 m de arcilla y de 2.8×10^{-10} m/s para los 25-50 cm. Según el estudio el contraste entre la conductividad hidráulica medida y la de la matriz es por la presencia de fracturas.
6. Por otra parte el "*Modelo conceptual hidrogeológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la Cuenca de México*", trabajo de tesis realizado por Vázquez (1995), en el cual define el modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca de México, indica que el máximo espesor del acuitardo es de 120 m en el centro de la planicie de Chalco y coloca al acuífero superior a una profundidad que puede variar entre 400 y 600 m.
7. En "*La sinopsis piezométrica del Valle de México en el año 2000*". Lesser y Asociados (2000) calcularon una sobreexplotación del 19% para el acuífero de Chalco y un drenado vertical de las arcillas que recargan el acuífero en la zona de Chalco de $0.58 \text{ m}^3/\text{s}$.
8. Haciendo hincapié a los procesos de recarga del acuífero el estudio de Ángeles y colaboradores (2003) concluyó con la importancia de la recarga relativa del límite de la sierra Chichinautzin por medio de afluencias laterales más allá de los límites superficiales de la cuenca.

9. En (2004) Vargas y Ortega analizaron la distribución de la conductividad hidráulica en la llanura de Chalco, a partir de 225 ensayos con piezómetros múltiples ubicados a 2 y 85 m de profundidad. Demostrando la presencia de tres acuíferos con espesores promedios de 20-30 m y conductividades hidráulicas de 2.2×10^{-11} y 2.0×10^{-7} m/s para dos de ellos y de 1.0×10^{-9} m/s para el tercero.

Concluyendo que la conductividad hidráulica no es tan baja como la litología sugiere. Debido al fracturamiento, esta unidad no representa una barrera para la circulación de contaminantes para la subyacente unidad, por lo que esta indefensa a una posible contaminación.

10. Complementando el estudio de Ángeles y colaboradores (2003), y de acuerdo con lo realizado por Carrera y Gaskin (2008) al sistema acuífero de la Cuenca de México por medio de un análisis espaciotemporal de la recarga de los acuíferos.

Este mostró que el crecimiento urbano no afectaba la recarga en la parte central, y demostró que las montañas que encierran a la cuenca de México son las principales zonas de recarga del sistema acuífero regional, en particular la perteneciente al sur de la cuenca la cual tiene la mayor recarga por la topografía y permeabilidad de su litología.

11. Por último, los resultados del registro litológico y eléctrico del pozo San Lorenzo Tezonco, hicieron que Morales y colaboradores (2014) definiera dos unidades importantes para la caracterización de este trabajo.

La primera unidad, la definen como un acuífero compuesto por depósitos lacustres que se encuentran de 0 a 70 metros de profundidad, constituidos por sedimentos finos (arcillas y limos intercalados con depósitos fluviales) y un acuífero superior con profundidades que irían de los 70 a los 500 metros de profundidad compuesto de materiales vulcano-sedimentarios.

Pruebas de bombeo

Las pruebas hidráulicas en acuíferos (llamadas pruebas o ensayos de bombeo, representan una parte fundamental en la planeación, gestión y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento del agua subterránea y en las estrategias de remediación de acuíferos (Luna, 2017).

Los acuíferos de la zona tienen comportamientos hidráulicos de tipo libre y semiconfinado. La profundidad del nivel estático varía de 60 a 170 metros (año 2012) (Hernández-Espriú et al., 2014).

Siendo de mayor importancia para la extracción de agua, los primeros 300 metros (Herrera et al., 1989). La conductividad hidráulica presenta una fuerte anisotropía, siendo el valle de Chalco donde se ubican los valores más bajos de conductividad 8.64×10^{-8} m/seg (Rodolph et al., 1991).

A continuación, se presenta el análisis derivativo de tres pruebas de bombeo en los pozos (Vivero 1-B, Ramal Mixqui-Santa Catarina y Tecómitl) localizados en la figura 2.8, realizadas por Luna, 2017 ejecutadas a caudales constantes que varían de 3067.2 a 4688.2 m³/día, con duración de 12 a 18 horas y una profundidad de los pozos analizados que varía de 75 a 400 metros (Tabla 3.2).

Para los pozos Vivero 1-B y Ramal Mixqui-Santa Catarina los resultados presentados en las figura 3.6 y 3.7, muestran, para el primero, una geometría de flujo esférico que representa un pozo parcialmente penetrante debido a su alto espesor saturado.

Y para el segundo, una geometría de flujo bilineal al inicio de la prueba que indicaría un flujo controlado por fracturas de conductividad finita y un régimen de flujo en estado pseudoestacionario al final de la prueba, usualmente causada por la entrada de agua de un acuífero asociado o por la inyección de agua.

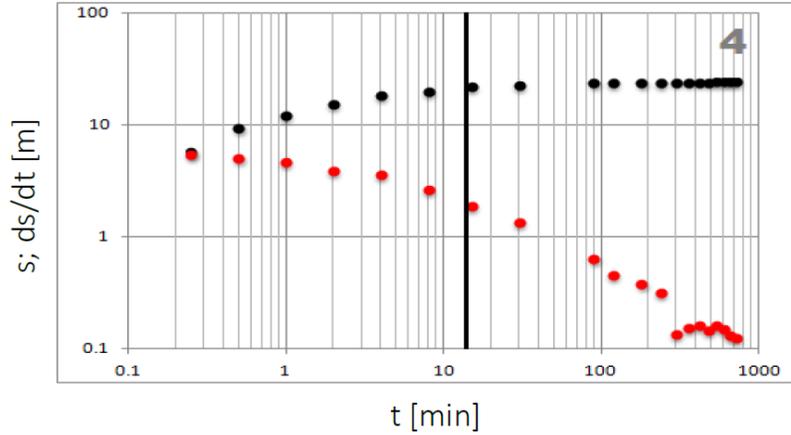


Figura 3.6 Identificación de geometría de flujo del pozo Vivero 1-B (tomado de Luna, 2017).

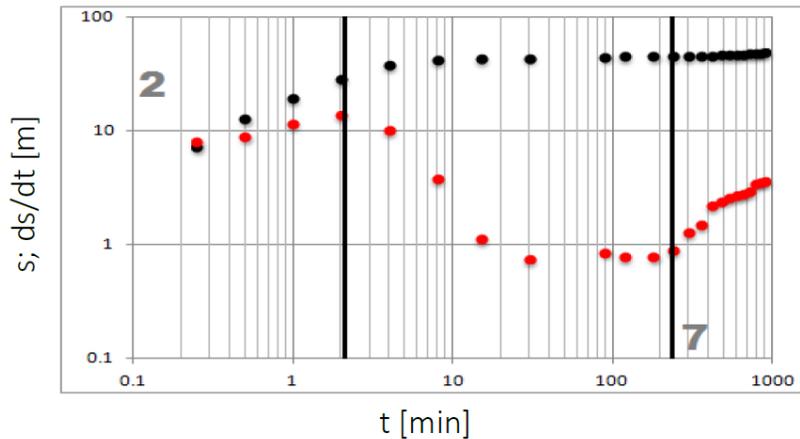


Figura 3.7 Identificación de geometría de flujo del pozo Ramal Mixqui-Sta. Catarina (tomado de Luna, 2017).

Por último, para la interpretación de la prueba realizada en el pozo Tecómitl, la autora identificó una geometría de flujo con régimen lineal a partir del minuto 120, y que predominó hasta el final de la prueba. Como el pozo se encuentra situado en una zona montañosa, supone que el flujo podría estar controlado por el fracturamiento de las rocas ígneas que afloran en la Sierra del Chichinautzin. Por lo que propone el argumento que la existencia de fracturamiento es por el decaimiento e inmediata recuperación de la derivada en el minuto 90, indicativo de una porosidad secundaria y con la cual obtuvo una transmisividad promedio de $6.93 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}$ (Figura 3.8).

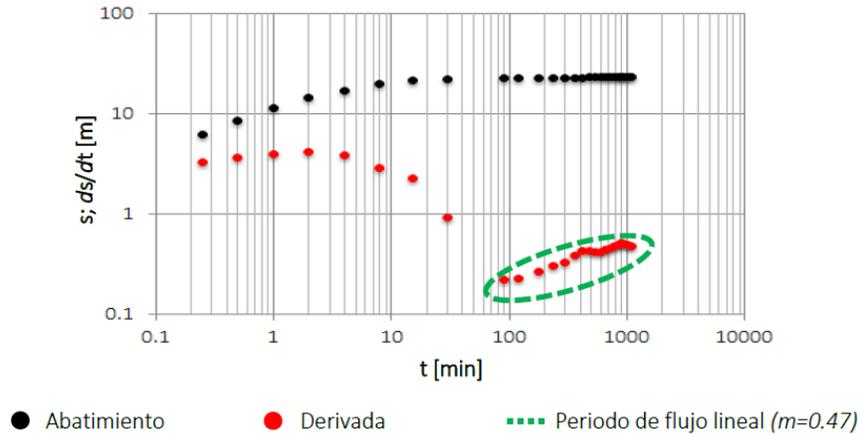


Figura 3.8 Identificación de geometría de flujo del pozo Tecómitl (tomada de Luna, 2017).

La aplicación de esta técnica, de análisis derivativo, permite obtener aproximaciones de las propiedades de la unidad hidrogeológica en estudio y además, es útil para realizar inferencias con relación al comportamiento hidráulico de dicha unidad (Renard, 2005). También, es muy útil para conocer de qué zona, del acuífero granular o fracturado, se está extrayendo agua (Luna, 2017).

NOMBRE	[Q] m ³ /día	[t] hr	GEOMETRIA	MODELO CONCEPTUAL INFERIDO	MODELO DE AJUSTE	[T] REPORTADA m ² /s	[T] C/AJUSTE m ² /s	RMSE	OTROS PARÁMETROS CALCULADOS
Vivero 1-B	3067. 2	12	*Flujo Esferico [15-720 min]	Semiconfinado con pozo parcialmente penetrante	Neman- Witherspoon (1969)	2.29x10 ⁻³	6.02x10 ⁻⁴	0.24	KS= 4.65x10 ⁻⁵ m/s
Ramal Mixqui Sta. Catarina	4688. 2	15	*Flujo Bilineal [0.25-2 min] *Estado pseudo- estacionario [240-900 min]	Semiconfinado con doble porosidad	Moench (1997)	1.81x10 ⁻³	1.08x10 ⁻³	0.57	Kf b= 0.22 (m/día) m; A= 13709.39 m ²
Tecómitl	3542. 4	18	*Flujo Lineal [120-1080 min]	Confinado con pozo parcialmente penetrante	Hantush- Jacob (1955)	2.97x10 ⁻³	6.93x10 ⁻⁴	0.27	-----

Tabla 3.2 Datos generales de las pruebas de bombeo, análisis paramétrico y no paramétrico. Donde PT: Profundidad total del pozo de bombeo; Q: Caudal de extracción; K_fb: Conductividad hidráulica de la fractura; K_s: Conductividad hidráulica esférica y A: Área de drene (tomado de Luna, 2017).

3.4 Evolución histórica de los niveles estáticos

Contexto histórico del lago del Chalco

Como antecedentes del lugar, existe información en la época de la conquista, que afirma la existencia de un lago en la zona, el cual conectaba con Xochimilco y era perteneciente al sistema lagunar de la Cuenca de México. La figura 3.9 es una pintura realizada en el año de 1861 y muestra, lo que asemeja a la sierra Sta. Catarina y el volcán de Xico, y un vasto lago, que presumimos es el ex-lago de Chalco. Esto hace suponer que el nivel freático de la época era superior al nivel de terreno, teniendo como consecuencia la formación de un lago natural.



Figura 3.9 Camino a Chalco con los Volcanes (1891), José María Velasco (tomado de [http:// www.wikiart.org](http://www.wikiart.org)).

Elevación y evolución del nivel estático para 1988

Huizar (1992), en su publicación “Simulación matemática del sistema acuífero Chalco-Amecameca” elaboró la configuración piezométrica para el año 1988, a partir de la medición del nivel estático de diversos pozos existentes en esa fecha. La cual tuvo que ser digitalizada para su representación (Figura 3.10), en ella se puede observar que el flujo es en dirección a la Sierra Santa Catarina, algo extraño considerando el nivel del terreno de la zona.

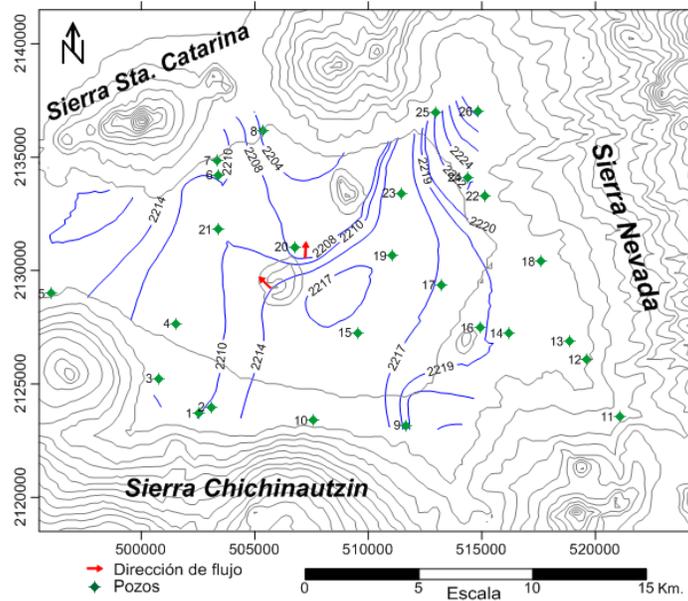


Figura 3.10 Elevación del nivel estático (modificada de Huizar, 1988).

Elevación y evolución del nivel estático para 1996

Utilizando la información de CONAGUA, (1996) (Tabla4. Anexo) la cual se consideró como una base de datos anual representativa, debido a que no indica el mes del monitoreo, se realizó una interpolación mediante el método de kriging y como se observa en la figura 3.11, el flujo tiene un cambio hacia Chalco, además de tener un abatimiento considerable en los niveles, en esa misma zona.

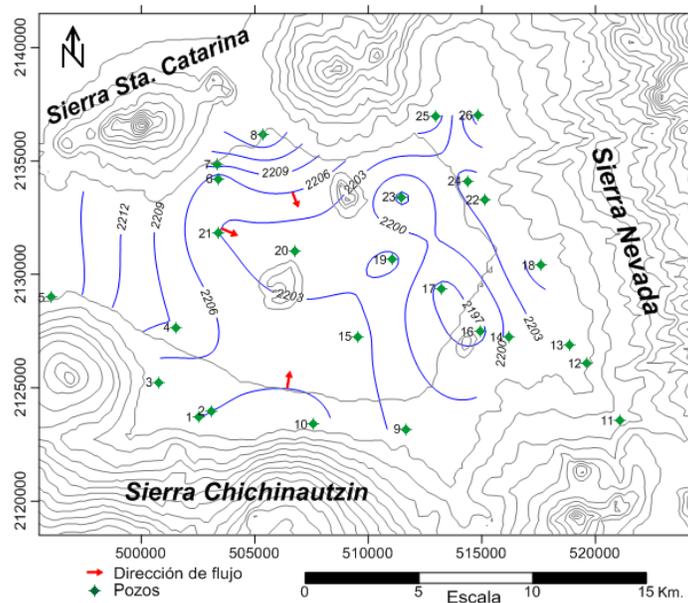


Figura 3.11 Elevación del nivel estático (modificada de CONAGUA, 1996).

Elevación y evolución del nivel estático para 2009

Con la información proporcionada por CAEM, (2009) (Tabla5. Anexo), también se realizó una interpolación mediante el método de kriging, la cual se muestra en la figura 3.12, y donde se manifiesta un flujo descendente hacia el municipio de Chalco, a lo igual que un abatimiento de los niveles considerable.

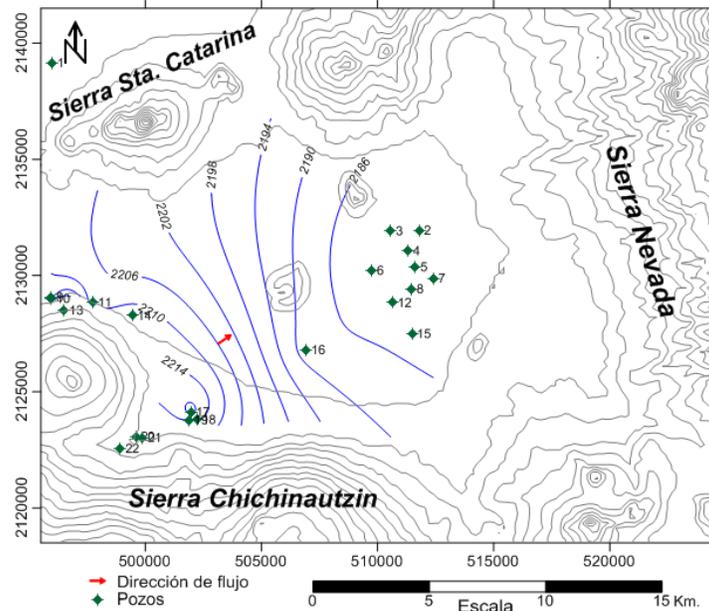


Figura 3.12 Elevación del nivel estático (modificada de CAEM, 2009).

Elevación y evolución del nivel estático para 2016

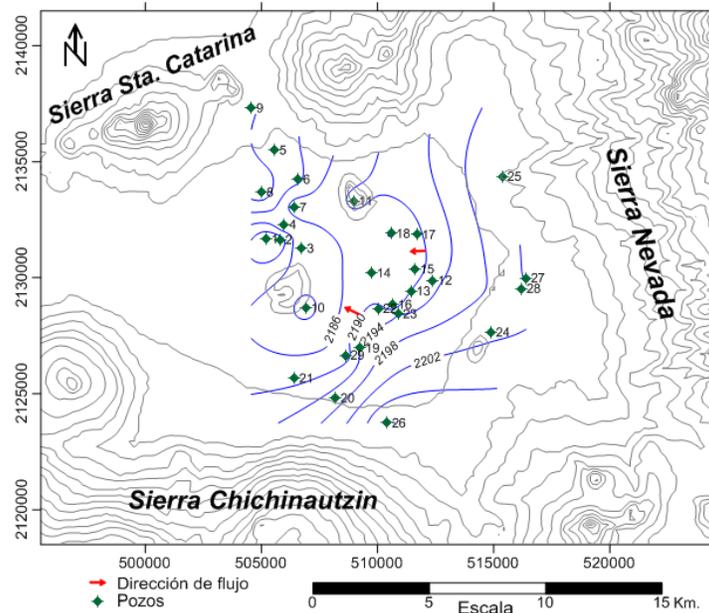


Figura 3.13 Elevación del nivel estático (modificada de ODAPAS, 2016).

Por último, y a lo igual que las configuraciones anteriores, la información proporcionada por ODAPAS, (2016) también se trabajó mediante el método de kriging. Los resultados obtenidos (Figura 3.13) muestran un abatimiento que se recorrió hacia el Valle de Chalco y un flujo que corre en dirección de la Sierra Santa Catarina a Chalco, la falta de información en el poniente impide conocer más relaciones.

3.5 Unidades hidrogeológicas propuestas y modelo conceptual

El agua subterránea que se extrae del acuífero de la subcuenca Chalco-Amecameca proviene de una unidad vulcano-sedimentaria granular y de una unidad volcánica fracturada. Y que en términos hidrogeológicos sería considerado como un sistema acuífero.

Diversos autores (Arce et al., 2013, 2015, García-Palomo et al., 2008; Macías et al., 2012), mencionan que los eventos del Plio-Cuaternario están constituidos por lavas de composición variable, desde andesita-basáltica a dacita, ignimbritas, conglomerados y brechas volcánicas procedentes de las Sierras Chichinautzin, las Cruces y Nevada (González et al., 2015).

Se puede concluir que la información sobre la litología de los materiales que constituyen el relleno de la cuenca de México descrito anteriormente Pérez (1988); Arce et al. (2013) indica que el mayor espesor de materiales acumulados corresponde a sucesiones del Mioceno al Cuaternario (González et al., 2015) y posiblemente sea el que conforma el acuífero superior de la subcuenca Chalco-Amecameca.

Aunque Arce et al. (2013) y (2015), indica que la agrupación de las unidades volcánicas propuesta por Pérez (1988) no es del todo funcional para realizar correlaciones de mayor detalle con unidades estratigráficas del entorno de la Cuenca de México.

A continuación, se tratara de definir las unidades hidrogeológicas más importantes de la subcuenca Chalco-Amecameca, que serán utilizadas para la construcción

del modelo en Visual MODFLOW, así como el sistema superficial y subterráneo que se esperaría tener en la zona según la conceptualización de la información recopilada y que se representa en un modelo conceptual (Figura 3.14).

1.- La primera unidad hidrogeológica, será considerada como una capa que se compone principalmente de aportes sedimentarios fluviales y lacustres pertenecientes a la unidad litológica del Alogrupo Tenochtitlán.

2.- La segunda, se inmiscuye dentro de la primera, es un acuitardo compuesto de arcillas, que, por su pérdida de presión de poro y alta compresibilidad, debido a la extracción de su agua, son las causantes del hundimiento del terreno.

3.- En la tercera unidad hidrogeológica “acuífero granular”, se podría hablar de la existencia de depósitos asociados a procesos de arrastre glacial producto del trabajo de las glaciaciones y desglaciaciones de los últimos miles de años, (M. Caballero, 2018, comunicación personal) las cuales podrían ser las causantes de gran espesor de la unidad en zonas como Chalco.

Por su carácter permeable y de acuerdo con sus relaciones estratigráficas, esta unidad contendría también una mezcla de materiales del Grupo Chichinautzin y del Grupo Popocatepetl, principalmente aquellas sucesiones de productos piroclásticos de actividad explosiva. Y es el lugar donde actualmente se extrae mayormente el agua para la subcuenca.

4.- La cuarta unidad “acuífero fracturado”, lo constituyen en parte las secuencias de roca fracturada de actividad volcánica efusiva de composición andesítica del Grupo Popocatepetl y las del Grupo Chichinautzin, en este último Arce y colaboradores (2013) y (2015) mencionan, que se integra principalmente de rocas masivas y fracturadas con composición basáltica y andesítica que son asociadas a los eventos de formación de la sierra Santa Catarina y a la aparición del sistema de volcanes monogenéticos de la zona.

5.- Tomando como referencia la información gravimétrica y litológica de pozo, la última unidad y límite inferior del acuífero superior. Sería la constituida dentro de la

Unidad Volcánica Superior que tiene como límite superior la formación Iztaccíhuatl. Se propone que dicha formación corresponde al basamento, ya que se distingue por ser secuencias efusivas cuya composición varia de andesítica basáltica a andesítica, que se asimilan al basalto masivo reportado en las perforaciones de la CAEM al llegar a profundidades de los 400 m, al materia ígneo y límite de la (UVS) y el cual podría corresponder a las andesitas que aflora en la superficie de la sierra Nevada.

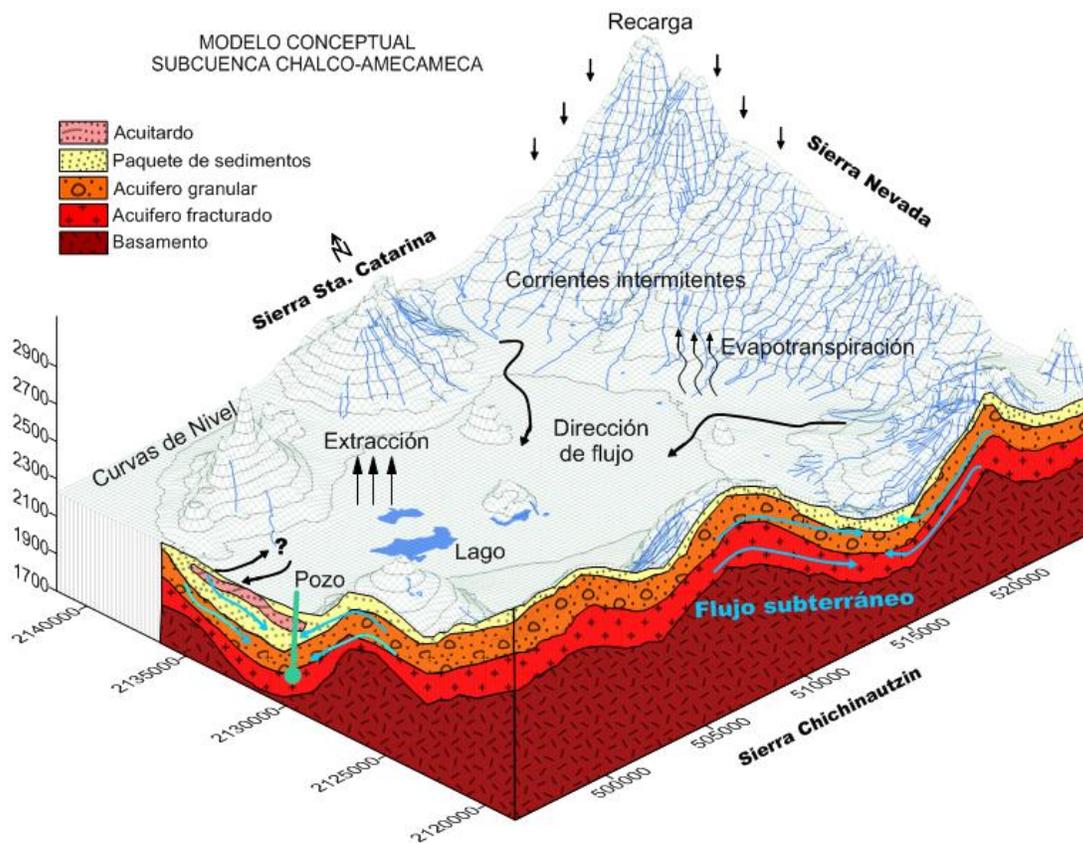


Figura 3.14 Modelo conceptual de la subcuenca Chalco-Amecameca.

CAPÍTULO IV

Modelo del flujo subterráneo

Este capítulo se enfoca a resolver los objetivos del estudio, utilizando el software comercial Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic, 2015), que como se explicó en capítulos anteriores es utilizado para la simulación del flujo del agua subterránea. Dicho modelo se presenta como un medio anisótropo y heterogéneo, con flujo de tipo saturado y densidad constante.

Con la información recopilada de trabajos previos, se construyó el modelo en Visual MODFLOW. Con disciplinas como la geología, se detalló el tipo de rocas involucradas en el acuífero; la geofísica permitió, a partir de los estudios de exploración conocer la forma, la profundidad y las propiedades de los estratos que constituyen el subsuelo, y que también permiten establecer y confirmar la presencia de estructuras geológicas.

Antes de continuar, debo resaltar que esta investigación sintetiza un esquema básico de los estudios antes mencionados. Evidentemente el contexto geográfico, socioeconómico y problema que intente abordar, condiciona la disponibilidad de los medios y materiales con que aborde la investigación. Por lo que algunas veces solo se trabaja con la información disponible y no se obtienen los resultados deseables.

4.1 Geometría del modelo

Los límites del modelo (forma y geometría) se definieron inicialmente teniendo cuenta la información previa del lugar, y con ayuda del análisis del terreno se pudo identificar las fronteras naturales que imponen el relieve y así inferir la posible dirección de flujo preferencial del agua. Así entonces en la (Figura 4.1) se muestra la geometría del área que abarca el modelo y en la tabla 4.1 las coordenadas que forman el polígono.

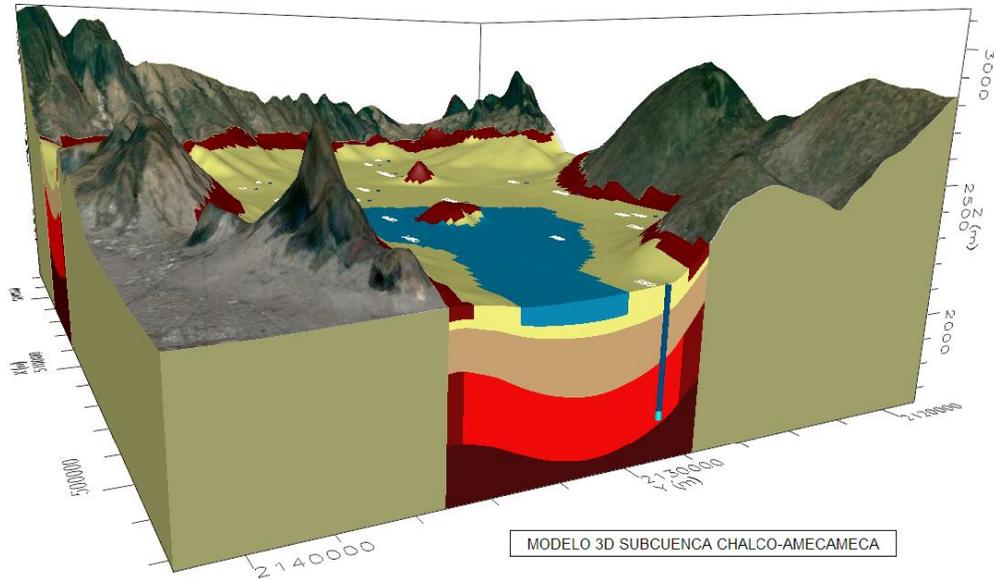


Figura 4.1 Geometría modelada en Visual MODFLOW.

La construcción del mallado se hizo con cuatro estratos (capítulo 3) y un acuitardo intermitente en un área de 667 km², en donde se concentra la mayor cantidad de información. Con un arreglo de 110 números de filas y 145 números de columnas, las dimensiones en cada celda es en Δx de 200 metros y en Δy de 209.09 metros, lo que hace que cada celda tenga un área de 41818 m².

EJE	(m)
X mínima	495500
X máxima	524500
Y mínima	2118500
Y máxima	2141500
Z mínima	1689.64
Z máxima	3170.41

Tabla 4.1 Coordenadas y altura del área modelada.

4.2 Capas que conforman el modelo

Para la representación del modelo, se consideró un total de cinco capas (Tabla 4.2), la capa inferior llamada basamento cumple la condición de medio poroso impermeable. Esto sugiere un estrato rocoso con una capacidad de flujo cercana a cero.

En el caso de las capas restantes, las condiciones prevalecientes, son las de un medio poroso permeable. Donde las capas rocosas o material no consolidado, son lo suficientemente poroso para almacenar agua y suficiente permeables para permitir que el agua fluya a través de ella, en cantidades deseables.

UNIDAD	DESCRIPCIÓN	COMPOSICIÓN	POSIBLE ORIGEN	PROFUNDIDAD PROMEDIO [m]	REFERENCIAS
1	Acuitardo	Arcillas	Alogrupo Tenochtitlán y depósitos por arrastre glaciario.	0 - 60	Pérez (2009)
2	Depósitos lacustres y aluviales	Arenas volcánicas, ceniza, limos, arcillas con porciones de lavas de composición andesítica-basáltica con tobas		60 - 160	Vázquez (1995) Vergara (2015)
3	Material volcánico fragmentado (Acuífero granular)	Material volcánico, piroclásticos de escoria, lavas basálticas, tezontle, gravas, tobas y ceniza basáltica	Grupo Popocatepetl y grupo Chichinautzin	160 - 320	Chouteau y Krivovhieva (2002) Lezama et al. (2016)
4	Roca volcánica fracturada (Acuífero fracturado)	Basaltos de características vesiculares, masivas y fracturadas.		320 - 500	Registro litológico CAEM (1989) Chouteau et al. (1994)
5	Roca volcánica masiva (Basamento)	Lavas maficas a felsicas cuya composición varía de basáltica andesítica.	Formación Iztaccíhuatl	500 - >	Chouteau et al. (1994) Campos (1997) Vergara (2015)

Tabla 4.2 Capas que conforma el modelo.

En la primera capa se produce la recarga y la evapotranspiración, en esta misma capa se tiene la presencia de sedimentos lacustres y la región denotada como acuitardo, de baja conductividad hidráulica.

El segundo estrato, es una capa que tiene la peculiaridad de ser donde el nivel freático varía según los niveles de recarga y extracción en el acuífero, donde hay materiales porosos con conductibilidades hidráulicas altas (medio permeable).

El tercer estrato tiene similitud con la capa 1, debido a que dentro de él existen regiones con variaciones en la conductividad hidráulica producto del elevado fracturamiento de la roca, y donde las condiciones de flujo tienden a disminuir a medida que se va acercando al basamento. También es el estrato y limite, a donde llegan en promedio los pozos de abastecimiento.

Y el último, el estrato inferior (basamento), caracterizado como un material poco permeable, donde existe la presencia de basalto masivo y representado como el principal contenedor.

Los estratos para la construcción del modelo fueron confirmados y determinadas a partir de los métodos geofísicos de exploración, registros geofísicos y litológicos de pozos, así como de la literatura registrada en los antecedentes y su representación se observa en los cortes de las figura 4.2 y 4.3.

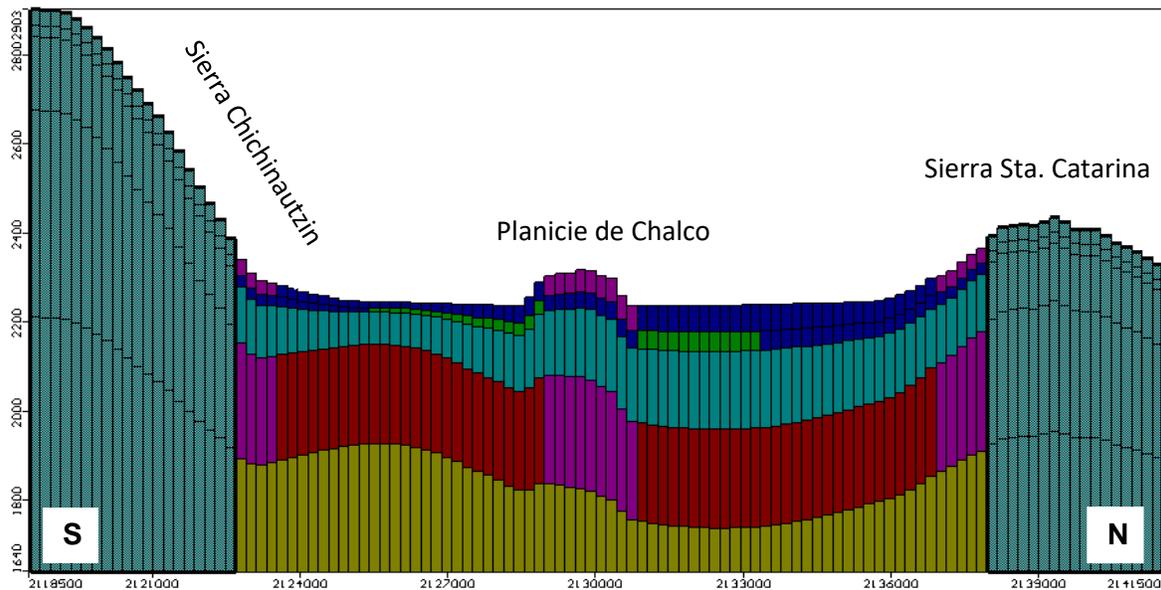


Figura 4.2 Corte transversal S-N columna #58 de las capas del modelo.

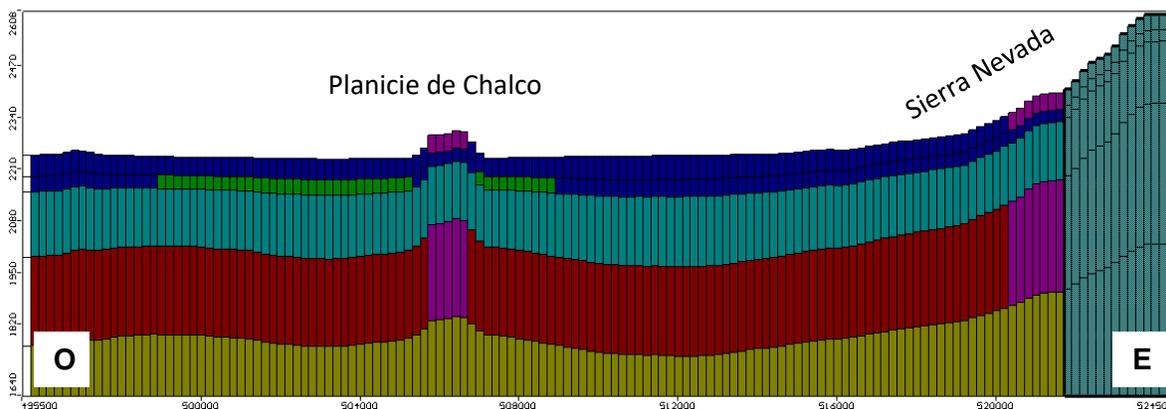


Figura 4.3 Corte transversal O-E fila #60 de las capas del modelo.

4.3 Parámetros hidrogeológicos

La conductividad hidráulica, el almacenamiento específico, el rendimiento específico y la porosidad total fueron obtenidos de la literatura de Niedzielski (1991); Vargas-Cabrera (1995); Vargas y Ortega (2004); Flores (2006); Flores (2007) y Luna (2017), para cada tipo de material existente en cada capa y que se muestran en la tabla 4.3.

Capa		Litología	(Kx,Ky) Conductividad Hidraulica (m/s)	(Kz) Conductivida d Hidraulica (m/s)	(Ss) Almacenamiento especifico (m ⁻¹)	(TP) Porosidad total (%)	Referencia
1	Zona 1	Sedimentos lacustres y aluviales	2x10 ⁻⁶	5x10 ⁻⁵	0.0005	0.18	Vargas (1995); Vargas & Ortega (2004); Flores et al. (2007)
2 (Acuitardo)	Zona 1	Arcillas, limos y cenizas	1 x10 ⁻⁷	6.6 x10 ⁻⁶	0.00005	0.35	Vargas (1995); Vargas & Ortega (2004); Flores et al. (2007)
3 (Acuifero)	Zona 3	Material volcanico fragmentado y conglomerados	9.16x10 ⁻⁵	4.65x10 ⁻⁴	0.01	0.18	Flores et al. (2006); Luna (2017)
4 (Acuifero fracturado)	Zona 4	Basaltos vesiculares, masivos	4.52x10 ⁻⁴	5.45x10 ⁻³	0.00005	0.14	Niedzielski (1991); Luna (2017)
	Zona 5	Basaltos vesiculares, masivos fracturados	2.54x10 ⁻⁴	3.96x10 ⁻³	0.00005	0.2	Flores et al. (2006); Luna (2017)
5 (Basamento)	Zona 6	Lavas masivas con composición maficas a felsicas cuya composición varia de basáltica andesítica.	1 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁸	0.000001	0.05	Flores et al. (2007)

Tabla 4.3 Propiedades hidrogeológicas atribuidas para el modelo.

Recarga y Evapotranspiración

La recarga y evapotranspiración del modelo se asigna siempre en la primera capa, y fueron los calculados en el balance hidrogeológico de Birkle et al. (1998), y que se muestran en la Tabla 4.4. Cabe mencionar que a la evapotranspiración se le asignó una profundidad de extinción de 5 metros, ambos ajustados en el proceso de calibración. Este valor ha sido probado por Khon (2009) y tuvo efectividad.

REGIÓN		RECARGA (mm/yr)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm/yr)
Sierra Nevada	Montañas	238.05	561.95
	Estribaciones	122.33	527.67
Sierra Chichinautzin	Montañas	314.07	575.93
	Estribaciones	823.61	626.39
Sierra Santa Catarina		139.82	510.18
Planicie de Chalco		124.22	475.9

Tabla 4.4 Recarga y evapotranspiración del modelo.

4.4 Condiciones iniciales

Para resolver la simulación de flujo, Visual MODFLOW requiere una distribución de cargas iniciales. Una buena distribución en la simulación puede reducir significativamente el tiempo de ejecución requerido. Para este modelo los valores de distribución de carga hidráulica iniciales fue la elevación del terreno, con la cual se pretendió simular un estado estacionario.

Posteriormente para el año 1988 se utilizó el resultado del periodo del estado estacionario y así subsecuentemente para cada simulación, cabe mencionar que el periodo más extenso y demorado fue entre el estado estacionario y el año 1988 con un total de 35, 405 días.

4.5 Condiciones de frontera

Cada modelo requiere un conjunto adecuado de condiciones de contorno para representar la relación del sistema con los sistemas circundantes. En el caso de un modelo de flujo de agua subterránea, las condiciones de contorno describirán el intercambio de flujo entre el modelo y el sistema externo.

La condición de contorno asignada a lo largo de los bordes exteriores del dominio del modelo fue la GHB (General-Head) que tiene un comportamiento similar a una frontera Dirichlet, (Figura 4.4). Esto implica que se debe cuidar el flujo, que esta frontera aporta al sistema.

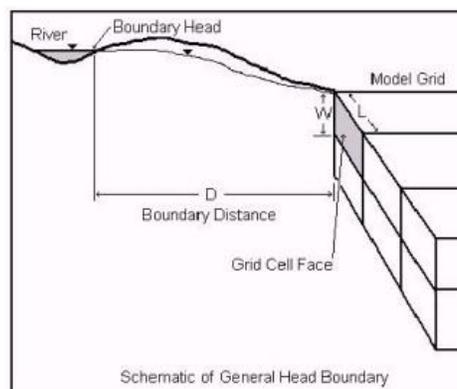


Figura 4.4 Comportamiento de la condición de Frontera GHB.

Por falta de información, se utilizó la diferencia del nivel del terreno en las fronteras norte y sur en vez de la carga hidráulica para alimentar la frontera, utilizando el argumento de que las condiciones topográficas del lugar contribuyen a un aporte de flujo en su mayoría por gravedad y que son las que prevalecerán en los límites modelo. De acuerdo a su funcionamiento hidrogeológico la frontera poniente se presenta como un lugar donde el flujo cambia de dirección dependiendo del dato de carga hidráulica entre la entrada y salida de la frontera.

A excepción del primer periodo (estado estacionario), donde dichas condiciones fueron modificadas de tal manera que asemejaran las características de conexión de esa época. Cabe mencionar que las fronteras asignadas al área modelada son artificiales y corresponden a las zonas de entrada y salida del flujo del sistema acuífero.

4.6 Modelo de flujo en estado estacionario

Para predecir escenarios futuros, es indispensable llevar primero una simulación a un lapso que reproduzca la condición de un estado estacionario, esto para obtener las condiciones iniciales que será utilizada para el período subsecuente.

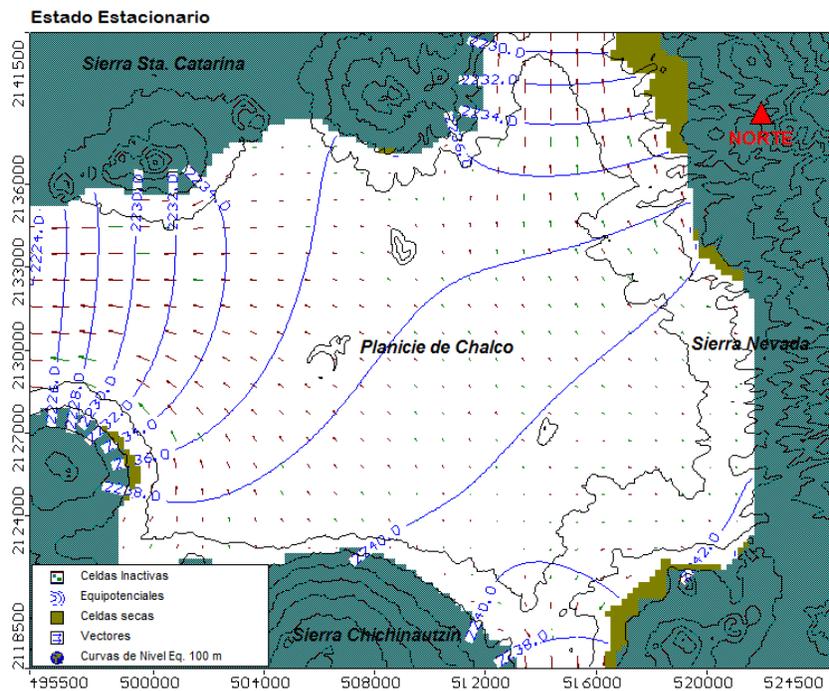


Figura 4.5 Modelo de Flujo en estado estacionario.

Los valores de los parámetros hidrogeológicos, con los que realizó esta configuración del estado inicial del acuífero (sin extracción de agua) e introducidos en el programa Visual MODFLOW, son los mismos utilizados para la simulación en estado transitorio.

En este primer periodo (Figura 4.5), se muestra un escenario donde la zona de Tlahuac y Valle de Chalco serian de inundación con niveles de entre 3 y 6 m superiores a la superficie topográfica y con condiciones de flujo que indican la conexión con el lago de Xochimilco. Esto se confirmaría con las descripciones históricas del lugar, que nos dice la existencia de un sistema lagunar.

4.7 Pozos

El acuífero cuenta con un registro 113 pozos según el REPDA, de estos no se conoce con precisión su ubicación, profundidad, altura de brocal, medidas piezométrica, así como sus tasas de extracción de todos ellos. Para la simulación del modelo se utilizara un menor número de pozos, pero con un gasto de extracción equivalente al total de pozos existentes en el acuífero, siendo probada por Flores et al. (2006), con buenos resultados.

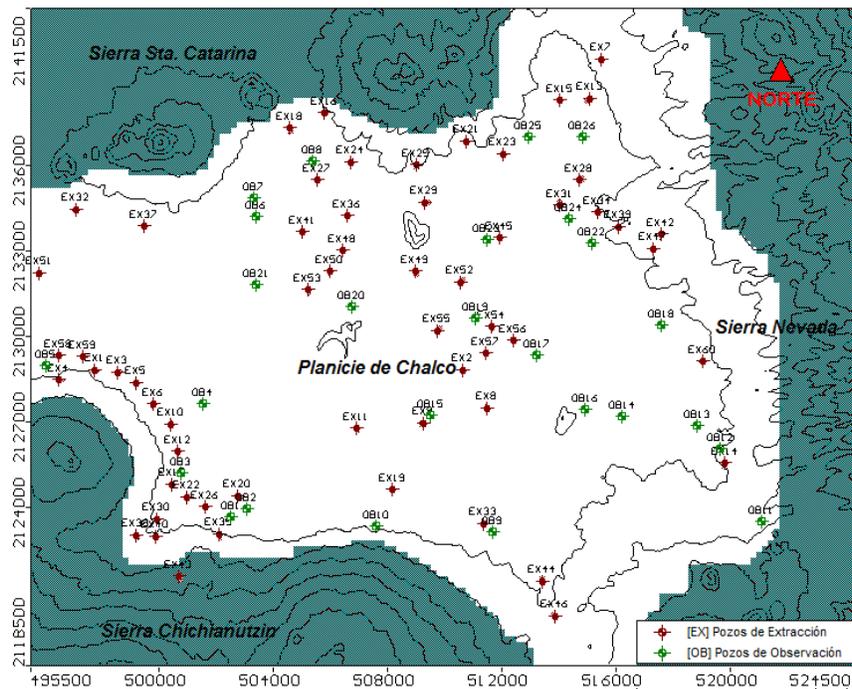


Figura 4.6 Localización de los pozos de extracción y observación.

Pozos de observación

Para la calibración del modelo, de los 113 pozos presentes en la zona de estudio, se utilizó la ubicación de los 26 pozos con registro obtenido de la Red de Monitoreo Piezométrico a cargo de la CONAGUA (1996) e información a partir del año de 1988. Que sirvió como referencia para relacionar las medidas observadas y calculadas.

Pozos de extracción

En cuanto al número de pozos de extracción utilizados para simulación del estado transitorio solo fue posible abastecer al modelo con 60 pozos ya que el tipo de mallado algunos de ellos caían en la misma celda provocando problemas.

Para cuantificar una extracción general, el caudal de cada pozo fue multiplicado por un factor de 1.88, número que resulta de la división de los 113 pozos entre los 60, que solo se tendrán en el modelo y que representaran la extracción de los pozos que no aparecen. Debido a que la zona donde se desarrolla el modelo es un lugar donde el crecimiento urbano ha ido ganado terreno, los pozos de extracción fueron activados por regiones y con un volumen distinto de extracción según la fecha.

AÑO	GASTO [l/s]	GASTO [m ³ /día]	FACTOR 1.88	POZOS ACTIVADOS	EXTRACCIÓN GENERAL [m ³ /día]
1988	90	7776	13996.80	42	587,866
1996	100	8640	16243.20	42 al 100% 18 al 50%	828,403
2009	110	9504	17867.52	60	1,072,051
2016	120	10368	19491.84	60	1,169,510
2021	130	11232	20217.60	60	1,213,056
2026	140	12096	22740.48	60	1,364,429

Tabla 4.5 Extracción de agua en pozo.

Se puede observar un incremento en el volumen de agua de extracción de entre el 10 y 11 %, para cada período. Solo para imaginar la cantidad de agua que se utiliza en la subcuenca, pondré el siguiente ejemplo: el estadio azteca tiene una capacidad en volumen de 1, 817,877 m³. Para 2016 con el número de pozos

En este escenario se utilizó una extracción general de 587,866 m³/día. Cabe señalar que los pozos que rodean la Sierra Chichinautzin no se encuentran activos ya que inicialmente, no existían en ese año. Para su calibración (Inciso A, Figura 4.11) se empleó la ubicación de los pozos del año 1996 y el nivel estático, de la digitalización realizada con los datos publicados por Huizar (1992).

Estado transitorio para el periodo 1988 - 1996

En la configuración mostrada en la figura 4.8, se tiene la presencia de los primeros abatimientos con un descenso considerable de hasta 15 m en la planicie de Chalco, comparando con la superficie generada del año 1988. También se muestra un flujo al interior de la cuenca, en particular hacia la zona de Tlahuac y Valle de Chalco.

La cantidad de extracción general fue de 828,403 m³/día. Para su calibración (Inciso B, Figura 4.11) se empleó la información de los pozos reportada en la base de datos de CONAGUA para el año de 1996.

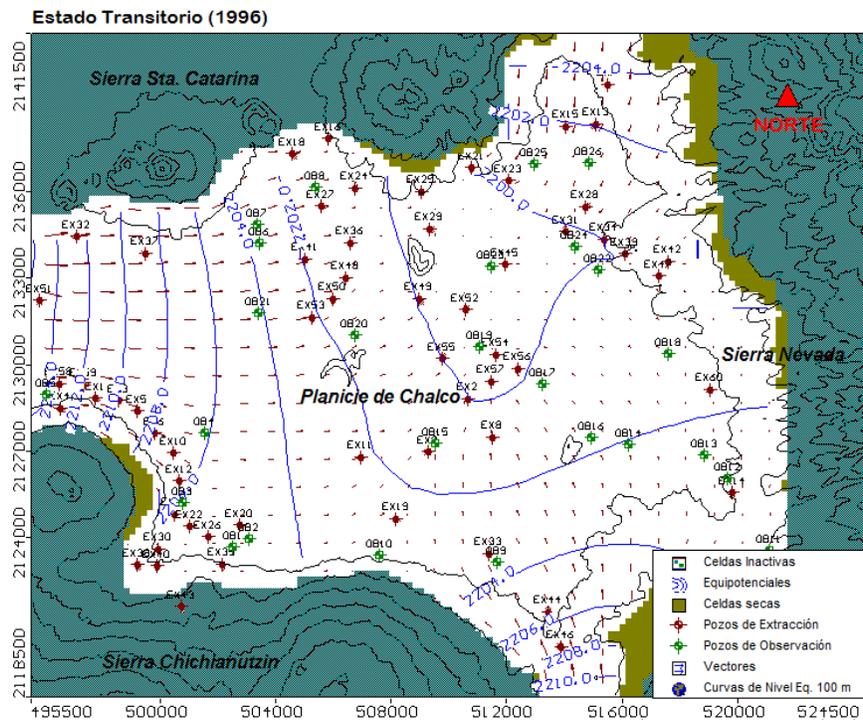


Figura 4.8 Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 1996.

Estado transitorio para el periodo 1996 - 2009

Para el escenario del año 2009, se tiene la presencia de un abatimiento considerable en la zona de Ixtapaluca y un cambio en la velocidad del flujo, posiblemente por el aumento en la extracción de agua en esa zona y que se observa en la figura 4.9.

En este periodo se utilizó una extracción general de 1, 072,051 m³/día incluyendo los pozos de la sierra Chichinautzin que para ese año ya tenían presencia, nótese que se empieza a secar parte de la segunda capa, la cual tiene un espesor corto en esa zona.

Para su calibración (Inciso C, Figura 4.11). Se empleó la información de la interpolación de los pozos reportada por CAEM (2009) en la ubicación de los pozos de CONAGUA (1996).

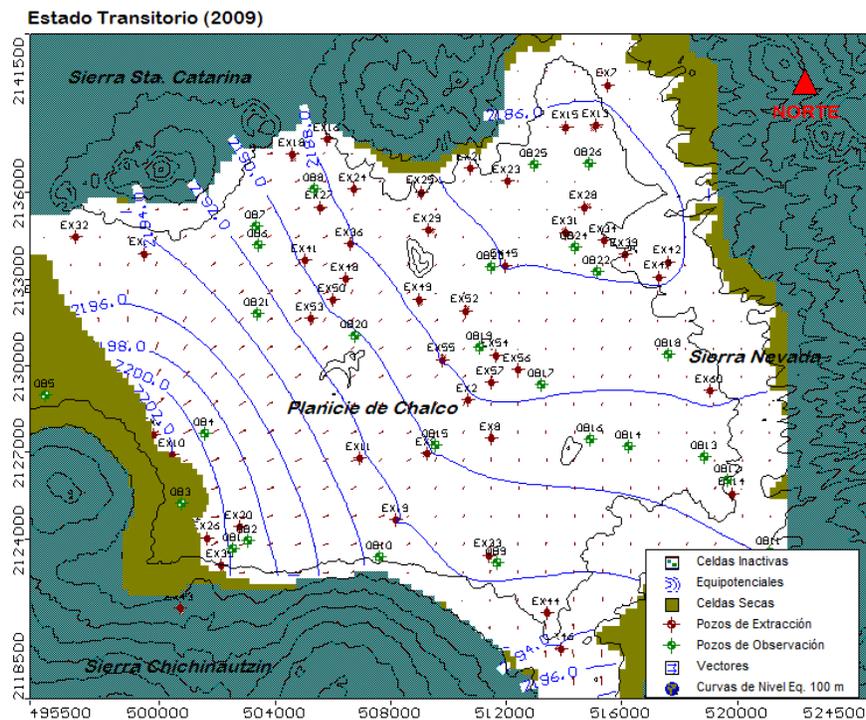


Figura 4.9 Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 2009.

Estado transitorio para el periodo 2009 - 2016

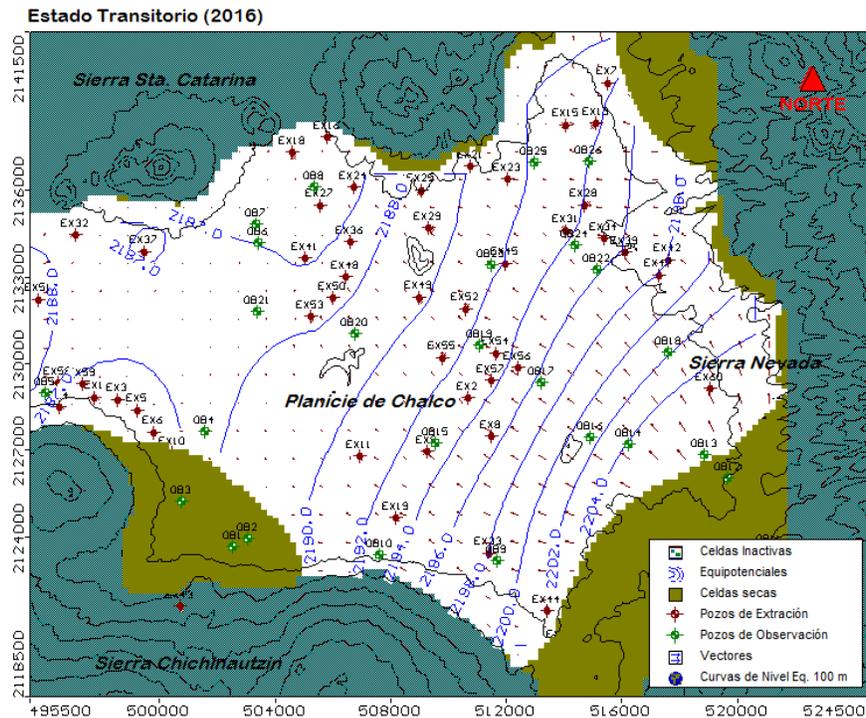


Figura 4.10 Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 2016.

Como muestra la figura 4.10 para el año del 2016 los niveles potenciométricos han tenido un descenso de hasta 27 m en zonas como Valle de Chalco, teniendo como referencia la información mostrada del año 1988. Se observa también que la circulación subterránea es baja en la planicie de Chalco, donde se encuentra un lago que se encuentra desconectado subterráneamente y solo se forma por aportes superficiales.

Donde los niveles de recarga del acuífero se ven afectados por una extracción general de 1, 169,510 m³/día, lo que indicaría ya, la utilización de agua de almacenamiento.

Para su calibración (Inciso D, Figura 4.11). Se empleó la información de la interpolación de los pozos reportada por ODAPAS (2016) en la ubicación de los pozos de CONAGUA (1996).

4.9 Calibración

Es el proceso en el cual los parámetros hidrogeológicos introducidos en el modelo se ajustan hasta lograr que las variables dependientes calculadas por el modelo sean lo más aproximadas a las variables calculadas en campo (Khon, 2009). Como se muestra en la figura 4.1, los resultados de las calibraciones parecen tener una tendencia a subestimar las cargas grandes y a sobrestimar las cargas pequeñas.

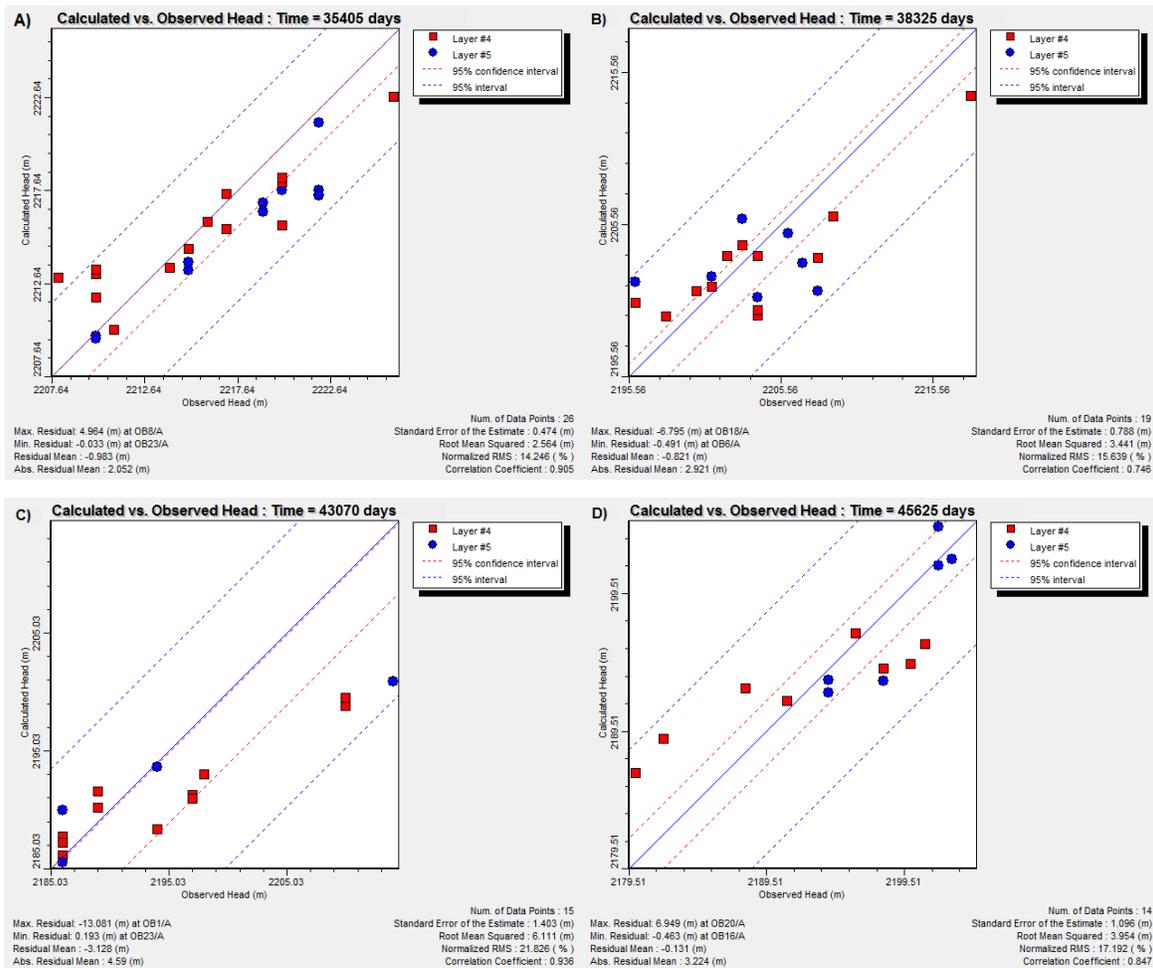


Figura 4.11 Calibraciones A) año 1988, B) año 1996, C) año 2009 y D) año 2016.

Kohn (2009) menciona que para cuando los valores del nivel estático en una misma zona tienen valores muy diferentes, es porque no hay una continuidad en la toma de mediciones, ya que durante algunos años hay datos para ciertos pozos y

durante otros años, hay datos de otros pozos distintos, como es el caso de la subcuenca Chalco-Amecameca.

4.10 Escenarios de explotación del acuífero

Modelo predictivo para el periodo 2016 - 2021

En este modelo predictivo se utilizó una extracción general de 1, 213,056 m³/día, que según la bibliografía, refleja el aumento de extracción que se da en esa temporalidad. Así, que a partir de la extracción reportada en 2016 el aumento en volumen general sería del 8.33 %. Nótese (Figura 4.12) que el abatimiento en la planicie de Chalco iría incrementando a un ritmo de 1.2 m³ por año.

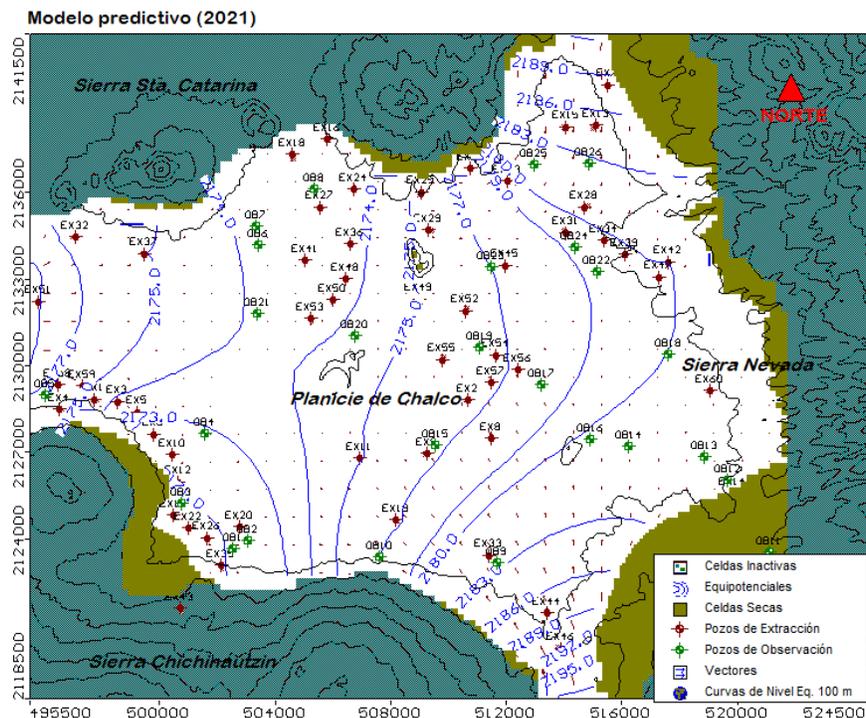


Figura 4.12 Superficie potenciométrica para el año 2021, con un aumento en el volumen de extracción general del 8.33%.

Modelo predictivo para el periodo 2021 - 2026

En este periodo se simuló una extracción general de 1, 364,429 m³/día, teniendo como consideración un aumento en la demanda y cantidad del recurso general del 16.66%, a partir de la extracción reportada en 2016. Como se muestra en la figura 4.13, si se sigue con ese ritmo de extracción la subcuenca se subsistirá solamente

del agua de almacenamiento. Lo que refleja que las aguas meteóricas no están llegando a estratos inferiores debido a que se extraen con anticipación.

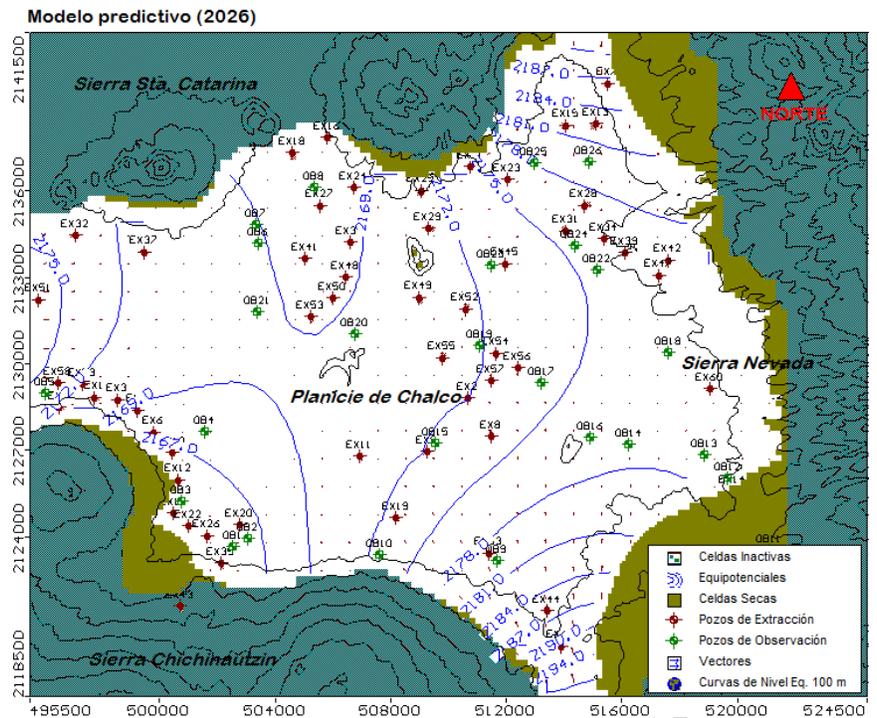


Figura 4.13 Superficie potenciométrica para el año 2026, con un aumento en el volumen de extracción general del 16.66%.

Discusión de resultados

Los escenarios transitorios correspondientes a diferentes años en la modelación, permiten establecer las diferencias en las superficies potenciométricas, que restadas a las del año subsecuente, revelan las diferencias y disminución de las superficies, tal como se muestra en la figura 4.14.

Dichos resultados confirman lo predicho por Huizar (1992) que indicó un déficit en el acuífero de 1.2 m³ por año, lo que implicaría un aumento en el riesgo de la subsidencia del lugar.

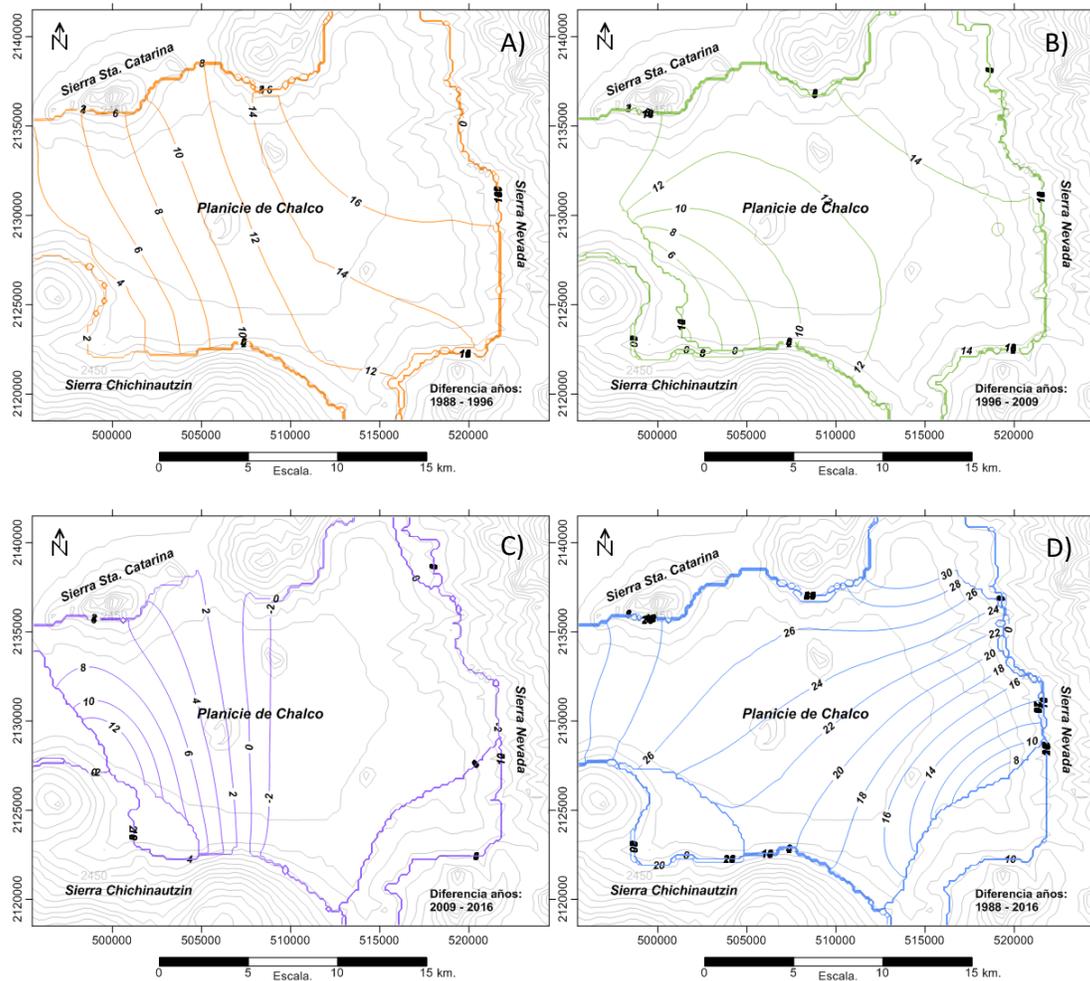


Figura 4.14 Diferencia potenciométrica en metros. A) 1988 - 1996, B) 1996 - 2009, C) 2009 - 2016 y D) 1988 - 2016.

Las salidas obtenidas por el modelo, también permitieron hacer una comparación de los resultados observados y los calculados por el modelo (Figura 4.15). La semejanza en los niveles calculados en algunas zonas es buena, pero siempre con una variación de entre ± 2 y ± 5 metros a los niveles observados.

Las zonas que más causan conflicto son las cercanas a la Sierra Santa Catarina en el año 1988 y 1996, y la de la Sierra Chichinautzin en el año 2009, donde se observan variaciones de hasta ± 10 metros. Lo que hay que resaltar, es el evidente abatimiento en la planicie de Chalco, siendo la única similitud que se encuentra en los cuatros periodos y que sin duda confirmaría los problemas de subsidencia del lugar.

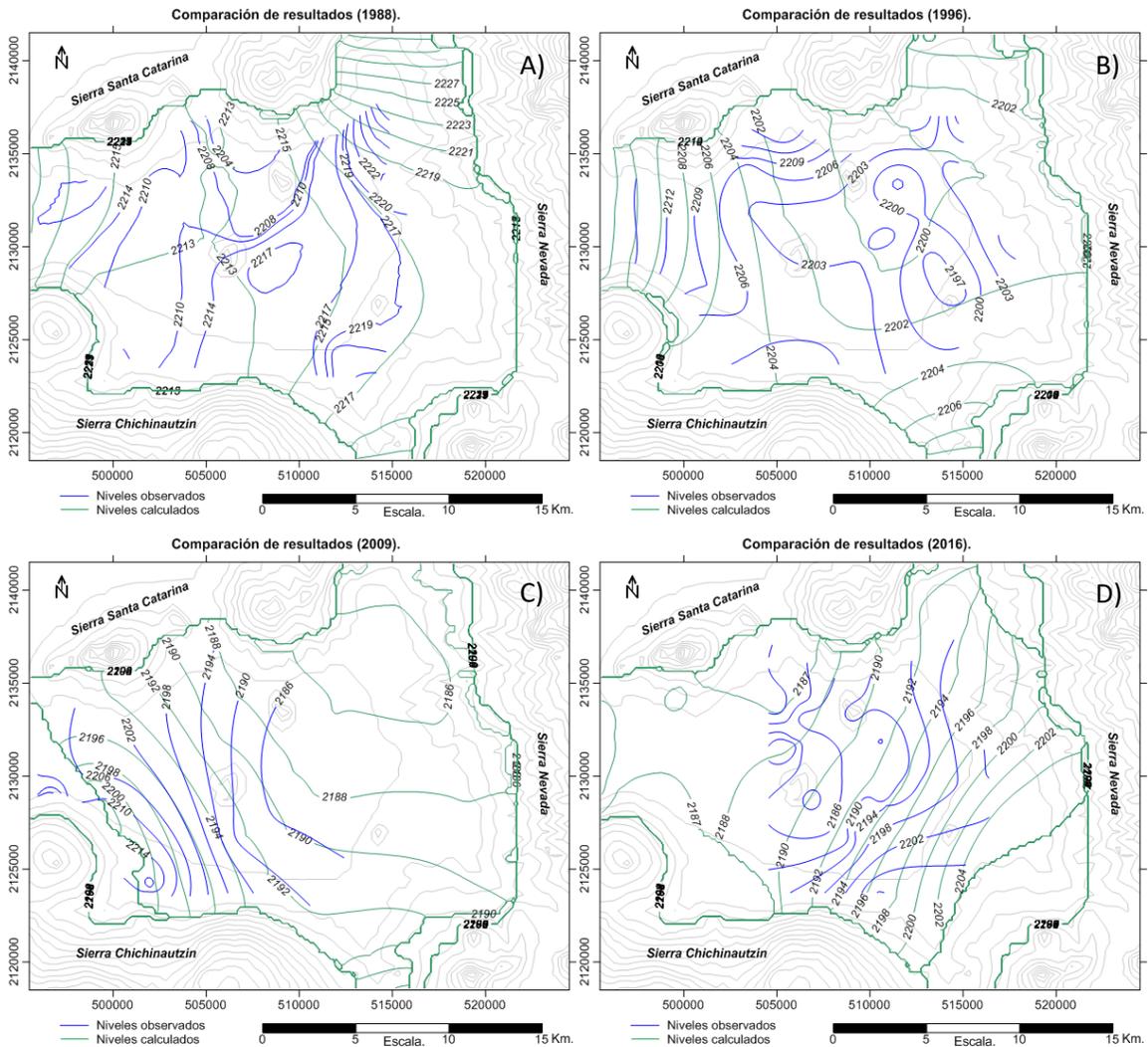


Figura 4.15 Resultados observados vs resultados calculados. A) 1988, B) 1996, C) 2009 y D) 2016.

Cabe señalar, que las condiciones de frontera utilizadas en el modelo, corresponden a condiciones de tipo Neumann, consideradas como condiciones GHB (General Head Boundary) en el simulador, debido a que son, las que mejor representan las condiciones de flujo reales en paredes perpendiculares a las fronteras de un sistema. Su fácil manejo ocasiona que la cantidad de flujo y la velocidad del mismo, que atraviesa la frontera, sea la más cercana a las condiciones reales. Sin embargo, los resultados obtenidos en esas fronteras no van a reproducir de manera exacta las observaciones, por lo que se recomienda tenerlo en consideración.

Frontera		Valor de Carga hidráulica Estado Estacionario [m]	Valor de Carga hidráulica Periodo estacionario – 1988 [m]
1	Oeste	2218	2222
2	Norte	2224	2235
3	Sur	2223	2226

Tabla 4.6 Condiciones frontera GHB en el modelo.

Para este trabajo, los valores de carga hidráulica en las fronteras tipo GHB en el estado estacionario, fueron creados con la intención de reproducir el antecedente histórico de la conexión del lago Chalco con el de Xochimilco en el lado oeste, el cual indicaría un flujo hacia el exterior de la cuenca. Para el caso de la frontera sur, se aplicó el mismo criterio, ya que se tiene información de Molina (1959) el cual señala un flujo en dirección a Amecameca, por último en la frontera norte se intuyó lo mismo, aunque no se tiene evidencia de ello.

Dichas condiciones que se muestran en la tabla 4.6, fueron modificadas para la simulación posterior (periodo 1988) que representa el inicio de los estados transitorios, lo cual intenta reproducir todo lo contrario, un flujo con dirección al interior de la subcuenca, este cambio en los valores de carga hidráulica se sustenta bajo el criterio, de la información observada y presentada en las figuras 3.10 a 3.13, que indican niveles estáticos menores al interior de la subcuenca comparado a los cercanos a las fronteras.

Conclusiones

Se desarrolló un modelo de flujo en Visual MODFLOW de la subcuenca Chalco-Amecameca, para caracterizar su sistema acuífero subterráneo, con la integración de datos geofísicos de gravimetría, cocientes espectrales H/V, sondeos geotécnicos, registros geofísicos de pozo y modelo digital de elevación. Además, se incorporaron, pruebas de bombeo, registros geológicos de pozos y estudios hidrogeológicos históricos de la zona.

Para ello, se realizó una búsqueda bibliográfica extensiva de todos los estudios antes mencionados, con la finalidad de elaborar una base de datos digital a partir de información publicada, y no publicada, que se encontraban en papel y en ocasiones sin referencia geográfica precisa.

También, se recopilaron, revisaron y analizaron los procesos hidrogeológicos, que determinan las relaciones e interacciones entre la recarga, la extracción y el flujo de agua subterráneo, así como el uso y los efectos que se producen en la calidad y cantidad de ella. El análisis de la evolución de los niveles potenciométricos disponibles de 1988, 1996, 2009 y 2016, nos permitió determinar que la subcuenca ha sufrido un descenso del nivel estático de hasta 30 m en zonas como la planicie de Chalco.

Mediante la simulación de escenarios transitorios, fue posible conocer algunas tendencias a futuro, con el objetivo de advertir a los organismos de abastecimiento de agua, que el excesivo crecimiento urbano de la zona está construyendo un riesgo y favoreciendo el aumento de la subsidencia.

Adicionalmente, a las conclusiones aquí plasmadas, podemos decir que las bases de datos que se integraron para este estudio servirán para futuras investigaciones.

También es importante definir pozos de observación para realizar un monitoreo que permita obtener datos actuales y, de ser posible con periodicidad fija. Esto para generar estudios más detallados, sin dejar pasar las recomendaciones que en este estudio se proponen, en particular en el uso de la frontera GHB.

La escases de agua es cada vez mayor, y las soluciones involucran la exploración de nuevas estrategias y tecnología. Por lo que, algunas recomendaciones podrían ser, incluir el uso de la esorrentía para suministro, que es un agua de buena calidad que actualmente se bombea hacia fuera del Valle.

Por otro lado, también se propone propiciar el incremento en el número y la capacidad de las plantas de tratamiento, la renovación de la red de distribución de agua para reducir la pérdida de agua por fugas, la reinyección del agua tratada y hasta la explotación de los acuíferos profundos de extensión regional como se viene haciendo en zonas como Iztapalapa.

Tabla1. Pozos utilizados para el registro litológico.

Abreviatura	Pozos Litologicos	X	Y	Z	Fecha	Profundidad	Fuente
A1	Tluyehualco-I	494722	2131656	2241	1986	3000	PEMEX
A2	San Lorenzo Tezonco	491096	2142762	2240	2012	2008	SACMEX
C1	Chalco I-A 342	505815	2131627	2238	1988	395	CAEM
C2	Tx. Chalco II 344	505983	2132280	2239	1988	400	CAEM
C3	Tx. Chalco III 344	506913	2128699	2228	1988	400	CAEM
C4	Chalco IV 345	509018	2132961	2246	1988	380	CAEM
C5	Cerezo de Chalco	506418	2125666	2244	2005	350	CAEM
C6	San Martin Xico Nuevo	509262	2126968	2251	1993	300	CAEM
C7	Ayotzingo	508195	2124802	2250	1992	350	CAEM
C8	Culturas de México	509754	2130196	2242	2000	350	CAEM

Tabla2. Pozos utilizados para las pruebas de bombeo.

Nombre	X	Y	Profundidad de ademe [m]	Estado	Fecha	Fuente
Vivero 1-B	492117	2132124	250	CDMX	2007	Ariel Consultores S.A. de C.V.
Mixqui-Sta. Catarina	503297	2138013	400	CDMX	2007	Ariel Consultores S.A. de C.V.
Tecómitl	501525	2124056	75	CDMX	2007	Ariel Consultores S.A. de C.V.

Tabla3. Pozos del análisis geoquímico.

No.	Nombre	X	Y	Uso	Fecha	Fuente
1	Santa Catarina	497218	2134310	Publico Urbano	2012	CONAGUA
2	San Marcos	514486	2133715	Publico Urbano	2012	CONAGUA
3	Chalco No. 8	511785	2131941	Publico Urbano	2012	CONAGUA
4	Amalinalco	514321	2130714	Publico Urbano	2012	CONAGUA
5	San Luis	497005	2129575	Publico Urbano	2012	CONAGUA
6	Volcanes	510012	2128666	Publico Urbano	2012	CONAGUA
7	Xotepingo	499455	2127662	Publico Urbano	2012	CONAGUA
8	Álamos	514897	2127654	Publico Urbano	2012	CONAGUA
9	Purísima	498844	2139685	Publico Urbano	2012	CONAGUA
10	Chimalpa	508929	2126415	Publico Urbano	2012	CONAGUA
11	Tecomitl	503482	2123945	Publico Urbano	2012	CONAGUA
12	Temamatla	513712	2123331	Publico Urbano	2012	CONAGUA
13	Tlachique	513665	2120709	Publico Urbano	2012	CONAGUA
14	Amecameca	523484	2115438	Publico Urbano	2012	CONAGUA
15	Ayapango	519179	2115264	Publico Urbano	2012	CONAGUA

Tabla4. Pozos de observación 1996.

No.	Nombre	Año	X	Y	Brocal	Elev. N.E. 1996	Prof. N.E. 2003	Prof. N.E. 2013
1	2147	1996	502513	2123693	2244	2206	0	38
2	2146	1996	503069	2123970	2252	2206	31	31
3	2235	1996	500757	2125231	2248	2203	32	45
4	2239	1996	501545	2127655	2252	2209	43	44
5	2002	1996	496027	2128983	2249	2218	39	31
6	1997	1996	503415	2134205	2237	2204	33	0
7	RN-18NVO	1996	503330	2134847	2245	2210	0	35
8	RN-14B	1996	505368	2136142	2254	2218	36	0
9	RN-10BIS	1996	511679	2123177	2269	2202	62	67
10	RN-7B	1996	507589	2123385	2260	2207	53	0
11	RS-1B	1996	521087	2123551	2393	2204	152	0
12	RM-1B	1996	519644	2126072	2291	2204	65	0
13	RN-4	1996	518855	2126868	2291	2204	59	67
14	83-B	1996	516206	2127230	2254	2201	53	0
15	RN-2B	1996	509522	2127259	2237	2204	11	0
16	119-B	1996	514913	2127472	2251	2196	50	62
17	1934V	1996	513220	2129352	2241	2196	0	50
18	1528V	1996	517602	2130396	2262	2208	51	0
19	B-426	1996	511065	2130645	2235	2204	31	0
20	553	1996	506746	2131041	2232	2201	31	0
21	1944	1996	503384	2131804	2237	2203	34	0
22	81-B	1996	515151	2133281	2270	2204	36	0
23	79-B	1996	511473	2133412	2247	2196	37	51
24	1549V	1996	514362	2134111	2283	2204	76	80
25	196	1996	512952	2136975	2260	2208	0	0
26	245	1996	514853	2137010	2276	2195	68	81

Tabla5. Pozos de observación 2009.

No.	Año	X	Y	Brocal	Elev. N.E. 2009	Prof. N.E. 2009	Prof. N.D 2009	Gasto lts/s	Tipo de Acuífero
1	2009	495998	2139155	2247	2213.36	33.64	50.33	39	Confinado
2	2009	511785	2131941	2235	2182	51	62	40.3	Semiconfinado
3	2009	510574	2131912	2217	2182	49	54	65	Semiconfinado
4	2009	511314	2131057	2237	2183	48.3	56	68	Semiconfinado
5	2009	511630	2130363	2236	2183	49	52	72	Semiconfinado
6	2009	509760	2130216	2231	2182.5	48.5	52.2	44	Semiconfinado
7	2009	512400	2129878	2239	2183	50	51.5	36	Semiconfinado

8	2009	511462	2129426	2242	2183	51	69	28	Semiconfinado
9	2009	495952	2129065	2256	2212.11	43.89	49.65	43.2	Libre
10	2009	495953	2129006	2259	2216.61	42.39	48.51	33	Libre
11	2009	497740	2128842	2270	2207.21	62.79	70.2	28.6	Libre
12	2009	510654	2128828	2272	2185	55	69	45	Semiconfinado
13	2009	496509	2128497	2331	2233.85	97.15	100.47	17.4	Libre
14	2009	499453	2128278	2256	2212.6	43.4	51.46	25.4	Libre
15	2009	511484	2127494	2240	2185	54	61	35	Semiconfinado
16	2009	506930	2126803	2237	2188	53.4	60	38	Semiconfinado
17	2009	501965	2124130	2258	2219.82	38.18	39.01	50.2	Libre
18	2009	502227	2123803	2259	2213.98	45.02	46.72	50.4	Libre
19	2009	501881	2123784	2259	2213.5	45.5	50.32	23.6	Libre
20	2009	499594	2123064	2306	2207.37	98.63	99.06	34	Libre
21	2009	499888	2123026	2312	2205.01	106.99	107.5	20.8	Libre
22	2009	498925	2122547	2353	2211.37	141.63	142.38	29.6	Libre

Tabla6. Pozos de observación 2016.

No.	Nombre	Año	X	Y	Brocal	N.E. 2016	Prof. N.E. 2016	Prof. N.D. 2016	Gasto lts/seg
1	ODAPAS Valle 1	2016	505208	2131664	2247	2193.8	53.18	75.34	105
2	ODAPAS Valle 2	2016	505815	2131627	2250	2192.6	57.35	69.27	110
3	ODAPAS Valle 3	2016	506742	2131256	2238	2182.1	55.84	66.56	75
4	ODAPAS Valle 4	2016	505983	2132280	2239	2181.4	57.59	72	102
5	ODAPAS Valle 5	2016	505556	2135494	2238	2180.4	57.59	72	97
6	ODAPAS Valle 6	2016	506585	2134230	2233	2181	52	65	92
7	ODAPAS Valle 7	2016	506432	2133026	2241	2189	52	63.2	92
8	ODAPAS Valle 8	2016	505008	2133677	2234	2175.1	58.86	81	20.35
9	Geovillas	2016	504569	2137318	2247	2177.5	69.43	71.26	9
10	Casas Ara	2016	506913	2128699	2228	2180.5	69.43	71.26	56.8
11	ODAPAS Valle 11	2016	508976	2133299	2241	2191	50	61.47	39
12	ODAPAS Chalco 2	2016	512388	2129883	2248	2192.9	55.1	56.7	45
13	ODAPAS Chalco 2	2016	511456	2129426	2246	2190.1	55.9	69.5	24
14	Culturas	2016	509754	2130196	2242	2190	52	73.1	40
15	ODAPAS Chalco 4	2016	511622	2130371	2243	2188	55	72	70
16	ODAPAS Chalco 5	2016	510660	2128839	2247	2187.2	59.8	72.8	45
17	ODAPAS Chalco 6	2016	511690	2131856	2243	2189.2	53.76	69	100
18	ODAPAS Chalco 7	2016	510584	2131909	2241	2185.7	55.3	62.9	85
19	Xico Nuevo	2016	509262	2126968	2251	2194.8	56.2	70.5	33
20	Ayotzingo	2016	508195	2124802	2250	2196	54	69.5	45
21	Cerezo de Chalco	2016	506418	2125666	2244	2188.9	55.1	56.7	60
22	Volcanes	2016	510023	2128663	2247	2191.1	55.9	69.5	35
23	Portal-Villas	2016	510881	2128432	2246	2194	52	73.1	35

24	Alamos	2016	514887	2127641	2261	2201.2	59.8	72.8	36
25	San Marcos	2016	515378	2134361	2300	2203	54	69.5	30
26	Heroes 1	2016	510405	2123739	2264	2210.2	53.76	69	60
27	Heroes 2	2016	516391	2129986	2258	2202.7	55.3	62.9	65
28	Heroes 3	2016	516206	2129532	2257	2198.4	58.6	69.7	60
29	Chimalpa	2016	508617	2126654	2245	2187.8	57.2	59	35

Tabla7. Pozos de Extracción.

No.	Nombre	Uso	X	Y
1	Pozo Deportivo San Sebastián.	Público Urbano	498032	2141249
2	Pozo Peñón 2 nuevo.	Público Urbano	496433	2141157
3	Pozo TX 316.	Público Urbano	504137	2141053
4	Pozo Tecamachalco.	Público Urbano	504520	2140883
5	Pozo TXR 25.	Público Urbano	503719	2140869
6	Pozo El Sifón.	Público Urbano	498463	2140001
7	Pozo TX 332.	Público Urbano	504856	2139989
8	Pozo Lomas de Ixtapaluca.	Ninguno	515693	2139859
9	Pozo San Francisco Acuatla.	Público Urbano	515481	2139718
10	Pozo Santa María Aztahuacán.	Público Urbano	497533	2139626
11	Pozo Purísima Iztapalapa 1.	Público Urbano	501423	2139192
12	Pozo Iztapalapa 8	Público Urbano	495998	2139155
13	Pozo Purísima Iztapalapa 4.	Público Urbano	498126	2139076
14	Pozo Purísima Iztapalapa No. 5.	Público Urbano	499056	2138634
15	Pozo 15 ODAPAS Ixtapaluca.	Público Urbano	515098	2138333
16	Pozo 4 ODAPAS.	Público Urbano	514033	2138270
17	Pozo Tlalpizahuac.	Público Urbano	505806	2137835
18	Pozo Santa Cruz Meyehualco	Público Urbano	496922	2137800
19	Pozo Geovillas Asunción.	Público Urbano	504573	2137316
20	Pozo Geovillas Jesús María.	Público Urbano	512245	2137050
21	Pozo Xocolines.	Público Urbano	510766	2136836
22	Pozo Acueducto.	Público Urbano	511618	2136512
23	Pozo San José La Palma Tezontle.	Público Urbano	512433	2136432
24	Pozo Nuevo México.	Público Urbano	512051	2136388
25	Pozo Melchor Ocampo.	Público Urbano	509554	2136166
26	Pozo Izcali.	Público Urbano	506735	2136115
27	Pozo Tejolote.	Público Urbano	509035	2136007
28	Pozo 5 Chalco Solidaridad.	Público Urbano	505562	2135491
29	Pozo San Buenaventura 1.	Público Urbano	514712	2135486
30	Pozo Santa Catarina 1.	Público Urbano	503202	2135051
31	Pozo José de la Mora.	Público Urbano	508444	2134867
32	Pozo Santa Cruz Tlapacoya.	Público Urbano	509309	2134704
33	Pozo 32.	Público Urbano	514982	2134691

34	Pozo San Buenaventura 2.	Público Urbano	514045	2134602
35	Pozo Santa Catarina 5.	Público Urbano	497098	2134453
36	Pozo Séptima San Marcos.	Público Urbano	515386	2134350
37	Pozo VI Independencia.	Público Urbano	506584	2134229
38	Pozo Santa Catarina 3.	Público Urbano	499486	2133870
39	Pozo Cuatro Vientos 1.	Público Urbano	516094	2133849
40	Pozo Santa Catarina 2.	Ninguno	499927	2133787
41	Pozo VIII María Isabel.	Ninguno	505014	2133662
42	Pozo Santa Bárbara 3	Público Urbano	511414	2133603
43	Pozo Protección Civil.	Público Urbano	517579	2133588
44	Pozo Tulyehualco No. 6.	Público Urbano	499221	2133546
45	Pozo El Jaral.	Público Urbano	511935	2133475
46	Pozo Alfredo del Mazo.	Público Urbano	509661	2133253
47	Pozo Cuatro Vientos 2.	Público Urbano	517288	2133080
48	Pozo VII Santa Cruz	Ninguno	506421	2133013
49	En construcción.	Ninguno	508973	2132298
50	Pozo Niños Héroes 4.	Público Urbano	505990	2132290
51	Pozo Santa Catarina 4.	Ninguno	495793	2132226
52	Pozo 7 de Chalco	Público Urbano	510574	2131912
53	Pozo Barcada 1.	Público Urbano	505232	2131651
54	Pozo Del Mazo 2.	Público Urbano	505818	2131627
55	Pozo 6 de Chalco	Público Urbano	511314	2131057
56	Pozo 4 de Chalco	Público Urbano	511630	2130363
57	Pozo 3 de Chalco	Público Urbano	509760	2130216
58	Pozo 1 de Chalco	Público Urbano	512400	2129878
59	Pozo San Luis 6	Público Urbano	497129	2129434
60	Pozo San Luis 4	Ninguno	496929	2129430
61	Pozo 2 de Chalco	Público Urbano	511462	2129426
62	Pozo San Luis 3	Público Urbano	496899	2129403
63	Pozo San Luis 7.	Público Urbano	496492	2129350
64	Pozo San Luis 1.	Público Urbano	497342	2129304
65	Pozo Santa María Huexoculco.	Público Urbano	519054	2129145
66	Pozo Tulyehualco.	Ninguno	498047	2129122
67	Pozo San Luis 10.	Público Urbano	495952	2129065
68	Pozo San Luis 9.	Público Urbano	495953	2129006
69	Pozo S-12.	Público Urbano	497740	2128842
70	Pozo 5 de ODAPAS Chalco.	Público Urbano	510654	2128828
71	Pozo Tulyehualco 8.	Público Urbano	498536	2128757
72	Pozo Tulyehualco 6.	Ninguno	499032	2128516
73	Pozo S-11.	Público Urbano	496509	2128497
74	Pozo Tulyehualco 5.	Público Urbano	499210	2128393
75	Pozo Tulyehualco 4.	Público Urbano	499453	2128278
76	Pozo Tulyehualco 2.	Público Urbano	499789	2127636
77	Pozo Portal Chalco.	Público Urbano	511484	2127494

78	Pozo San Martín Xico Nuevo.	Público Urbano	509263	2126977
79	Pozo Tulyehualco 1.	Ninguno	500430	2126936
80	Pozo Huilzilzingo.	Público Urbano	506930	2126803
81	Pozo Tecomitl No. 1.	Público Urbano	500267	2126562
82	Pozo Tecomitl 3.	Público Urbano	500637	2125980
83	Pozo Miraflores.	Público Urbano	519805	2125576
84	Pozo Tecomitl 4.	Público Urbano	500732	2125442
85	Pozo Tecomitl 5.	Público Urbano	500424	2125187
86	Pozo Tecomitl 6.	Público Urbano	500466	2124832
87	Pozo Ayotzingo	Público Urbano	508168	2124664
88	Pozo Tecomitl 18.	Ninguno	502760	2124436
89	Pozo Tecomitl 9	Público Urbano	500995	2124401
90	Pozo Tecomitl 7.	Público Urbano	500368	2124264
91	Pozo Tecomitl 10.	Público Urbano	501498	2124249
92	Pozo Tecomitl 11.	Ninguno	501765	2124220
93	Pozo Tecomitl 19.	Agrícola	503021	2124191
94	Pozo Tecomitl 14.	Público Urbano	501965	2124130
95	Pozo Tecomitl 13.	Ninguno	501644	2124048
96	Pozo Tecomitl 20.	Agrícola	503221	2124007
97	Pozo Tecomitl 16.	Agrícola	502457	2123907
98	Pozo Tecomitl 15.	Público Urbano	502227	2123803
99	Pozo Tecomitl 12.	Público Urbano	501881	2123784
100	Pozo R - 28.	Público Urbano	499910	2123621
101	Pozo R-18.	Público Urbano	499223	2123600
102	Pozo Tecomitl 17.	Público Urbano	502670	2123527
103	Pozo en San Pablo Atlazalpan.	Público Urbano	511376	2123454
104	Pozo Tecomitl 15.	Público Urbano	502119	2123098
105	Pozo R-24.	Público Urbano	499179	2123067
106	Pozo R-22.	Público Urbano	499594	2123064
107	Pozo R-26	Público Urbano	499888	2123026
108	Pozo R - 25.	Público Urbano	498741	2122964
109	Pozo R 21.	Público Urbano	499826	2122696
110	Pozo R-19.	Público Urbano	498925	2122547
111	Pozo San Juan Tepenáhuac,	Público Urbano	500711	2121616
112	Pozo frente a vivero Temamatla.	Agrícola	513417	2121444
113	Pozo Tlachique 3.	Ninguno	513877	2120232

Bibliografía

1. Ángeles-Serrano G., Carrillo-Rivera J. y Hernández G., 2003. "Groundwater recharge processes in the Central Region of Mexico". RMZ-Materials and Geoenvironment.
2. Antigüedad I., Ibarra y V., Morales T., 1990. "Los Trazadores en la Hidrogeología Kárstica: Metodología de su uso e Interpretación de los Ensayos de Trazado.", Manubi Ciencias Naturales, San Sebastián.
3. Arce, J.L., Layer P.W., Morales-Casique, E., Benowitz, J.A., Rangel, E., Escolero, O., 2013, "New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronology and whole-rock chemistry": Journal of Volcanology and Geothermal.
4. Arce, J.L., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J.I., Macías-Romo, M.C., Morales-Casique, E., Benowitz, J., Escolero, O., Lenhardt, N., 2015, Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
5. Birgit-Steinch, Velázquez-Olimán G., Marin E. y Eugene Perry., 1996. "Determination of the Ground Water Divide in the Karts Aquifer of Yucatán, Mexico, Combining Geochemical and Hydrogeological Data", Geophysical International.
6. Birkle P., V. Torres Rodríguez E. y González Partida., 1998, "The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption": Hydrogeology Journal.
7. Bundschuh J. y Suárez Arriaga., 2010. "Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems, Fundamentals of Mass, Energy and Solute Transport in Poroelastic Rocks". CRS Press Taylor and Francis Group, London, UK.
8. Burns Stuck Elena, López Reyes Rebeca, Terrenos Mecalco Jesús., 2011. "Plan Hídrico para las subcuencas Amecameca, La compañía y Tláhuac Xico"., Universidad Autónoma Metropolitana & Comisión de cuenca de los ríos Amecameca y La compañía. Tlalmanalco, Edo. De México.
9. Campos-Enríquez, J.O., Delgado-Rodríguez, O., Chávez-Segura, R., Gómez-Contreras, P., Flores-Márquez, E.L. y Birch, F.S., 1997. "The subsurface structure of the Chalco sub-basin (Mexico City) inferred from geophysical data". *Geophysics*.

10. Carrera-Hernández J.J., Gaskin S.J., 2008. "Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico". *Journal of Hydrology*.
11. Chouteau M. and Krivochieva S., 2002. "Integrating TDEM and MT methods for characterization and delineation of the Santa Catarina aquifer (Chalco Sub-Basin, Mexico)", *Journal of Applied Geophysics*.
12. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)., 2010. "Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México". Subdirección General Técnica.
13. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)., 2012. "Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México". Subdirección General Técnica.
14. CONAGUA., 2015. "Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chalco-Amecameca (1506), Estado de México". Subdirección General Técnica, Gerencia de aguas subterráneas. Subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos.
15. Crusillo Hernández., 2005. "Modelo hidrogeológico del Valle de Etna, Oaxaca, México". Instituto de Geofísica, Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, México.
16. Enciso De la Vega S., 1992. Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México. *Revista del Instituto de Geología de la UNAM*.
17. Flores-Márquez E.L. Jiménez Suarez G., Martínez Serrano R.G., Chávez R.E., Silva Pérez D., 2006. "Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico". *Hydrogeology Journal*.
18. Flores-Márquez E. Leticia, Martínez-Serrano Raymundo G., Chávez René E., Crusillo1, Gabriel Jiménez Yuridia and Campos-Enríquez Oscar., 2007. "Numerical modeling of Etna Valley aquifer, Oax., Mexico: Evolution and remediation scenarios". *Geophysical International*7.
19. García., 1998. Sistema de Köppen, modificado por García. "Modificaciones al sistema de clasificación. climática de Köppen". Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad (CONABIO), México.
20. González Torres Enrique Alejandro, Morán Zenteno Dante J., Laura Mori1, Barbara M. Martiny., 2015. "Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.

21. Hernández-Epriú, A., Castro-Herrera, I., Zapata-Norberto, B., y Arias-Paz, A., 2015. "Interpretación moderna de pruebas hidráulicas en acuíferos, adaptando metodologías de la ingeniería petrolera". X Congreso Nacional de Aguas Subterráneas.
22. Herrera Hernández., 2011. "Estratigrafía y Análisis de Facies de los Sedimentos Lacustres del Cuaternario Tardío de la cuenca de Chalco, México". Instituto de Geofísica, Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra, México.
23. Herrera, I., Martínez, R., & Hernández, G., 1989. "Contribución para la Administración Científica del Agua en México". Revista Geofísica Internacional.
24. Huizar-Alvarez R., 1992. "Simulación matemática del sistema acuífero de Chalco-Amecameca", México. Instituto de Geología, UNAM para revista Geofísica Internacional.
25. INEGI., 2001. Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana. Conjunto de datos vectoriales fisiográficos continuo nacional escala 1 a 1:000,000 y 1 a 1:250,000. México.
26. Jiménez-Suarez G., 2005. "Exploración, modelo de flujo y transporte en el acuífero del valle de Puebla." Tesis para obtener grado de Doctor en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, México
27. Khon Ledesma., 2009. "Modelo de Flujo del Acuífero de San Luis Potosí, SLP". Instituto de Geofísica, Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra, , Instituto de Geofísica, México.
28. Karaouz, A. Ahmadi, M. Akhbari., 2011. "Groundwater Hydrology Engineering, Planning, and Management". CRC Press Taylor and Francis Group, United States of America.
29. Lapcevic P. A., 1999. "The Interpretation of a Tracer Experiment Conducted in a single Fracture Under Conditions of Natural Groundwater Flow.", Water Resources Research.
30. Lesser-Illades J.M., 1978. "El Uso y la Aplicación de Trazadores de Agua Subterránea.", Bol. Soc. Geol. Mexicana.
31. Lesser I., J.M.; Sánchez D., F. y González P., D., 1990. "Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México". *Ingeniería Hidráulica en México*.
32. Lesser y Asociados S. A. de C. V., 2000. "Estudio de mediciones en la red de pozos piloto para la parte sur de la cuenca del Valle de México y

actualización de balance hidrogeológico”. Sinopsis de la piezométrica del Valle de México año 2000. Departamento del Distrito Federal.

33. Leyva-Suarez E., 2010. “Acuíferos semiconfinados y su modelación: Aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México”. Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra, México.
34. Lezama-Campos, Morales-Casique, Castrejón-Pineda, Arce J. y Escolero., 2016. “Interpretación del registro geofísico del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y su correlación litológica en la cuenca de México”. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.
35. Liu, K., Goyes, Y., Chen, C., y Gélvez, S., 2014. Estimación de los parámetros hidrogeológicos (S,T) a partir de ensayos de bombeo en régimen variable resolviendo un sistema no-lineal de ecuaciones (SNE). Boletín de Geología.
36. Luna-Izazaga Carmen., 2017. “Interpretación de pruebas hidráulicas en acuíferos de México, por medio de técnicas de análisis derivativo, adaptadas de la ingeniería petrolera”. Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra., UNAM, México.
37. Maderey-Rascón, L., Jiménez-Román, A., 2005. “Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico”. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
38. Malvern-Laurence E., 1969. “Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium. Prentice Hall, Inc.
39. Morales-Casique, Oscar A. Escolero y José L. Arce., 2014. “Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México”. Departamento de Geología Regional, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
40. Niedzielski H., 1991. “Sección Hidrogeológica a través del valle de Chalco, México”. Universidad Nacional Autónoma de México, Geofísica Internacional.
41. Ortega-Guerrero M., Farvolden R., 1989. “Análisis computacional del flujo subterráneo regional y las condiciones de contorno en la Cuenca de México”. Hydrogeology Journal.
42. Pérez-Cruz G. A., 1988. “Estudio sismológico de reflexión del Subsuelo de la Ciudad de México”. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

43. Pérez Centeno D., 2009. "Modelado del hundimiento de la zona lacustre del valle de México. Aspectos estratigráficos y piezométricos". Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.
44. Khon Ledesma I., 2009. "Modelo de Flujo del Acuífero de San Luis Potosí, SLP". Instituto de Geofísica, Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra, , Instituto de Geofísica, México.
45. Price Michael, 2011. "Introducing groundwater". The University of Reading, UK and British Geological Survey, Editorial Limusa, México.
46. Ramírez–Esquivel, W.G., 1995. "Variación de la carga hidráulica en el acuitardo lacustre del exlago de Chalco D.F. y Estado de México". Tesis de Licenciatura (Ingeniero Geólogo) presentada en la Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
47. Rangel-Medina M., 1978. "Uso de trazadores en estudios geohidrológicos.", Comisión Federal de Electricidad., Resúmenes de trabajos de la IV Convención Geológica Nacional.
48. Renard P., 2005. "Hydraulics of Wells and testing". Groundwater (Encyclopedia of Hydrological sciences).
49. Renard, P., 2009. "Understanding diagnostic plots for well test" interpretation. Hydrogeology Journal.
50. Rodríguez-Castillo R., González-Morán T., 1989. "Comportamiento hidrodinámico del sistema acuífero de la subcuenca de Chalco, México". Geofísica Internacional.
51. Rodríguez-Chávez F. M., 2003. "Modelado gravimétrico de la estructura de la cuenca de México". Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
52. Rodolph, D., 1991. "Studies of groundwater flow and solute transport in a clay aquitard near Mexico City". Ontario, Canada: University of Waterloo.
53. Sanz Pérez, E., Menéndez-Pidal, I., 2014. "Hidráulica Subterránea. 2da Edición". Ibergarceta Publicaciones, S.L., Madrid.
54. Scheidegger, A.E., 1974. "The physics of flow through porous media". 3rd ed, University of Toronto Press, Toronto Canada.
55. Schwartz, F. W., 1977. "Macroscopic dispersion in porous media: the controlling factors". Water Resour.

56. Servicio Geológico Mexicano (SGM)., 2002. Carta geológico-minera 1:250000, Ciudad de México E14-2.
57. Silva Pérez., 2003. "Modelo Evolutivo del Acuífero del Valle de Puebla". Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, México.
58. Stallman, R.W",. 1971. "Aquifer-Test Design, Observation, and Data Analysis. Applications of Hydraulics". U.S. Geological Survey.
59. Stanley N. Davis, Roger J. M. De Wiest., Edition 2009. "Hydrogeology". Editions Ariel by John and Sons, Inc., Barcelona Espana.
60. Theis, C. V., 1935. "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate duration of discharge of a well using groundwater storage". American Geophysical Union Journal.
61. Tippens Paul E., 2001. "Física, conceptos y aplicaciones". 7rd ed, Southern Polytechnic University. McGraw-Hill Interamericana, United States of America.
62. Vandenberg, A., 1977. "Type curves for analysis of pump tests in leaky strip aquifers". Hydrogeology Journal.
63. Vargas–Cabrera, C., 1995. "Distribución de la conductividad hidráulica en el acuitardo lacustre de la Subcuenca de Chalco, D.F. y Estado de México". Tesis de Licenciatura (Ingeniero Geólogo) presentada en la Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
64. Vargas-Cabrera C. y Ortega Guerrero, M. A., 2004. "Fracture hydraulic conductivity in the Mexico City clayey aquitard: Field piezometer rising–head tests". Hydrogeology Journal.
65. Vázquez-Sánchez, Jaimes-Palomera R., 1989. "Geología de la cuenca de México". Geofísica Internacional.
66. 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, UNAM, México.
67. Vergara-Huerta., 2015. "Modelo de velocidades sísmicas en la subcuenca de Chalco, Edo. de México, mediante el análisis de cocientes H/V de vibraciones ambientales", Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, México.