



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelo matemático de flujo del acuífero de
Texcoco, como una herramienta de gestión y
planificación hídrica para el desarrollo
sustentable de la región**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Patricio Suárez Romero

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Víctor Andrés Lojero Ochoa



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que han sido parte de este camino tan bello y enloquecido que es la universidad.

A **mis padres** Miguel e Ileana. Por estar ahí para mí, apoyarme, quererme, guiarme y motivarme a seguir mis sueños y salir adelante a pesar de cualquier cosa, siempre han sido para mí el mejor ejemplo. Esto no hubiera sido posible sin ustedes, ¡los quiero muchísimo!

A **mis hermanos** Tate y Lola. Mis carnalitos, siempre vamos juntos con todo y pa' delante, nunca se rindan en nada de lo que hagan.

A **Valentina** mi compañera de vida, mi mejor amiga y mi porrista más grande. Gracias de verdad por siempre escucharme y ponerme atención, regañarme, enseñarme a enfrentar mis miedos, motivarme a seguir y no rendirme, ser mi compañera de glotonerías y la mejor persona que he conocido en este mundo. Gracias por todo tu amor gorda, te amo muchísimo.

Al director de esta tesis el **M.I. Victor Lojero Ochoa**. Muchas gracias por todo tu apoyo, tu tiempo, tu entrega, tus consejos y tu amistad, ten por seguro que me ha ayudado a cambiar para bien y que seguiré trabajando duro para ser un gran ingeniero.

A mi amigote **Gerardo**. Por echarme la mano siempre que pudo desde que llegue a esta ciudad y antes, gracias por todo.

A mis sinodales.

M.C. Noel Hernández Laloth

M.C. Sergio Salinas Sánchez

Ing. Alberto Arias Paz

Gracias por todo su apoyo, su tiempo, sus enseñanzas y sus comentarios que ayudaron a que este trabajo fuera lo que es hoy.

Al Departamento de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM y al **Dr. Fernando J. González Villareal**. Por las enseñanzas, el tiempo, el apoyo y la beca que me otorgaron para mi titulación.

A la **M.I. Isabel Domínguez Trejo**. Por ayudarme a llevar a cabo todo mi proceso de titulación, gracias por siempre ser amable conmigo y con todos los estudiantes.

A la **UNAM**. Por brindarme a través de estos últimos 5 años un bellissimo lugar que se convirtió en mi segunda casa, a todos los maestros que formaron parte de mi carrera y que me enseñaron el amor por la ciencia la naturaleza. Siempre estaré orgulloso de haber sido parte de la máxima casa de estudios de este país.

A toda mi familia y amigos que se preocupan por mí y me han brindado su apoyo, ahora si agárrense que ahí les voy.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Alcances	2
2. METODOLOGÍA	3
3. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
4. MARCO FÍSICO REGIONAL	31
4.1. Localización, fisiografía y morfología	31
4.2. Clima	33
4.3. Hidrología	35
4.4. Demografía	37
5. MODELO GEOLÓGICO	39
5.1. Unidades litoestratigráficas	40
5.2. Secciones Geológicas	50
6. MODELO GEOFÍSICO	53
7. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO	
56	
7.1. Dominio y geometría del sistema	59
7.2. Condiciones de frontera	61
7.3. Parámetros hidráulicos	64
7.4. Calidad del agua subterránea	66
7.5. Definición de los sistemas jerárquicos de flujo del agua subterránea	68
7.5.1. Elevación del nivel estático	70
7.6. Unidades Hidrogeológicas	72
7.7. Recarga del agua subterránea	79
7.8. Identificación de fuentes y/o sumideros	81
7.9. Balance de aguas subterráneas	84
7.9.1. Entradas	85
7.9.2. Salidas	91

7.9.3. Balance	93
8. MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO	94
8.1. Software empleado.....	96
8.2. Definición del área del modelo	96
8.3. Discretización espacial y temporal	97
8.4. Definición de zonas activas e inactivas	99
8.5. Asignación de parámetros hidráulicos	99
8.6. Condiciones iniciales	101
8.7. Condiciones de frontera	102
8.8. Etapa de calibración.....	106
8.8.1 Resultado del balance de masas obtenido con el modelo calibrado.	113
8.8.1 Análisis de sensibilidad	115
9. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS Y PROGRAMAS DE GESTIÓN HÍDRICA.	118
9.1. Escenarios	120
9.2. Programas de gestión hídrica	122
10. RESULTADOS DEL MODELO Y EVALUACIÓN DE PROGRAMAS DE GESTIÓN.....	128
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
11.1. Conclusiones	138
11.2. Recomendaciones.....	141
ANEXOS	143
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

Resumen

El acuífero de Texcoco es el principal recurso hídrico de 13 municipios del Estado de México cuya población conjunta suma aproximadamente 3.3 millones de personas. La principal actividad económica de la región es la agricultura, la cual a su vez se presenta como uno de los principales agentes de estrés para el acuífero debido a la alta demanda de agua que requiere.

Aproximadamente el 56% del agua utilizada en la región proviene del subsuelo. En 2018 el volumen de agua extraído del acuífero de Texcoco fue de 178.4 millones de m³/año, de los cuales el 49.08 % corresponde al uso público urbano, 30.46 % al volumen de agua para uso agrícola, 2.64% para el uso industrial y otros usos incluyendo al pecuario suman el 17.83%. Actualmente, el volumen de agua que recarga al acuífero en explotación es de 41.138 millones de m³/año.

Esta situación, aunada a la carencia endémica de agua potable de la región y a la urbanización de las zonas de recarga, han generado una sobreexplotación de -137.263 millones de metros cúbicos anuales.

Los estratos que conforman el subsuelo de la zona lacustre del Valle de México han demostrado padecer asentamientos, daños a infraestructura e incremento en la susceptibilidad ante sismos, cuando son sometidos a bombeo excesivo del agua subterránea que contienen. Esto se traduce en repercusiones económicas y sociales para la población.

En la actualidad, los modelos matemáticos de flujo y transporte de agua subterránea son una excelente herramienta para interpretar las condiciones de un acuífero, proveen la información relevante para tomar decisiones relacionadas con el manejo del agua

subterránea y permiten simular el impacto a futuro en los recursos hídricos subterráneos de proyectos y/o regiones. Por lo tanto, normar el uso de los modelos matemáticos de flujo y transporte como parte de la gestión de los recursos hídricos subterráneos del país, es necesario para garantizar la cantidad y calidad del recurso en la actualidad y para generaciones futuras.

En este estudio se evaluaron las condiciones actuales del acuífero superior del Ex-Lago de Texcoco y se plantearon dos posibles escenarios y programas de gestión hídrica el “Programa inercial” y el “Programa de rescate” para conocer sus condiciones a futuro. Los programas fueron simulados a través de un modelo matemático de flujo sobre un periodo de 12 años

El “Programa de rescate” se evaluó mediante el uso del modelo matemático de flujo, simulando las acciones implementadas en este programa para el periodo 2018-2030. Se observó una recuperación de los niveles piezométricos del acuífero de hasta 4 metros por año en algunas zonas.

Palabras clave: acuífero de Texcoco; sobreexplotación; bombeo excesivo; modelos de agua subterránea; gestión de los recursos hídricos.

Abstract

Texcoco's aquifer is the main source of water for 13 municipalities inside the State of México, the total population sums up to 3.3 million people. Agriculture represents the principal economic activity and it also represents one of the biggest stress agents for the aquifer due to the high water demand it needs.

Approximately 56% of the water used inside the region comes from groundwater. In 2018 the total assigned volume for the aquifer was 178.4 million cubic meters of which 49.08% were for public use, 30.46% for agricultural use, 2.64% for industrial use and 17.83% are for other uses including livestock. The volume of water that recharges the upper aquifer is 41.138 Mm³/year.

Excessive water pumping added to the autochthonous lack of water and the urbanization of the aquifer's recharge zones have generated an overexploitation of -137.263 million cubic meters per year.

The sum of all this generates ground subsidence, damage to the city's infrastructure and earthquake vulnerability at the former lake zone. This translates to economic and social repercussions to the state.

Nowadays, groundwater simulations are an excellent tool for interpreting groundwater conditions inside an aquifer, they provide the information required to make groundwater management related decisions and they allow the user to simulate future scenarios for a given region.

Therefore, standardizing the use of groundwater simulations or models a mandatory part of the country's groundwater resource management programs is necessary for guaranteeing good quality water availability for today's population and for future generations.

In this study, present conditions for Texcoco's Upper Granular Aquifer were evaluated. Two possible scenarios and water management programs were proposed, the "Inertial Program" and the "Rescue Program" to predict the aquifer's future conditions. The water management programs were evaluated using a groundwater model on 12-year period. The "Rescue Program" was evaluated reproducing several actions implemented on this program through a groundwater simulation for the 2018-2030 period. The simulation showed a recovery for the hydraulic heads of up to 4 meters per year in some areas inside the acuífero.

Key words: Texcoco aquifer; overexploitation; Excessive water pumping; groundwater simulations; groundwater resource management.

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo que muestra el desarrollo del trabajo.	6
Figura 2 Localización del Ex-Lago de Texcoco (imagen central) donde se muestran los rasgos morfológicos que lo delimitan, el límite estatal Ciudad de México – Estado de México y el límite administrativo para el acuífero de Texcoco (1507). Elaboración propia.	33
Figura 3 Precipitación promedio por mes en mm para el periodo de 1999 – 2009 medida en las estaciones hidrometeorológicas Lago “Nabor Carrillo” y “Colonia Educación”. Modificado de (Mendoza-Archundia, 2012)	34
Figura 4 Temperatura promedio por mes en °C para el periodo de 1999 – 2009 medida en las estaciones hidrometeorológicas Lago “Nabor Carrillo” y “Colonia Educación”. Modificado de (Mendoza-Archundia, 2012)	35
Figura 5 Funcionamiento hidrológico actual de la cuenca del Ex-Lago de Texcoco, (Santoyo et al., 2005).....	37
Figura 6 Datos de población del Estado de México para el periodo 1970 – 2015. Modificado de (INEGI, 2010) e (INEGI, 2015)	38
Figura 7 Unidades litoestratigráficas de la Cuenca del Valle de México. Tomado de (Vázquez y Jaimes, 1989)	48
Figura 8 Columna estratigráfica obtenida del pozo profundo PP-1 Texcoco. Tomado de (Lojero-Ochoa, 2014).....	50
Figura 9 Pozo Mixhuca-1 tomado de (Unda-López, 2016), Pozo profundo Texcoco-1 Y Sondeo-5 tomado de (SHCP, 1969), Pozos Ramal Texcoco (PRT-13, PRT-15, PRT-16, PRT-17, PRT-18, PRT-20) tomados de (CONAGUA, 2006b), Sección geofísica 1 (CFE, 1996) y Secciones geológicas 2 y 3 (S-2 y S-3) tomadas de (Mendoza-Archundia, 2012).	51
Figura 10 Sección Geológica A – A´, Elaboración propia.....	52
Figura 11 Sección Geológica B – B´, Elaboración propia.....	53
Figura 12 Se muestran en el mapa 3 secciones geofísicas con clave SG1: Sección geofísica 1 (CFE, 1996), SG2: Sección geofísica 2 (CFE, 1996) y PG3: Perfil geofísico 3 (COPEI Ingeniería, 2015).	56
Figura 13 Polígono para el acuífero administrativo 1507 y acuíferos colindantes.....	60
Figura 14 Sección Hidrogeológica A – A´ donde se muestran las fronteras del modelo, las fronteras corresponden a la superficie entre dos puntos especificados dentro de la imagen, siguiendo el rasgo sobre el que se encuentran los dos.....	63
Figura 15 Límite de calidad del agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para sólidos disueltos totales. Tomado de (SEMARNAT, 2018)	68
Figura 16 Elevación del nivel estático en metros para el año 20006, calculado a partir de la información publicada por OCAVM y SACMEX, 2018 para el año 2006. Elaboración propia.	71
Figura 17 Elevación del nivel estático en metros para el año 2018, calculado a partir de la información publicada por OCAVM y SACMEX, 2018 para el año 2018. Las líneas punteadas fueron calculadas infiriendo una evolución del nivel estático de -1 m/año partiendo de los niveles publicados para el año 2005. Elaboración propia.	72
Figura 18 Sección hidrogeológica A – A´. Elaboración propia	76
Figura 19 Mapa hidrogeológico y sección A - A´	77

Figura 20 Pozos de extracción activos para 2006 (izquierda) y 2018 (derecha) divididos por tipo de uso, mostrando una gráfica del tipo de uso en porcentaje para cada año.	83
Figura 21 Elevación del nivel estático (2006) donde se observan las entradas por flujo subterráneo (líneas de flujo) dentro de 7 diferentes celdas de entrada.	89
Figura 22 Área del modelo matemático de flujo	97
Figura 23 Zona activa (rojo).....	99
Figura 24 Distribución de la conductividad hidráulica, capa 1 (valores por color en m/s)	100
Figura 25 Distribución de la conductividad hidráulica, capa 2 (valores por color en m/s)	101
Figura 26 Distribución de la conductividad hidráulica, capa 3 (valores por color en m/s)	101
Figura 27 Área de recarga dividida en dos zonas, la zona azul marino corresponde al coeficiente de infiltración de 20% y la zona azul cielo tiene un coeficiente de infiltración del 7.05%	103
Figura 28 Pozos de bombeo dentro del modelo matemático	104
Figura 29 Celdas de entrada por flujo subterráneo horizontal (GHB)	105
Figura 30 Gráfica “Valor observado vs Valor simulado” de 92 pozos de observación para los años 2010, 2014 y 2018.....	111
Figura 31 Elevación del nivel estático, año 2018	113
Figura 32 Cambios en la Raíz del error cuadrático medio conforme a una variación de los parámetros GHB y k_x	116
Figura 33 Gráfica de análisis de sensibilidad. Se muestran los valores del modelo calibrado y del modelo con un aumento del 10% en las entradas por flujo subterráneo horizontal.	116
Figura 34 Gráfica de análisis de sensibilidad. Se muestran los valores del modelo calibrado y del modelo con una disminución del 10% en las entradas por flujo subterráneo horizontal.	117
Figura 35 Gráfica de análisis de sensibilidad. Se muestran los valores del modelo calibrado y del modelo con un aumento del 10% en la conductividad hidráulica	117
Figura 36 Gráfica de análisis de sensibilidad. Se muestran los valores del modelo calibrado y del modelo con una disminución del 10% en la conductividad hidráulica	118
Figura 37 Ubicación de los pozos propuestos para la implementación de los proyectos de recarga artificial.	128
Figura 38 Elevación del nivel estático para los programas Inercial y de Rescate en los años 2018, 2022, 2026 y 2030.....	131
Figura 39 Abatimientos del nivel estático para los programas Inercial y de Rescate en los años 2018, 2022, 2026 y 2030.....	132
Figura 40 Hidrógrafos de modelo	135
Figura 41 Hidrógrafos del modelo para los programas Inercial y de Rescate en los años 2018, 2022, 2026 y 2030.....	136

Índice de tablas

Tabla 1 Distribución de la población dentro de los límites del acuífero Texcoco por Municipio. Tomado de (INEGI, 2015)	39
Tabla 2. Se presentan 3 unidades geofísicas para la zona de estudio, las cuales fueron definidas con base en valores de resistividad eléctrica, tipo de litología y salinidad del agua (CFE, 1996: COPEI Ingeniería, 2015).	55
Tabla 3 Fronteras hidrogeológicas.....	64
Tabla 4 Unidades hidrogeológicas.....	78
Tabla 5 Volúmenes extraídos por tipo de uso para el acuífero de Texcoco en los años 2006 y 2018, según el REPDA 2006 y REPDA 2018.	82
Tabla 6 Calculo de entradas por flujo subterráneo horizontal.....	90
Tabla 7 Volúmenes extraídos por tipo de uso para el acuífero de Texcoco en el año 2006, según el REPDA 2006	92
Tabla 8 Volúmenes extraídos por tipo de uso para el acuífero de Texcoco en el año 2018, según el REPDA 2018	92
Tabla 9 Resumen del balance de aguas subterráneas, Acuífero de Texcoco.....	93
Tabla 10 Parámetros hidráulicos para las unidades hidrogeológicas UH-1, UH-2, UH-3, UH-4, UH-5 y UH-6	100
Tabla 11 Pozos de observación para el año 2010, con coordenadas X y Y en UTM, Valor observado de elevación del nivel estático, valor simulado por el modelo y valor residual obtenido de la diferencia del valor simulado con el valor observado.	108
Tabla 12 Pozos de observación para el año 2014, con coordenadas X y Y en UTM, Valor observado de elevación del nivel estático, valor simulado por el modelo y valor residual obtenido de la diferencia del valor simulado con el valor observado.	109
Tabla 13 Pozos de observación para el año 2018, con coordenadas X y Y en UTM, Valor observado de elevación del nivel estático, valor simulado por el modelo y valor residual obtenido de la diferencia del valor simulado con el valor observado.	110
Tabla 14 Balance de aguas subterráneas 2018.....	114
Tabla 15 Evaluación de Escenarios y Programas de gestión 1	129
Tabla 16 Evaluación de Escenarios y Programas de gestión 2	130
Tabla 17 (CONAGUA 2006b)	143
Tabla 18 (Cardona y Hernandez, 1985).....	143
Tabla 19 (CFE, 1996).....	144
Tabla 20 (Domenico & Schwartz 1990).....	145
Tabla 21 (Morris & Johnson, 1967)	146
Tabla 22 (Domenico, 1972).....	146
Tabla 23 (CONAGUA 2012)	147

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El manejo adecuado del agua subterránea es de gran importancia, sobre todo en regiones donde esta funge como la principal fuente de abastecimiento. La implementación de políticas de gestión para la conservación del acuífero es una tarea compleja, pues requiere de un conocimiento amplio de las condiciones hidrodinámicas del sistema y de su funcionamiento. Una manera efectiva de evaluar la eficacia de los programas de gestión hídrica es por medio del desarrollo, calibración e implementación de modelos matemáticos de flujo que permitan conocer las condiciones y efectos ante cambios en las diferentes variables hidrológicas, tales como volúmenes de extracción, recargas inducidas, entre otras.

El acuífero de Texcoco provee a 13 municipios del Estado de México cuya población conjunta suma aproximadamente 3.3 millones de personas (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2015). Este cuenta con una sobreexplotación de -137.263 millones de metros cúbicos anuales debido a que aproximadamente el 56% del agua utilizada en la región proviene del subsuelo, estas extracciones superan en volumen a la recarga natural del acuífero.

La alta concentración demográfica y el mal manejo de los recursos hídricos, aunados a las características hidrológicas, geológicas y fisiográficas de la zona del Ex-Lago de Texcoco, generan a la fecha, una amplia gama de problemas para los habitantes de la región. Algunos de estos problemas son la insuficiencia en el abastecimiento de agua,

problemas de contaminación, asentamiento del terreno y problemas de sismicidad, los cuales se traducen en repercusiones económicas y sociales para la población.

1.2. Objetivos

El objetivo de esta investigación es elaborar un modelo matemático de flujo del acuífero de Texcoco, que sirva como herramienta para plantear y evaluar programas de gestión hídrica que ayuden a disminuir los abatimientos del nivel estático y la condición de sobreexplotación actual del acuífero dentro de un periodo de tiempo de 12 años.

1.3. Alcances

Haciendo un análisis de la problemática presente en la zona perteneciente al acuífero de Texcoco y considerando el objetivo propuesto, se plantean los siguientes alcances de esta investigación:

- Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de Texcoco con base en las propiedades geológicas de los materiales que conforman el subsuelo del Ex-Lago de Texcoco y los diferentes componentes del sistema hidrogeológico que conforma a este mismo.
- Elaborar un modelo matemático de flujo para el acuífero de Texcoco con base en la información establecida en el modelo hidrogeológico conceptual y calibrarlo con base en información real de pozos de observación.
- Plantear dos escenarios para el acuífero que se considerarán para la aplicación de programas de gestión hídrica.

- Plantear dos programas de gestión hídrica para el acuífero el “Programa inercial” y el “Programa de rescate”

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo se dividió en 7 etapas, las cuales se describen a continuación:

Etapa 1 Recopilación y análisis de información bibliográfica:

Como punto de partida se recopiló y analizó una larga lista de información bibliográfica con la cual se sentaron las bases para el desarrollo de esta investigación.

Etapa 2 Integración y desarrollo de los modelos conceptuales:

Con base en la integración de la información recopilada, tomando en cuenta los estudios más relevantes, se desarrolló un marco físico regional donde se describen las características climatológicas, morfológicas, hidrológicas y geográficas del área de estudio. Se desarrolló un modelo geológico y un modelo geofísico describiendo las características de mayor importancia para las rocas albergadas en el subsuelo de la zona de estudio y finalmente, se integraron bases de datos existentes para formar una base de datos de información piezométrica e hidrogeoquímica de la zona del Ex-Lago de Texcoco.

Etapa 3 Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual:

A partir de la integración de los modelos y bases de datos desarrollados en la Etapa 2, se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual para la zona del Ex-Lago de Texcoco en donde se definieron aspectos clave sobre las características del acuífero, estos son:

- Dominio y geometría del sistema
- Condiciones de frontera
- Determinación de parámetros hidráulicos
- Hidrogeoquímica y calidad de las aguas subterráneas
- Definición de los sistemas jerárquicos de flujo del agua subterránea
- Unidades hidrogeológicas
- Recarga de agua subterránea
- Identificación de fuentes y/o sumideros
- Balance de aguas subterráneas

Etapa 4 Elaboración del modelo matemático de flujo y calibración:

Con base en el modelo hidrogeológico conceptual definido, se generó un modelo matemático de flujo donde se tradujeron aspectos del modelo hidrogeológico conceptual a variables dentro del software Model Muse. Se calibró el modelo comparando las cargas hidráulicas medidas en los pozos de observación para los años de 2010, 2014 y 2018 y los valores generados por el modelo, ajustando parámetros por medio del método manual de prueba y error hasta obtener un error cuadrático medio aceptable.

Etapa 5 Planteamiento de escenarios y programas de gestión hídrica:

Para poder alcanzar el objetivo planteado en esta investigación fue necesario plantear una serie de posibles escenarios y programas de gestión para la zona de estudio. Con respecto a los escenarios, se trabajó considerando un esquema tendencial y uno sustentable. Las variables consideradas en ambos escenarios fueron el incremento de la población, el crecimiento económico, la gobernabilidad en materia de recursos hídricos, los avances tecnológicos y las políticas ambientales. Finalmente, plantearon programas de gestión adecuados para cada escenario en los que se implementan políticas y acciones para la gestión de los recursos hídricos en la zona de estudio.

Etapa 6 Evaluación de programas y escenarios:

Una vez calibrado el modelo matemático y planteados los escenarios y programas a evaluar, se simularon por medio del uso del modelo matemático de flujo en un periodo de tiempo de 12 años.

Etapa 7 Resultados, conclusiones y recomendaciones:

Los resultados obtenidos a partir del modelo se presentaron para el periodo de 2018-2030 a través de 4 hidrógrafos distribuidos en distintos puntos dentro del modelo, 4 mapas de elevación del nivel estático y 4 mapas de abatimientos. Se realizó un análisis acerca de los efectos de la implementación de los dos planes de gestión en los diferentes escenarios simulados.

En la Figura 1 se presenta un esquema de la metodología seguida durante el desarrollo de este trabajo.

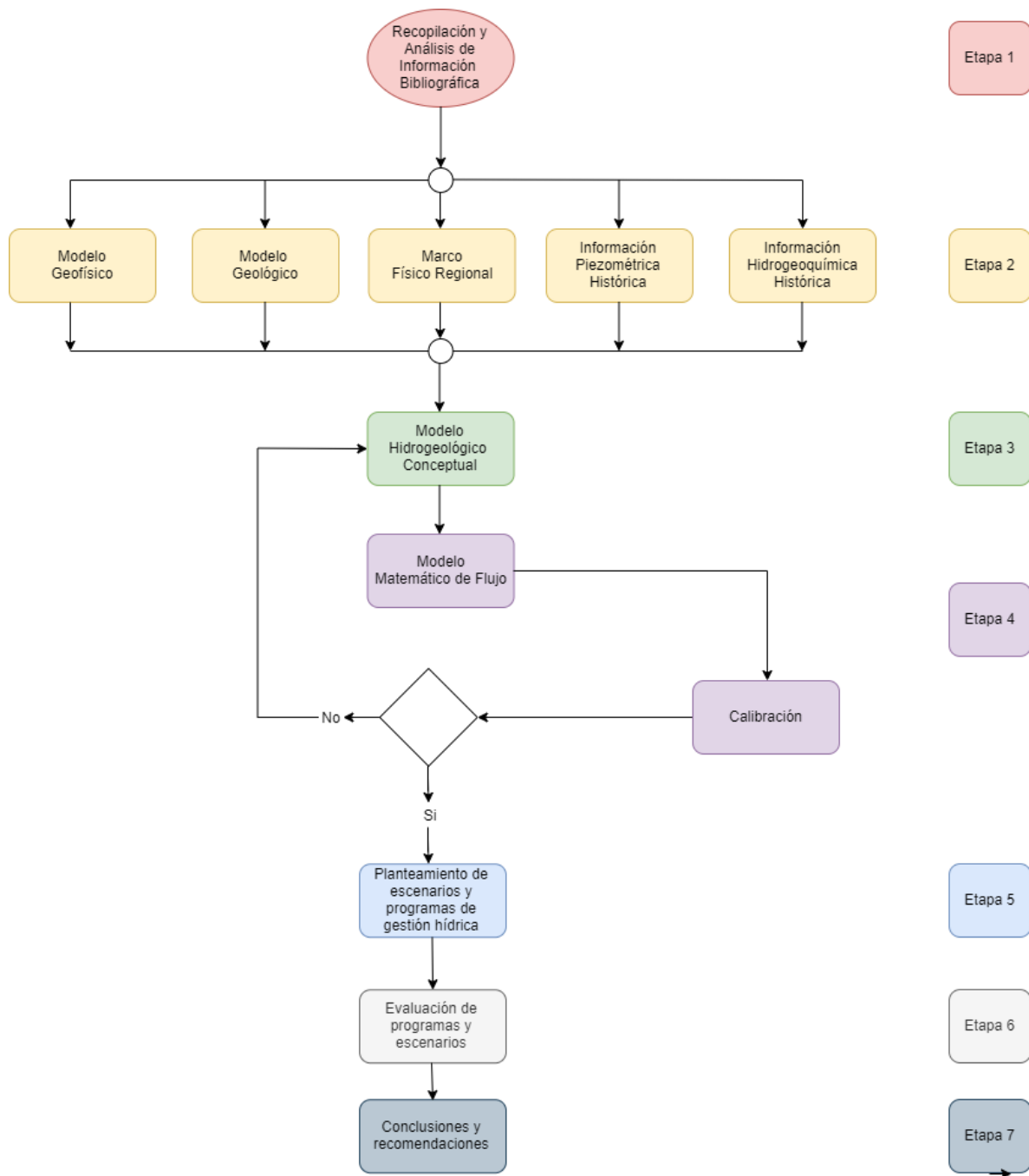


Figura 1 Diagrama de flujo que muestra el desarrollo del trabajo.

3. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este apartado presenta la recopilación y análisis de la información de mayor relevancia utilizada para el desarrollo de esta investigación. Se revisó información relacionada con la fisiografía, geología, geofísica, hidrogeología e hidrogeoquímica del Ex-Lago de Texcoco, así como información piezométrica y censos de extracción para diferentes periodos de tiempo. Se analizó un estudio de modelación matemática de flujo subterráneo realizado en el año 2006 y finalmente, se consultaron fuentes relacionadas con la gestión sustentable de las aguas subterráneas y la planificación hídrica.

El conjunto de estudios y publicaciones consultadas suma un total de 36 y se presenta por temas, a continuación:

Marco físico.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010
Estadísticas Históricas de México 2009, México

En esta publicación se presentaron datos históricos sociales y políticos de México, así como información demográfica para cada estado de la república.

- Ortiz, E. 2008. Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Ciudad de México, México.

Esta publicación presentó un glosario que sirve como elemento de apoyo para la comprensión de las principales características, edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de la República Mexicana.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2015. Encuesta intercensal 2015.

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática publicó en el año 2015 los resultados de la encuesta intercensal con el fin de conocer la información demográfica para los distintos municipios que abarca el área de estudio.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018, Estadísticas del Agua en México, Ciudad de México, México.

La Comisión Nacional del Agua a través de la Gerencia de Coordinación Interinstitucional que forma parte de la Subdirección General de Planeación, produce anualmente 4 publicaciones para la generación de nuevos conocimientos, apoyando la planeación y diseño de nuevas políticas públicas en beneficio del desarrollo nacional.

En este trabajo se presentaron datos estadísticos de las diferentes regiones hidrológico administrativas dando contexto social, datos de usos del agua e infraestructura hidráulica.

Geología.

- Fries, C. 1960. Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México., Universidad Nacional Autónoma de México.

En el estudio, el autor realizó una descripción litológica, estratigráfica y estructural de las formaciones geológicas que se encuentran dentro de los estados de Guerrero, Morelos y México. Además, el autor realiza una síntesis de la evolución geológica para esta zona.

- Mooser, H. F. 1961. Informe sobre la geología de la cuenca del Valle de México y zonas colindantes (No. 557.25 C6). Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.

El autor desarrolló un modelo geológico de la Cuenca del Valle de México y sus zonas colindantes. Para esto el autor elaboró un modelo fisiográfico de la cuenca caracterizando las sierras que la limitan en la actualidad y las planicies y lagos que se encuentran en su interior.

Propuso un modelo estratigráfico de la zona que abarca desde las rocas del Terciario Inferior hasta los depósitos aluviales del Cuaternario, haciendo mención a la formación Balsas (Eoceno-Oligoceno Inferior) sobre la cual se depositaron los primeros depósitos de origen volcánico. Con base en el principio de superposición de los estratos y ayudado de otras herramientas como el uso de fósiles, el autor asoció los depósitos a distintas eras geológicas.

Se presentó una hipótesis de la historia geológica y tectónica de la cuenca y finalmente se incluyeron figuras ilustrativas, mapas geológicos (1: 200,000) y columnas estratigráficas con las que se cumplió el objetivo de caracterizar la geología de la cuenca.

- Segerstrom, K. 1962. Geology of south-central Hidalgo and northeastern Mexico: United States Geological Survey Bulletin, 1104-C, 87–162.

El autor realizó una descripción geológica detallada de un área que se extiende desde Pachuca a Zimapán, Hidalgo y hasta los límites de la Ciudad de México, en la descripción se cuenta con información geográfica, topográfica, climatológica, geomorfológica y geológica con el objetivo de prospeccionar yacimientos minerales en la zona de estudio para su explotación.

El autor propuso un modelo estratigráfico que abarca desde el Jurásico hasta el Pleistoceno

- Vázquez-Sánchez, E., y Jaimes-Palamera, R. 1989. Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, 28(2).

Este trabajo tuvo como objetivo actualizar el “modelo estratigráfico-estructural-petrogenético” de la Cuenca de México. El modelo, abarcando desde el Cretácico hasta el Cuaternario, fue desarrollado a partir de trabajo de campo, interpretación fotogeológica e interpretación de información ya existente, se tomaron los cortes litológicos de multipiezómetros, pozos de explotación de agua. Se interpretaron

registros geofísicos SEVs y pruebas de refracción sísmica. La información más relevante obtenida en este estudio fue la siguiente: 4 secciones geológicas, un mapa geológico regional, una correlación estratigráfica detallada y un modelo de evolución geológica de la región.

- Lojero-Ochoa, V. A. 2014. Evaluación de los asentamientos por consolidación de los suelos lacustres en la zona del proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) en el antiguo Lago de Texcoco. (Tesis de maestría) Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación de los asentamientos por consolidación de los suelos lacustres del ex lago de Texcoco, considerando un modelo unidimensional de consolidación y dos factores desencadenantes: consolidación por peso propio del propuesto nuevo aeropuerto y consolidación por abatimiento del nivel piezométrico del acuífero.

Se concluyó que el proceso de consolidación por extracción de agua sólo ocurre en el acuífero granular conformado por la unidad geotécnica llamada depósitos profundos, calculándose un abatimiento del nivel estático de 1.15 m/año, también se determinó que el asentamiento debido a la extracción de agua del acuífero es de 1.1 cm/año.

Por otro lado, la información de mayor interés, proviene del modelo hidrogeológico que se propone como parte del desarrollo de este trabajo, en este capítulo, se realiza un análisis de piezometría y calidad del agua, se proponen 4 unidades hidrogeológicas donde el autor remarca que existen diferencias marcadas

entre estas debido a su salinidad y grados de permeabilidad. Además, el análisis del comportamiento hidrodinámico para los años de 1970, 1986 y 2007, mediante multipiezómetros con corte litológico instalados en la zona de estudio indica que en 1970 el acuífero en explotación se encontraba confinado donde el flujo de agua generaba un gradiente ascendente muy grande y que para el año 2007, el comportamiento hidrogeológico del depósito aluvial es el de un acuífero granular semiconfinado, el cual va perdiendo carga hidráulica proporcionalmente a la extracción regional.

- Unda-López J. A. 2016. Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México. (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

En este trabajo, el autor realizó, con base en reportes litológicos de muestras de canal y núcleos, fechamientos radiométricos y registros geofísicos de 4 pozos profundos ubicados en el Valle de México, una actualización y correlación litológica de las columnas de los pozos perforados por Pemex en 1986: Copilco-1, Roma-1, Mixhuca-1 y Tulyehualco-1.

Geofísica.

- Comisión Federal de Electricidad (CFE) 1996. Estudio Geofísico geohidrológico de la zona del Lago Nabor Carrillo, Texcoco, Estado de México. (reporte técnico). Subdirección Técnica Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Ciudad de México, México.

En el año de 1996, la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México, realizó en el área del lago Nabor Carrillo, un estudio geofísico-hidrogeológico para investigar el posible acuífero de agua dulce de Texcoco y su posible comunicación con el acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México. La exploración geofísica fue realizada por la Comisión Federal de Electricidad quien efectuó un total de 60 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), con cuya información se realizaron 9 secciones geofísicas en la cercanía del Lago Nabor Carrillo.

Se definieron seis sub-unidades geoelectricas correlacionadas con la salinidad del agua. Las resistividades más bajas están asociadas con agua de mayor salinidad, lo que indica mayor cantidad de Sólidos Disueltos Totales (SDT) y por lo tanto una menor calidad del agua. Se muestra a continuación una síntesis de la información analizada. Se presenta un resumen de estas unidades en el apartado de Anexos (Tabla 17) para las unidades geofísicas definidas en este estudio en el apartado de Anexos.

- Consortio de Ingenieros de Guanajuato S.A. de C.V. (CIGSA), 2011. Estudio de exploración geofísica, modelo tridimensional de la geología del subsuelo, integración de los censos de aprovechamientos de las aguas subterráneas históricos y su actualización, reconstrucción de los registros piezométricos e hidrométricos históricos y recorridos piezométrico e hidrométrico, asociados a la recarga artificial con agua residual tratada al acuífero Cuautitlán-Pachuca, en la zona de El Caracol, Estado de México. Ciudad de México.

La empresa Consultores en Ingeniería Geofísica, S.A. de C.V. realizó estudio geofísico dentro de un área manejada administrativamente por la CONAGUA, en los límites de tres acuíferos: Cuautitlán-Pachuca, Texcoco y Zona Metropolitana Ciudad de México. Este estudio fue elaborado con el objetivo de aprovechar de manera óptima zonas para favorecer el proceso de recarga al acuífero.

La campaña de exploración geofísica consistió en la aplicación de la técnica de sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM), con los cuales se midió la resistividad del suelo en 40 sitios y se elaboraron un total de 13 perfiles geoeléctricos.

- COPEI Ingeniería. 2015. Proyecto Texcoco. (Reporte Técnico) Ciudad de México, México.

La compañía COPEI Ingeniería, en el año de 2015, realizó un estudio geofísico de la zona del ex Lago de Texcoco donde se efectuaron un total de 8 Sondeos Electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM) y dos sondeos eléctricos

verticales (SEV), con cuya información se realizaron 3 perfiles geoelectricos en la cercanía del Lago Nabor Carrillo. Se definieron límites de resistividades eléctricas muy marcados dentro de las formaciones geológicas, los cuales se encuentran relacionados con la salinidad del agua de las formaciones. Las resistividades más bajas están asociadas con agua de mayor salinidad, lo que indica mayor cantidad de Sólidos Disueltos Totales (SDT) y por lo tanto una menor calidad del agua. Se definieron 4 unidades geoelectricas correlacionadas con la salinidad del agua.

La primera unidad comprende un rango de resistividades de 6 – 20 Ohm/m y se encuentra desde la superficie hasta una profundidad aproximada de 20 metros. La segunda unidad se encuentra por debajo de la primera y tiene valores de 1 – 40 Ohm/m con un espesor aproximado de 200 m. La tercera unidad que subyace a la unidad 2, abarca un rango de resistividades de 40 – 250 Ohm/m y un espesor aproximado de 1800 m. Por último, se encuentra subyaciendo a todas las unidades anteriores, la unidad 4 que tiene valores de resistividad de 250 – 2600 Ohm/m y un espesor desconocido.

Hidrogeología.

- Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). 1969. Proyecto Texcoco, memoria de los trabajos realizados y conclusiones, Fiduciaria Nacional Financiera S.A, Ciudad de México.

El objetivo principal del Proyecto fue crear un vaso de captación y de regularización de las aguas en el Valle de México, localizado dentro del antiguo Lago de Texcoco, se llevaron a cabo decenas de estudios, los cuales constaron de

geofísica, perforaciones profundas, mecánica de suelos, estudios de salinidad del agua, pruebas de bombeo y censos de piezometría.

Otra de las metas principales del proyecto fue perforar un pozo de al menos 1500 m de profundidad para penetrar la roca basal del valle y verificar la estratigrafía bajo el Lago de Texcoco. Para esto, se perforo el pozo profundo Texcoco 1 (PT-1) con una profundidad de 2065 m. Las formaciones identificadas en el pozo (PT-1) son: a) de 0 a 505 m, arcillas, limos, arenas, areniscas y calizas arenosas; b) de 505 a 1,450 m, tobas y rocas extrusivas, travertino, brechas y conglomerados; c) de 1,450 a 2,065 m, tobas líticas y arenas, anhidrita, arcillas, margas y conglomerados calcáreos.

Con base en la exploración geológica y en las pruebas de bombeo ejecutadas los autores infirieron las siguientes conclusiones:

- El fondo del Valle constituye una depresión limitada en la base por rocas que pertenecen al Cretácico Superior, probablemente plegadas, o falladas el cual fue rellenado por materiales clásticos y aluviones producidos por erosión superficial de las sierras circundantes. En diferentes zonas y con distintas edades, se presentan derrames de lavas andesíticas y basálticas.
- Las lavas, con resistencia suficiente para conservar su agrietamiento y algunas capas superficiales de arenas o gravas, son las que realmente pueden considerarse como productoras de agua.

- Las tobas clásticas o sedimentarias tienen permeabilidad relativamente baja y a profundidades mayores de 800 m tienen una capacidad de explotación acuífera muy limitada.
 - La posibilidad de alumbramiento en la caliza basal resulto poco atractiva debido a que los estratos se encontraron a mayor profundidad de lo esperado.
 - El agua extraída dentro de la zona del Lago tiene un contenido de sales de 1600 a 2800 ppm aproximado, debido a efectos de disolución y a la contaminación con sales al ser bombeada
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco, Estado de México. Ciudad de México.

La Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica perteneciente a la Comisión Nacional del Agua publicó un estudio hidrogeológico elaborado para el acuífero de Texcoco en el cuál se realizó una caracterización geológica de las unidades, se elaboró un marco físico de la zona del Ex Lago de Texcoco y finalmente se realizó un estudio hidrogeológico que contó con información piezométrica, cálculo de parámetros hidráulicos de las unidades, estudio del comportamiento hidráulico del acuífero, estudios de calidad de agua (hidrogeoquímica), balance de aguas subterráneas y cálculo de la disponibilidad de las aguas subterráneas para el año 2002. El volumen de agua que descarga el

acuífero supera al volumen de recarga en 43.95 Mm³ lo cual indica un alto grado de sobre explotación para el acuífero.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2006a. Estudio de modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca. Ciudad de México.

La Comisión Nacional del Agua decidió realizar un estudio de modelación cuyo objetivo principal era actualizar la información para el acuífero de Texcoco (1507) y contar con un modelo hidrogeológico de la zona. Para conocer las condiciones y efectos de diferentes variables hidrogeológicas, tales como volúmenes de extracción, recarga natural e inducida y evapotranspiración, entre otras, sobre el comportamiento de los acuíferos y actualizar el número de aprovechamientos existentes cuantificando los volúmenes de extracción y sus usos.

En el estudio se definen 4 unidades hidrogeológicas, estas son:

- U1: Sedimentos lacustres
- U2: Depósitos aluviales, Formación Tarango y Depósitos Tepozteco
- U3: Vulcanitas del Mioceno
- U4: Vulcanitas del Oligoceno y calizas del Cretácico.

Los valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico que se asignaron a las distintas unidades varían de 0.0017 – 6.5 [m/d] y 0.01 – 0.28 respectivamente.

- Instituto de Geología UNAM (IG-UNAM). 2011. Proyecto de recarga artificial del acuífero con aguas tratadas del módulo experimental de tratamiento terciario en la zona federal del Lago de Texcoco, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

En este proyecto, el autor tuvo como objetivo determinar la capacidad de recarga del acuífero para proponer zonas de recarga artificial, esto se obtuvo por medio de la interpretación de estudios geofísicos (TEM y SEV) y de literatura previa.

El autor elabora un modelo de evolución piezométrica de la región mediante el análisis de los datos piezométricos registrados por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM) en pozos de observación y estaciones piezométricas, para el periodo 1990 2010.

Con base en toda esta información el autor definió escasamente un acuitardo y un acuífero granular. Se presentan mapas de niveles potenciométricos de los años 1990, 2000 y 2010, graficas de tiempo-abatimiento y características hidrogeoquímicas del agua.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2012. Pruebas de recarga instantánea y a corto plazo (activa y pasiva), Proyecto piloto de recarga Artificial El Caracol. Ciudad de México.

En el año 2012, la Coordinación de Agua Potable y Saneamiento, dependiente de la Comisión Nacional del Agua inició un proyecto con el objetivo de encontrar

diferentes alternativas para disponer de las aguas de lluvia o aguas tratadas para ser infiltradas a los acuíferos del Valle de México.

Se realizaron 18 pruebas de bombeo en etapa de abatimiento y recuperación con el objetivo de estimar parámetros hidráulicos del subsuelo en puntos estratégicos alrededor y en la zona de El Caracol, Estado de México.

Para la interpretación de las pruebas de bombeo, los autores aplicaron los métodos de análisis convencionales, como son los métodos analíticos (Theis, Cooper-Jacob, Walton, Neuman y Recuperación de Theis), cuyos resultados se compararon con los obtenidos con el método numérico alternativo de Rushton. Se aplicaron ambas metodologías, con fines comparativos y de verificar resultados; asimismo, para tener elementos indicativos de la variabilidad y contraste de la geología del subsuelo, para esta localidad en particular. La información mencionada anteriormente se presenta en la Tabla 21 en el apartado de Anexos.

Finalmente, se llevó a cabo la perforación y construcción de dos pozos de recarga artificial, ubicados en la zona federal denominada El Caracol, en Ecatepec, Estado de México, perforados a 250 m y 300 m de profundidad, respectivamente.

Asimismo, se perforaron cuatro pozos de monitoreo construidos a 200 m (uno), 250 m (dos) y 300 m (uno) de profundidad.

Se determinó la capacidad de infiltración ante diversas cargas hidráulicas mediante recarga pasiva; pozo 1: gastos obtenidos entre 14 l/s y 27 l/s y pozo 2: entre 2.8 l/s y 8.5 l/s y recarga activa (presiones de 10 kg/cm², 13 kg/cm² y 16 kg/cm²) con caudales de infiltración para el pozo No.1 de hasta 35 l/s y para el pozo No.2 de hasta 20 l/s, respectivamente. Los materiales del subsuelo favorables para la recarga

se detectaron a profundidades mayores a los 200m, siendo estos principalmente arenas y gravas.

- Geoevaluaciones y Perforaciones S.A. de C.V. 2012. Estudio de pruebas de recarga continua y su monitoreo, bajo diferentes cargas hidráulicas, en pozos piloto de recarga profunda, asociados a la recarga artificial con agua residual tratada al acuífero Cuautitlán-Pachuca.

La compañía realizó estudios de campo dentro de la zona del Ex-Lago de Texcoco, con el objetivo de definir las zonas en los estratos de subsuelo, capaces de permitir la recarga artificial de acuíferos de manera eficiente y segura, se enfocaron en dos zonas principales Cerro del Chiconautla y El Caracol.

Se llevaron a cabo pruebas de bombeo, pruebas de recarga activa y pasiva, estudios geológicos de detalle, estudios geofísicos (TEM) y muestreos hidrogeoquímicos.

- Mendoza-Archundia. E. 2012. Caracterización hidrogeológica de la porción sureste de la planicie de Texcoco, México, para establecer sitios de recarga artificial al acuífero. (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

El objetivo del trabajo fue realizar una caracterización hidrogeológica de la porción sureste de la planicie de Texcoco para establecer sitios de recarga artificial. Para determinar las zonas más convenientes para la recarga se interpretaron sondeos

electromagnéticos de 300m obteniendo 3 perfiles de resistividad los cuales se compararon con la estratigrafía observada directamente en pozos anteriores.

El autor propuso 4 unidades hidrogeológicas para la zona de estudio con base en 4 secciones geológicas propuestas e información previa, estas son: acuitardo superior, acuífero superior, acuitardo inferior y acuífero inferior. Se realizaron configuraciones de niveles potenciométricos desde el año 1990 hasta el 2010 mostrando la evolución de los niveles y la formación de 3 conos de abatimiento principales. El autor presentó un análisis de las características del agua subterránea tanto físicas como químicas. Finalmente se propusieron 4 sitios de recarga con base en la información anterior, estos se encuentran representados en un mapa.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014a. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México, México.

En el año 2014, la Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos perteneciente a la Comisión Nacional del Agua realizó la actualización del estudio hidrogeológico elaborado para el acuífero de Texcoco el cuál se encuentra compuesto por una caracterización geológica de las unidades, un marco físico de la zona del Ex Lago de Texcoco y finalmente un estudio hidrogeológico el cual abarca información piezométrica, cálculo de parámetros hidráulicos de las unidades, estudio del comportamiento hidráulico del acuífero, estudios de calidad de agua (hidrogeoquímica), balance de aguas subterráneas y cálculo de la disponibilidad de las aguas subterráneas para el año 2014.

El volumen de agua que descarga el acuífero supera al volumen de recarga en – 111.78 Mm³ lo cual indica un alto grado de sobre explotación para el acuífero.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018. Estudios básicos, factibilidad y proyecto ejecutivo (piloto) de recarga artificial en el acuífero de Texcoco. Ciudad de México.

Los autores realizaron un estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico con el objetivo de identificar zonas favorables para implementar pozos de recarga artificial para el acuífero Texcoco. Se presenta un resumen hecho a partir de la información publicada en estudios anteriores de las características generales del acuífero (Localización, clima, hidrología, geomorfología, geología, piezometría y disponibilidad del agua subterránea. Se realizaron perfiles estratigráficos por medio de la correlación de tendidos electromagnéticos en la zona de estudio que sirvieron para la descripción de tres unidades geohidrológicas. Se presenta un mapa donde se ilustran límites para la calidad del agua subterránea tomando en cuenta los datos de salinidad medidos en pozos aledaños, determinando el límite de acuerdo con el contenido de Sólidos Disueltos Totales (SDT) y determinando que las zonas al oriente y al norte del Ex-Lago de Texcoco son las más adecuadas para la extracción de agua ya que cuentan con menor salinidad.

Piezometría

- Organismo de cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM), y Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). 2018. Datos piezométricos del Valle de México. Ciudad de México.

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México y el Organismo de Cuencas del Valle de México cuentan con una base de datos de información de la medición del nivel estático y el nivel piezométrico de la región del Valle de México. La información que dichos organismos recaban tiene como objetivo principal conocer el comportamiento de los acuíferos a través de la evolución de los niveles estáticos.

Los registros almacenados en la base de datos cubren de 1968 al año 2018, donde se han medido los niveles piezométricos y los niveles estáticos, se tiene registro de 524 pozos distribuidos en la cuenca del Valle de México.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. 2006b. Proyecto de relocalización, reposición y rehabilitación de pozos pertenecientes al Programa De Acción Inmediata (PAI). Ciudad de México.

En este proyecto la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala llevó a cabo la rehabilitación y relocalización de 20 pozos. Como parte de las actividades del estudio se realizaron estudios de mecánica de suelos, resistividad eléctrica del subsuelo, cortes litológicos y características constructivas de los pozos Ramal Peñon Texcoco 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16,

17,18, 19, 20 y CLT13, de los cuales se elaboró un informe de piezometría y calidad del agua como complemento para la investigación. Se presenta la localización de los pozos en la Tabla 15 en el apartado de Anexos.

Calidad del agua subterránea.

- Cardona, A., y Hernández, N. 1985. Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el Valle de México. Tecnología y Ciencias del Agua, 10(3), 71-90.

En este trabajo, los autores desarrollaron un modelo geoquímico conceptual para los distintos acuíferos albergados en el Valle de México con el objetivo de delimitar zonas de mala calidad del agua debido a procesos naturales y zonas con mala calidad por procesos de contaminación antropogénica. Se muestran los resultados de la interacción agua-roca y los procesos geoquímicos dominantes dentro del área de estudio. Se identificaron cinco grupos de agua, cuyas características generales aparecen en la Tabla 16 en el apartado de Anexos.

- Rudolph, D. L., Cherry, J. A., y Farvolden, R. N. 1991. Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico City. Water Resources Research, 27(9), 2187-2201.

En este trabajo, los autores evaluaron los procesos de flujo y transporte en el acuitardo arcilloso para la zona del Ex-Lago de Texcoco. Se enfocó la investigación al área en la que se encontraba en ese entonces una batería de aproximadamente 300

pozos de bombeo para extracción de salmueras pertenecientes a la compañía Sosa Texcoco S. A. Se realizó una breve descripción de los depósitos de origen lacustre dentro de la cuenca de México. Se obtuvieron parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica, características hidrogeoquímicas) para algunos de los estratos de la zona de estudio y también se realizó un censo de datos piezométricos para los pozos dentro de la zona de estudio.

Mediante la evaluación de los datos históricos, estudios de campo y el análisis de un modelo numérico del flujo subterráneo y transporte de solutos dentro de un campo de pozos para uso industrial. El autor define las características hidrogeológicas del subsuelo donde describe que los dos acuíferos de poco espesor que se explotan en esta área se encuentran limitados por acuitardos de alta compresibilidad, los cuales proporcionan enormes volúmenes de agua a los acuíferos por filtración. Así mismo, la infiltración pluvial diluye las concentraciones de iones de las porosidades del acuitardo.

Los registros de concentraciones en los pozos productores y los resultados de los modelos numéricos confirman que, a lo largo de la vida útil de estos pozos, las concentraciones se han mantenido estables. Se presentan mapas de abatimientos, flujo y distribución de contaminantes.

- Ariel Constructores S.A. de C.V. 2007. Estudio hidrogeoquímico, así como de evolución de la calidad del agua subterránea en la cuenca del Valle de México año 2007, Ciudad de México.

En el año 2007 la compañía Ariel Constructores realizó un estudio hidrogeoquímico detallado para conocer la calidad del agua en el subsuelo del Valle de México, así como la evolución en la calidad del agua a través del tiempo. Se realizó un muestreo para las aguas en diferentes pozos y se compararon sus características hidrogeoquímicas para los años de 1995 y 2007.

Gestión y Planificación Hídrica.

- Piñón Martínez, N. 1989. Módulo experimental de recarga de acuíferos. Ingeniería hidráulica en México: publicación técnica de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, 4(2), 67-72.

En noviembre de 1987 se realizó una serie de pruebas de inyección de agua potable, con la finalidad de conocer la capacidad de infiltración para la zona federal del Ex-Lago de Texcoco, el proyecto se ubicó en un área aproximada de 1 km², entre el lago Dr. Nabor Carrillo, la planta de tratamiento de nivel secundario, el lago recreativo y las lagunas facultativas. Constó de 10 piezómetros y un sistema de recarga compuesto por tres pozos, dos de 200 m y uno de 160 m de profundidad, con un tubo ranurado de 12 m. Se obtuvo un gasto de infiltración máximo de 27 l/s/pozo.

- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

- Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997,
Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
- Norma Oficial Mexicana NOM-013-CONAGUA-2000
Redes de distribución de agua potable, especificaciones de hermeticidad y métodos de prueba.
- Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003.
Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
- Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007,
Infiltración artificial de agua a los acuíferos. - Características y especificaciones de las obras y del agua.
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015
Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

- Palacios-Vélez, O. L., y Escobar-Villagrán, B. S. 2016. La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. Tecnología y ciencias del agua, 7(2), 5-16.

En el estudio se discutieron los retos a los que se enfrenta la sociedad para el futuro con respecto al manejo de los recursos hídricos en México, considerando tres posibles escenarios, el convencional, el catastrofista y el de gran transición tomados de un estudio realizado por el Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute de Boston, se presentó un resumen de la infraestructura hidráulica construida hasta el año 2013 y se expusieron dos métodos para llevar a cabo la evaluación del grado de sobreexplotación de acuíferos: a) balance hidrológico y b) evolución de niveles de agua subterránea, tomando como ejemplo el acuífero de Texcoco.

- Instituto de Ingeniería UNAM (II-UNAM). 2018. Estudios de la segunda etapa del modelo numérico del acuífero del Valle de México – Plan de gestión integral del acuífero del Valle de México. Ciudad de México.

El objetivo general de este estudio fue definir de un plan básico de acciones y su repercusión en el tiempo implementando un plan de gestión integral para la conservación de la cantidad y calidad del agua de los acuíferos del Valle de México (Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco, Chalco y Cuautitlán-Pachuca), lograr su sustentabilidad y disminuir sus hundimientos. Otro de los objetivos fue establecer criterios técnicos y regulatorios que orienten a la Comisión

Nacional del Agua y a sus organismos regionales en la formulación e implementación de un plan de manejo sustentable de acuíferos.

Para lograr esto, se construyó un modelo hidrogeológico conceptual que finalizó con la descripción detallada de la geología, hidrogeología, piezometría e hidrogeoquímica y un modelo numérico para el acuífero Cuautitlán-Pachuca que posteriormente fue acoplado a toda la zona del Valle de México.

La meta establecida pretendía lograr dicha sustentabilidad en 20 años, igualando las extracciones del acuífero a la suma de la recarga natural y artificial, a través de la aplicación de ocho programas estratégicos, cada uno compuesto por una serie de acciones propuestas para aliviar la problemática identificada: cambio al marco legislativo y regulatorio, fortalecimiento institucional, disminución de extracciones, preservación de la recarga natural, promover el reúso y la recarga artificial y establecer un observatorio del acuífero.

Asimismo, se plantearon escenarios en los que se considera la variación de la población, las perspectivas socioeconómicas de la zona, las posibles mejoras tecnológicas para el acceso al agua, además escenarios tendenciales basados en la historia.

Con el uso del modelo numérico del acuífero, se analizaron y evaluaron cuáles fueron los cambios más notorios en la zona de estudio al ejecutar los programas y acciones definidos en el plan de gestión en relación al cambio de almacenamiento y hundimientos hasta el año 2050.

4. MARCO FÍSICO REGIONAL

4.1. Localización, fisiografía y morfología.

El acuífero Texcoco, definido con la clave 1507 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se ubica en la porción centro-oriental del Estado de México (Figura 2); geográficamente se localiza entre los paralelos 19° 18' y 19° 38' de latitud norte y los meridianos 98° 39' y 99° 03' de longitud oeste, abarcando una superficie de 933.57 km² (CONAGUA, 2014a). Se encuentra dentro de la región hidrológica-administrativa XIII llamada "Aguas del Valle de México" y pertenece a la subcuenca del Valle de México. Limita al norte con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, que pertenece al Estado de México; al este con el acuífero Soltepec, perteneciente al estado de Tlaxcala; al sur y sureste con el acuífero Chalco-Amecameca, perteneciente al Estado de México y al oeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Figura 2), perteneciente a la Ciudad de México (CONAGUA, 2014a).

La planicie del Ex-Lago de Texcoco se localiza dentro del Valle de México en la parte central de la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico y en la Subprovincia Fisiográfica de los Lagos y Volcanes de Anáhuac. De acuerdo con Ortiz (2008), el Eje Neovolcánico se extiende desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México constituyendo una faja de 130 km de ancho y 880 km de largo y limita con las Provincias de la Sierra Madre Oriental, Occidental y la Sierra Madre del Sur y determina el límite físico entre Norte América y Centro América.

El Ex-lago de Texcoco se encuentra en un altiplano con elevaciones de 2230–2060 metros sobre el nivel del mar (ms.n.m). Al norte, el altiplano se limita por la Sierra de Guadalupe con una elevación máxima de 2.980 ms.n.m., el Cerro de Chiconautla y la Sierra de Patlachique con elevaciones de entre 2500 y 2700 ms.n.m. respectivamente. Al oriente, limita con la Sierra Nevada, siendo este el rasgo topográfico más alto, con una elevación de más de 4000 ms.n.m. Al sur, la zona de estudio está limitada por los volcanes del Cerro de la Estrella y la Sierra Santa Catarina con elevaciones de entre 2450 y 2750 ms.n.m. y finalmente, al poniente, el altiplano se extiende hacia la Ciudad de México. (Lojero-Ochoa, 2014)

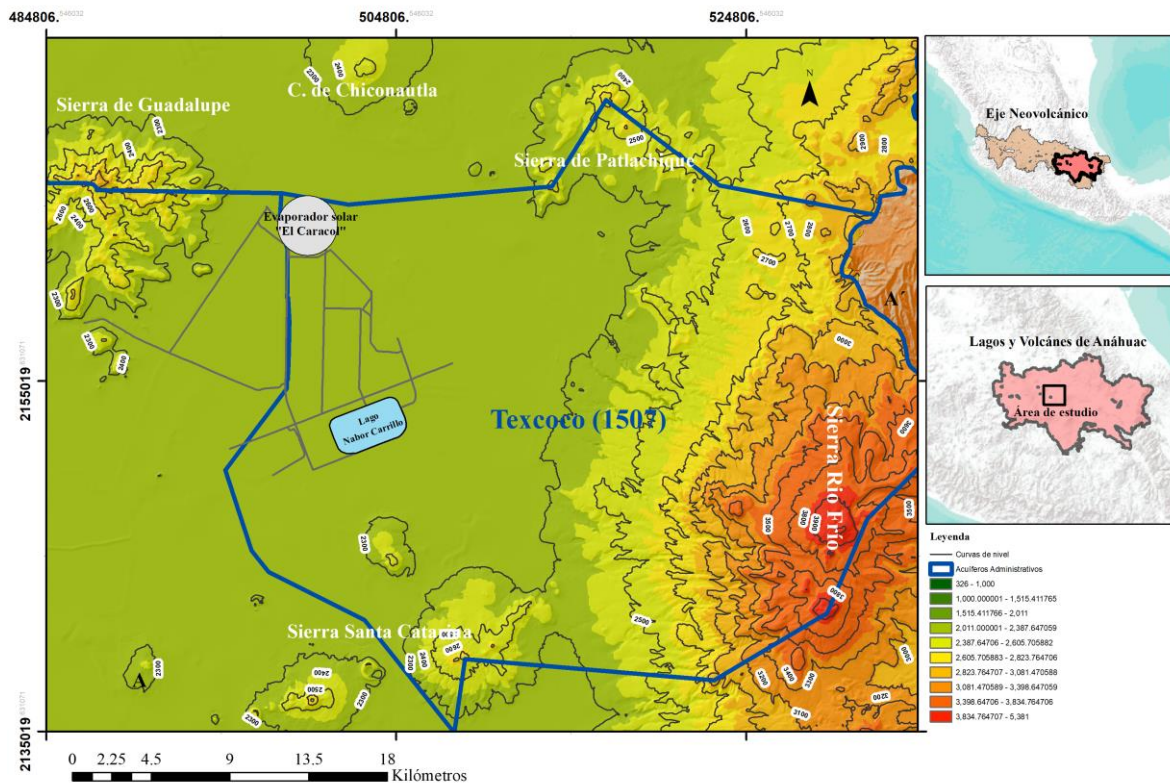


Figura 2 Localización del Ex-Lago de Texcoco (imagen central) donde se muestran los rasgos morfológicos que delimitan, el límite estatal Ciudad de México – Estado de México y el límite administrativo para el acuífero de Texcoco (1507). Elaboración propia.

4.2. Clima

La precipitación media anual del Valle de México es de 649 mm y el escurrimiento medio de 1106 Mm³/año (CONAGUA, 2018). La variación de la evaporación en el área del Ex-Lago de Texcoco presenta las mayores pérdidas en marzo, abril y mayo, disminuyendo poco a poco hasta diciembre, cuando se incrementa de nuevo y se completa el ciclo (Lojero-Ochoa, 2014). La temporada de lluvias comprende de mayo a septiembre, teniendo los máximos valores de precipitación en julio y agosto y la temporada seca corresponde a

los meses de noviembre a abril en los cuales, en ocasiones no se reporta precipitación alguna (Mendoza-Archundia, 2012).

La temperatura tiene una oscilación entre -2 y 35 °C, con una media de 18.1° C; estos valores caracterizan a las masas de aire que al descender de las elevaciones que rodean la planicie, incrementan su temperatura y favorecen la evaporación potencial en esta zona, la cual tiene un valor medio de 1700 mm (IG-UNAM, 2011). El tipo de clima y las características geológicas que constituyen el relieve de esta zona, determinan una cubierta vegetal de tipo semi-seco, con árboles como el pirúl y el fresno, además de hierbas y pastos que soportan el alto contenido de sales de los suelos que aquí existen (IG-UNAM, 2011), en las figuras 3 y 4 se muestran la precipitación promedio mensual y la temperatura promedio para dos estaciones hidrometeorológicas ubicadas dentro de la zona de estudio.

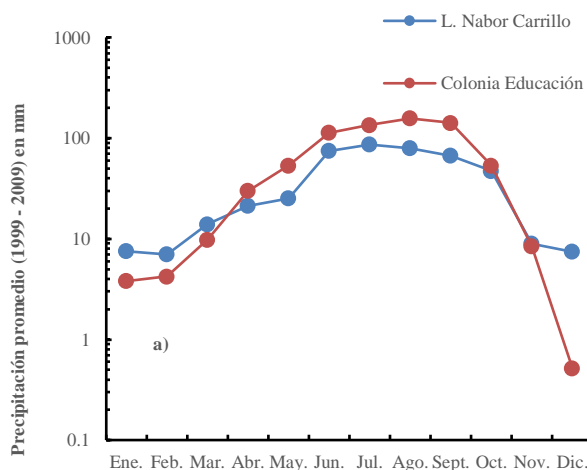


Figura 3 Precipitación promedio por mes en mm para el periodo de 1999 – 2009 medida en las estaciones hidrometeorológicas Lago “Nabor Carrillo” y “Colonia Educación”. Modificado de (Mendoza-Archundia, 2012)

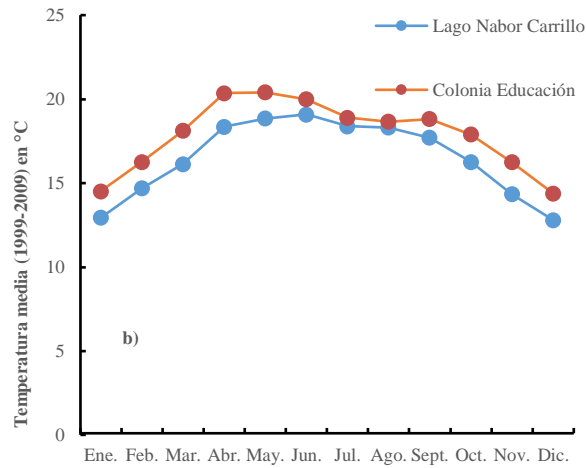


Figura 4 Temperatura promedio por mes en °C para el periodo de 1999 – 2009 medida en las estaciones hidrometeorológicas Lago “Nabor Carrillo” y “Colonia Educación”. Modificado de (Mendoza-Archundia, 2012)

4.3. Hidrología

Originalmente, el Valle de México contaba con un sistema de ríos que drenaban el agua de la cuenca hacia el sur, las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por la emisión de productos volcánicos a través de conos que dieron origen a la Sierra de Chichinautzin hace aproximadamente 600,000 años. Esto causó el cierre del drenaje, lo cual transformó a la cuenca en una cuenca endorreica y propició la acumulación de agua en la parte central del valle dando origen a los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac (CONAGUA, 2014a).

La hidrología del Ex-Lago de Texcoco está compuesta principalmente por escurrimientos intermitentes de carácter torrencial, de corta duración debido a que en

temporada de estiaje se encuentran secos (CONAGUA, 2014a). Actualmente, la cuenca es drenada artificialmente por obras de ingeniería hacia el río Tula.

En el área perteneciente al acuífero de Texcoco se identifican 9 cuencas, cuyos cauces principales corresponden a los Ríos Papalotla, Xalapango, Coxacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec y San Francisco (Figura 5); todos ellos descienden de la Sierra Nevada y desembocan en la zona federal del Ex-lago de Texcoco y su destino final es el Dren Colector del Valle, que se une finalmente con las aguas residuales de la Ciudad de México (CONAGUA, 2014a).

La red del drenaje no está bien interconectada y tiene poco desarrollo, esto gracias a la geología de la zona y su cercanía con el Ex-Lago. Los cauces principales mencionados anteriormente desaparecen en la base de la cuenca, lo cual es un indicativo directo que los materiales en la base de los cerros son permeables (CONAGUA, 2005).

Otro rasgo de gran importancia dentro de la cuenca es el sistema de lagos que conforman el Proyecto Lago de Texcoco. Este sistema recibe aguas residuales provenientes de Chimalhuacán, Ciudad Nezahualcóyotl y Ecatepec; las entradas procedentes de las sierras del oriente, además de los ríos La Compañía y Churubusco (Figura 5) (CONAGUA, 2014a).

Con base en la información publicada por INEGI, 2015, el Estado de México ha tenido un crecimiento poblacional del 1.32 % anual para el periodo de 2010 a 2015 (Figura 6).

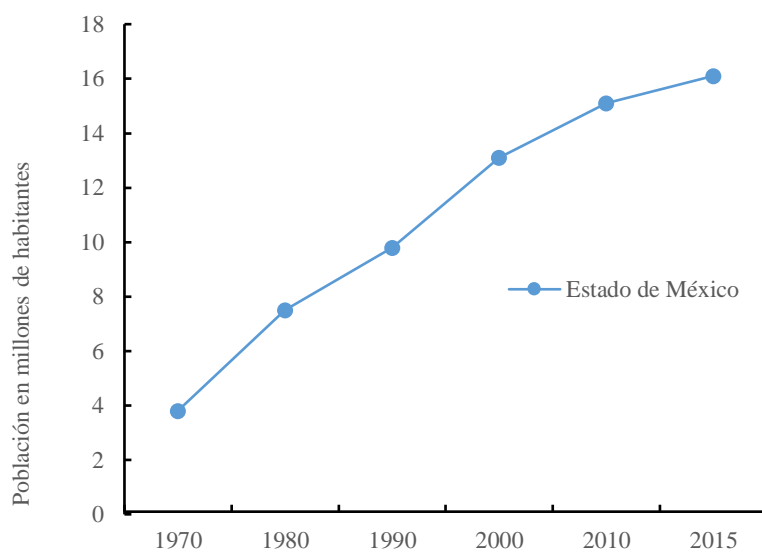


Figura 6 Datos de población del Estado de México para el periodo 1970 – 2015. Modificado de (INEGI, 2010) e (INEGI, 2015)

Tabla 1 Distribución de la población dentro de los límites del acuífero Texcoco por Municipio. Tomado de (INEGI, 2015)

Municipio	Población
Chicoloapan	204,107
Chimalhuacán	679,811
Chiconcuac	25,543
Papalotla	3,963
Texcoco	240,749
Atenco	62,392
Chiautla	29,159
Ixtapaluca	495,563
Nezahualcóyotl	1,039,867
La Paz	293,725
Tepetlaoxtoc	30,680
Acolman	152,506
Tezoyuca	41,333
Total:	<u>3,299,398</u>

5. MODELO GEOLÓGICO

En este capítulo se proporciona la información necesaria para conocer los distintos tipos de materiales que conforman el subsuelo del Ex-Lago de Texcoco. Esta información se basa en el modelo geológico planteado para la cuenca de México que fue descrito por Vázquez y Sánchez en 1989 (Figura 7), el cual contiene rocas sedimentarias marinas y continentales, así como rocas volcánicas con edades del Cretácico al reciente.

A continuación, se hace una descripción sintetizada y en orden cronológico de las unidades litoestratigráficas donde se presenta edad, litología, ubicación, espesor, estructuras

y relaciones estratigráficas para cada una de estas unidades. Esta información fue recopilada a partir de los trabajos de Vázquez y Jaimes, 1989, Fries, 1960, Mooser 1961 y Segerstorm, 1962. Además, se corroboró su existencia por medio del análisis de cortes litológicos de pozos (SHCP, 1969 y Unda-López, 2016).

5.1. Unidades litoestratigráficas

Cretácico

– Formación Morelos (Km)

De acuerdo con Fries (1960), la Formación Morelos aflora al sur de la Sierra Chichinautzin y está constituida por una interestratificación de capas gruesas de calizas y dolomías diagenéticas, concordantes con anhidritas laminares subyacentes. Fue depositada en un ambiente de plataforma marina en el Albiano Medio-Cenomaniano Temprano y tiene un espesor máximo de 900 m, el cual se adelgaza hacia el oriente y poniente (Fries, 1960).

– Formación Cuautla (Kc)

Compuesta por calcarenitas de estratificación gruesa con abundantes biostromas de rudistas, la Formación Cuautla se comprende por depósitos de facies de cuenca de banco y de litoral, los cuales predominan en la región del Valle de México y afloran al sur de la Sierra Tepoztlán y al norte de Zumpango. De edad Cenomaniano Tardío-Turoniano Tardío, con espesores que varían de 700 a 250 m (Fries, 1960). Su contacto con la Formación Mexcala suprayacente es de tipo concordante y en algunos lugares se encuentra cubierta

discordantemente por rocas del Grupo Balsas y por rocas volcánicas del Terciario y Cuaternario. (Vázquez y Jaimes, 1989)

– Formación Mexcala (Kmx)

La Formación Mexcala aflora al sur de la Sierra Chichinautzin y en el cerro La Palma. Constituye una interestratificación rítmica de grauvacas (turbiditas), limolitas y lutitas (Fries, 1960). Estos estratos fueron depositados en facies de aguas someras durante el Coniaciano-Campaniano y representa una secuencia *Flysch* que se originó como posible consecuencia del levantamiento y erosión del arco magmático del cretácico. Su espesor máximo es de 1500 m (Fries, 1960).

Terciario

– Grupo Balsas (Teob)

Los depósitos continentales del Grupo Balsas afloran al sur del Valle de México y al norte en la localidad de Apaxco, Hgo. (Vázquez y Jaimes, 1989). Consta de un conglomerado oligomictico calizo generalmente compacto con matriz limo arcillosa cementada por calcita y oxido de fierro, de estratificación masiva y espesor máximo de 500 m, se encuentra interdigitado por capas deleznales de arcilla, limo, arena, yeso y caliza lacustre, así como capas de basalto y derrames de riolita (Fries, 1960).

Fries (1960) menciona que este grupo se posa en forma discordante sobre formaciones del Cretácico. A los depósitos del Grupo Balsas se les ha asignado una edad del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano (Fries, 1960).

– Rocas Volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Tomv)

Vázquez y Jaimes (1989) las clasifican como una secuencia volcánica con una composición variable de andesítica a riodacítica, en algunas localidades también se encuentran rocas de tipo basáltico. Constituyen secuencias de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados. Las secuencias se encuentran interestratificadas y/o cubiertas en su parte superior por derrames lávicos. Los flujos lávicos son de grano fino a medio y algunos de ellos tienen buena estructura fluidal y xenolitos serpentinizados. Las rocas de esta formación afloran en la Sierra de Xochitepec y en los cerros Picacho y Pupilo del Diablo y tienen espesores variables entre los 350 y los 1750 m. Se encuentran cubiertas por rocas del Mioceno Medio y Tardío y en algunas localidades por formaciones del Pliocuaternario (Vázquez y Jaimes, 1989).

– Rocas Volcánicas del Mioceno Medio-Tardío (Tmv)

Las rocas están constituidas por secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas, estas se han identificado como andesitas de lamprobolita o augita, andesitas de hiperstena, dacitas de textura porfírica-afanítica, tobas cristalinas andesíticas de textura clástica.

Difieren en posición y algunas en composición litológica con respecto a las Rocas Volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. (Vázquez y Jaimes, 1989). Estas unidades se encuentran sobreyacidas discordantemente por unidades Pliocénicas y algunas unidades de edad Cuaternaria. Sus afloramientos se distribuyen por toda la cuenca, en el área de estudio afloran en el Peñón de los Baños, La Sierra de Guadalupe y otros

afloramientos al norte de Texcoco (Vázquez y Jaimes, 1989). En el pozo profundo Texcoco-1 se cortó a esta formación entre 814 y 920 m.

– Depósitos Volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv)

Vázquez y Jaimes, 1989 definen a esta formación como una relación interdigitada con depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno cuya composición varía de andesítica a dacítica. Las secuencias están compuestas por tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas, tanto de flujo piroclástico como de “*surge*” piroclástico y se encuentran intercaladas por derrames lávicos y autobrechados con brechas de flujo. Estos depósitos tienen una edad de Plioceno Temprano (Vázquez y Jaimes, 1989).

Se pueden encontrar en afloramientos locales en algunos flancos de las Sierras Las Cruces, Zempoala, Guadalupe, Tepotzotlán y Río Frío. Los afloramientos tienen espesores del orden de los 650 m, en cuanto a su posición estratigráfica, los depósitos se encuentran sobreyaciendo con una discordancia erosional a las rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y se encuentran cubiertas por rocas volcánicas del Plioceno Tardío y Cuaternario. (Vázquez y Jaimes, 1989).

– Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc)

Vázquez y Jaimes (1989) asignaron este nombre a todos los depósitos no diferenciados relacionados genéticamente con la actividad piroclástica y fluvial de todo el plioceno. Están constituidos por brechas volcánicas, gravas, arenas y limos de carácter volcánico que fueron acumulados fluvialmente en fosas tectónicas y rellenando valles en rocas del Oligoceno-Mioceno y se encuentran interdigitados con rocas volcánicas (tobas de grano

fino, lapílicas, pumíticas) tierra diatomácea, arcillas, calizas lacustres, margas y travertino. En cuanto a sus dimensiones, su espesor máximo es de 750 m, el cual se encuentra en la porción central del valle y se adelgaza hacia las márgenes de la cuenca y las zonas de interdigitación, se tiene registro de afloramientos al poniente de Cuautla (Vázquez y Jaimes, 1989).

En el corte litológico del pozo profundo Texcoco-1 (SHCP, 1969), se encontró una unidad de calizas lacustres entre los 300 y los 500 m de profundidad. Esta unidad conforma el basamento hidrogeológico de los acuíferos que abastecen a la Ciudad de México. (Lojero-Ochoa, 2014). Se encuentran cubiertos discordantemente por los Depósitos Aluviales del Cuaternario (Vázquez y Jaimes, 1989).

– Formación Tarango (Tpt)

Está conformada por una intercalación de tobas, brechas volcánicas, depósitos de lahar y depósitos fluviales provenientes de la erosión de los complejos del Terciario Medio y Superior. Las tobas se encuentran ligeramente soldadas y actualmente se encuentran sepultadas cubriendo los pies de todas las elevaciones del Terciario Medio y Superior de la Sierra Nevada, Sierra de Guadalupe y la Sierra de las Cruces con una edad Plioceno-Pleistoceno (Mooser, 1961). Las series piroclásticas están formadas a partir fragmentos angulares grandes y pequeños de andesita y pómez, ligeramente cementados en una matriz de vidrio volcánico. Segerstrom, 1962 estima que los depósitos tienen un espesor promedio de entre 300 y 400 m.

Cuaternario

– Formación el Pino (Qpp)

Constituida por derrames lávicos con intercalaciones de ceniza, lapilli y escoria de caída de composición basáltica, andesítica y traquítica. (Vázquez y Jaimes, 1989).

Se asocia a las rocas provenientes de coladas lávicas en bloques de composición máfica, predominantemente andesita basáltica de olivino, con vesículas alineadas y textura fluidal que forman los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacan, Chiconautla, su máximo espesor es del orden de los 750 m. Esta formación cubre de manera discordante a las unidades volcánicas del Oligoceno, Mioceno y Plioceno y se le asigna una edad de entre 0.7 y 0.9 Ma con base en su magnetismo remanente inverso. (Vázquez y Jaimes, 1989).

– Formación Tláloc (Qt)

Compuesta de coladas lávicas que forman parte de la Sierra Rio Frío. Estos flujos son de composición andesítica, latítica y dacítica, tienen bandeamiento fluidal de composición mixta debido a una posible mezcla de magmas. Los depósitos también están compuestos por pómez, líticos, surges, flujos de cenizas cristalinas y vítreas. La Formación Tláloc cubre de manera discordante rocas del Mioceno Medio-Tardío y Plioceno, el pozo profundo PP-1 Texcoco (SHCP, 1969) no cortó esta unidad sino más bien se encontró el aluvión con intercalación de piroclastos, el cual es equivalente a la Formación Tláloc. Debido a esto Vázquez y Jaimes (1989) infieren una interdigitación entre ambos depósitos. El autor propone una edad Pleistocénica de entre 0.7 y 0.6 Ma y un espesor máximo en el centro de la Sierra de 1800 m el cual se acuña hacia los alrededores.

– Formación Chichinautzin (Qc)

Mooser (1961) asignó una edad de entre 42,800 y 8510 años a las lavas de tipo vesicular o masivas de composición andesítico-basáltica de grano fino y medio con fenocristales de olivino y piroxenos en una matriz vítrea y cristalina. Los espesores que se plantean varían entre los 3000 metros (Mooser, 1961) y 1800 m (Fries, 1960). La emisión de estos grandes volúmenes de lava interrumpió definitivamente el drenaje hacia el sur que tenía la Cuenca de México. Sus afloramientos principales constituyen la Sierra de Chichinautzin al sur de la Cuenca de México.

– Depósitos aluviales (Qal)

La obstrucción del drenaje en la Cuenca causó una acumulación de depósitos de tipo clástico fluvial relacionados con periodos glaciares y postglaciares del Pleistoceno-Holoceno. Estos depósitos están compuestos por material poco consolidado con fragmentos de tamaño grava, arena, limos y arcilla, los depósitos se encuentran interestratificados con tobos de grano fino y lapillicas, derrames lávicos de tipo basáltico y andesítico, conglomerados y brechas. En la parte superior se encuentra interdigitado con los Depósitos Lacustres del Cuaternario. Los Depósitos afloran formando llanuras aluviales en las orillas de la Cuenca. Vázquez y Jaimes (1989) proponen un tiempo de formación de Pleistoceno Tardío.

En los pozos Mixhuca-1, Texcoco-1, (Unda-López, 2016), Ramal Texcoco 1 y Ramal Texcoco 13 (CONAGUA, 2006b) fueron cortados a las profundidades de (167 – 500), (80 – 360), (44 - >200) y (48 – 328) metros respectivamente.

– Depósitos lacustres (Qla)

Estos depósitos formaron una gran altiplanicie en un ambiente lacustre que se extiende desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec.

Compuestos de arcillas bentónicas y montmorilloníticas, con carbonato de calcio, diatomeas, ostrácodos e interestratificaciones de ceniza y pómez. Se encuentran también interdigitados con la Formación Chichinautzin y con los Depósitos Aluviales. Tienen una edad de formación de Pleistoceno Tardío. Esta unidad está compuesta por clastos de tipo volcánico producto de las erupciones del volcán Popocatepetl y de la Sierra de Chichinautzin. De acuerdo con Vázquez y Jaimes (1989), estos depósitos tienen un espesor variable que va de 3 hasta 167 m, en la zona de Texcoco de acuerdo a los cortes litológicos del pozo profundo Texcoco 1, el espesor de esta capa es de alrededor de 80 m. y en el Pozo Mixhuca 1 se cortó su base a una profundidad de 167 m. (Unda-López, 2016).

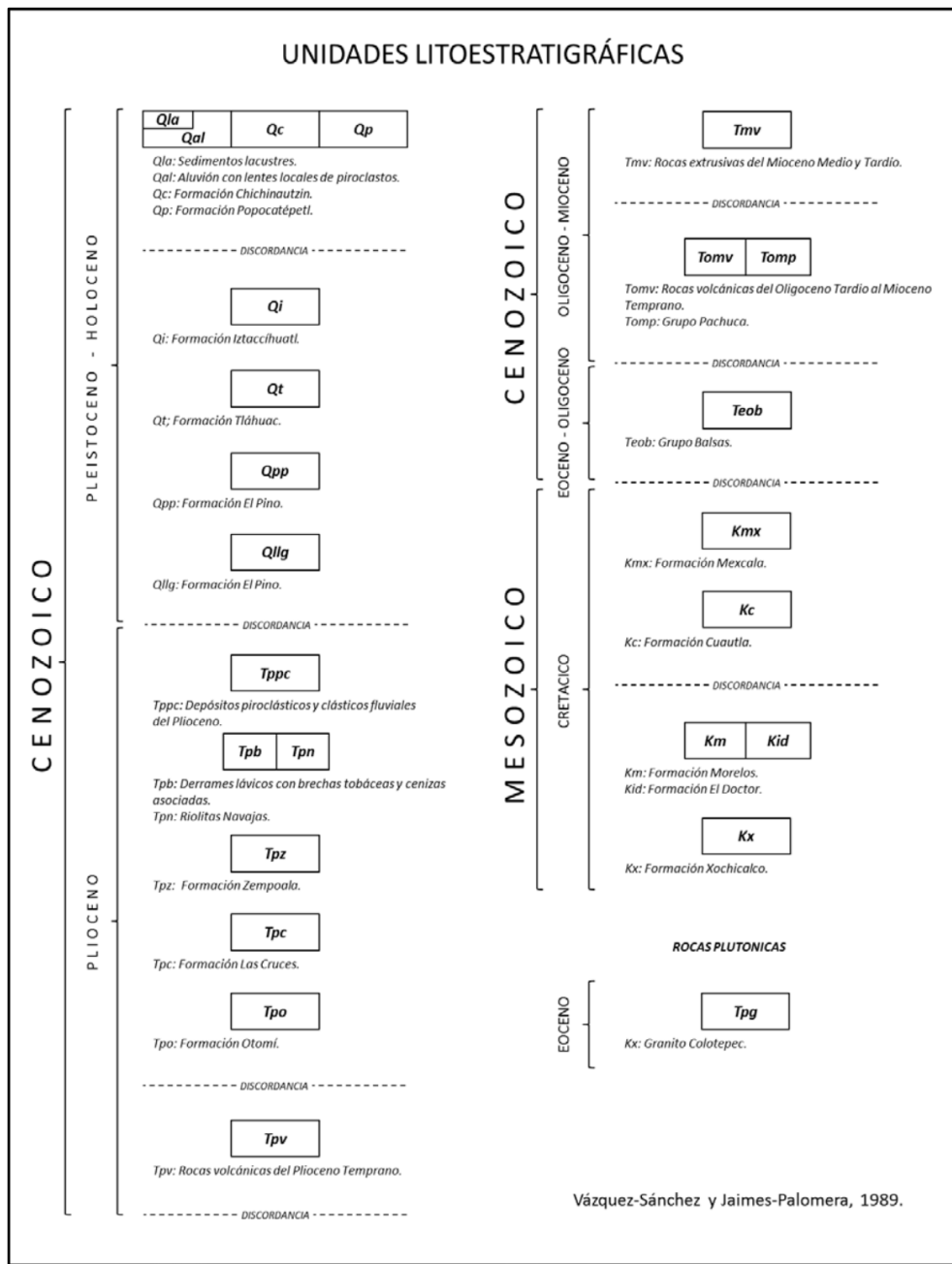


Figura 7 Unidades litoestratigráficas de la Cuenca del Valle de México. Tomado de (Vázquez y Jaimes, 1989)

De acuerdo con SHCP (1969) se realizaron perforaciones y sondeos geofísicos variables entre 60 y 2,065 m localizados en el centro del Lago con el fin de conocer la estratigrafía e investigar la hidrología subterránea del Ex-Lago de Texcoco

El pozo profundo Texcoco-1 fue perforado en su primera parte con una máquina de percusión posteriormente con una perforadora rotatoria. La profundidad planeada para el PT-1 se basó en la hipótesis de que el fondo basal del Valle se encontraba entre 1,000 y 1,200 m de profundidad (SHCP, 1969).

Conforme al programa de perforación, se tomaron muestras continuas de núcleo, de 8.9 cm de diámetro, desde los 180 a 800 m. De esa profundidad en adelante, se recuperaron muestras continuas de canal, cortándose núcleos de los estratos que se consideraron de interés.

La columna atravesada en el PT-1 (Figura 8) de acuerdo con SHCP, 1969 está constituida por: capas de arcillas, limos y arenas, de 0 a 180 m; de 180 a 505 m, arcillas, lutitas, arcillas arenosas, arenas, areniscas y calizas lacustres de 505 a 1,437 m, tobas y rocas ígneas, brechas y conglomerados; de 1,437 a 1,980 m, tobas líticas, rocas ígneas y arenas; de 1,980 a 2,045 m, anhidritas arcillosas y margas; de 2,045 a 2,065 m arcillas, margas y conglomerados calcáreos. Los materiales están saturados de agua y los registros eléctricos muestran acuíferos de gran espesor.

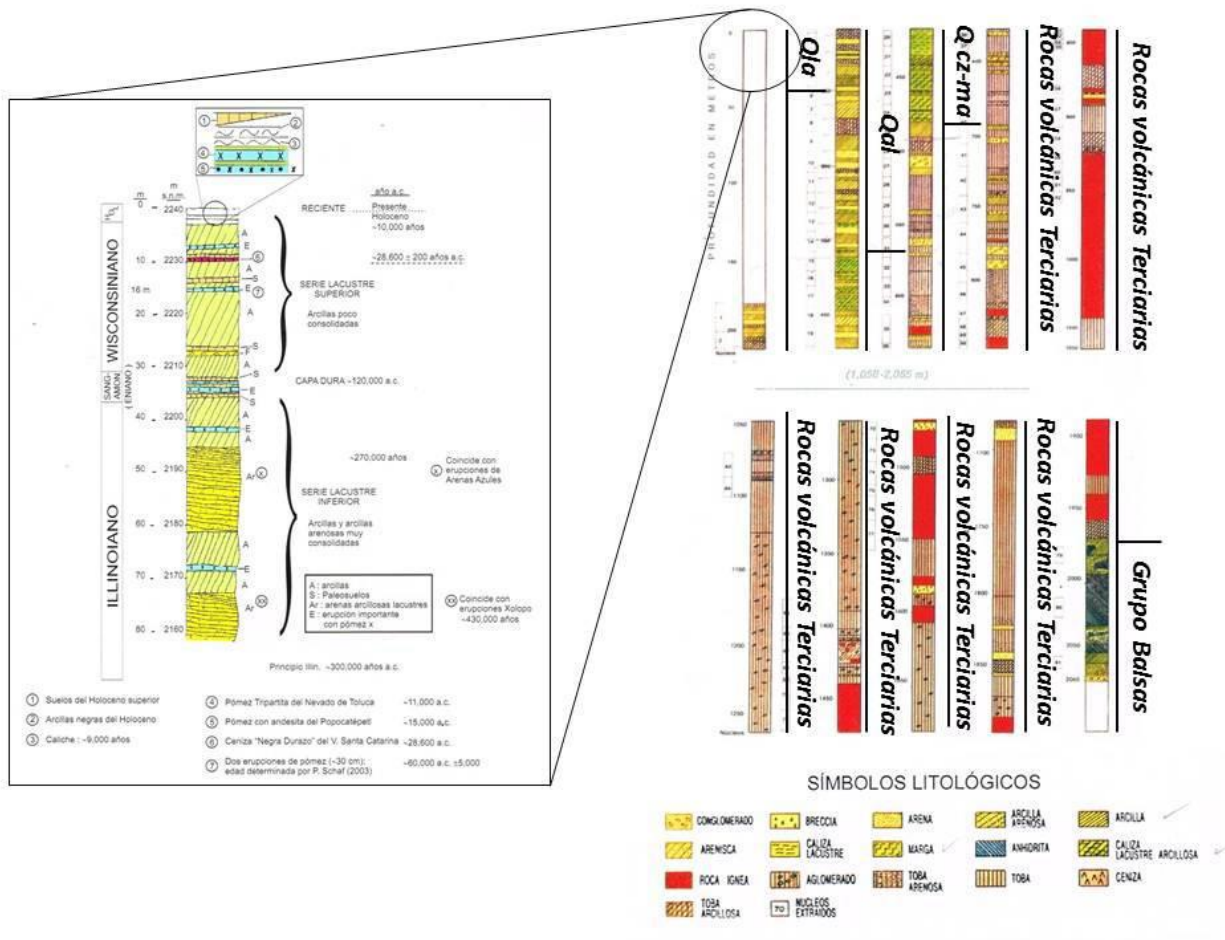


Figura 8 Columna estratigráfica obtenida del pozo profundo PP-1 Texcoco. Tomado de (Lojero-Ochoa, 2014)

5.2. Secciones Geológicas

Con base en la información publicada en estudios anteriores, mapas y secciones geológicas, cortes litológicos de pozos y perfiles de resistividad. Se elaboró un mapa geológico (Figura 9) y dos secciones geológicas (Figuras 10 y 11) donde se observan las unidades litoestratigráficas, los pozos y sondeos que se correlacionaron para elaborar dichas secciones. Estas se presentan a continuación:

Mapa Geológico

486585.473806

506585.473806

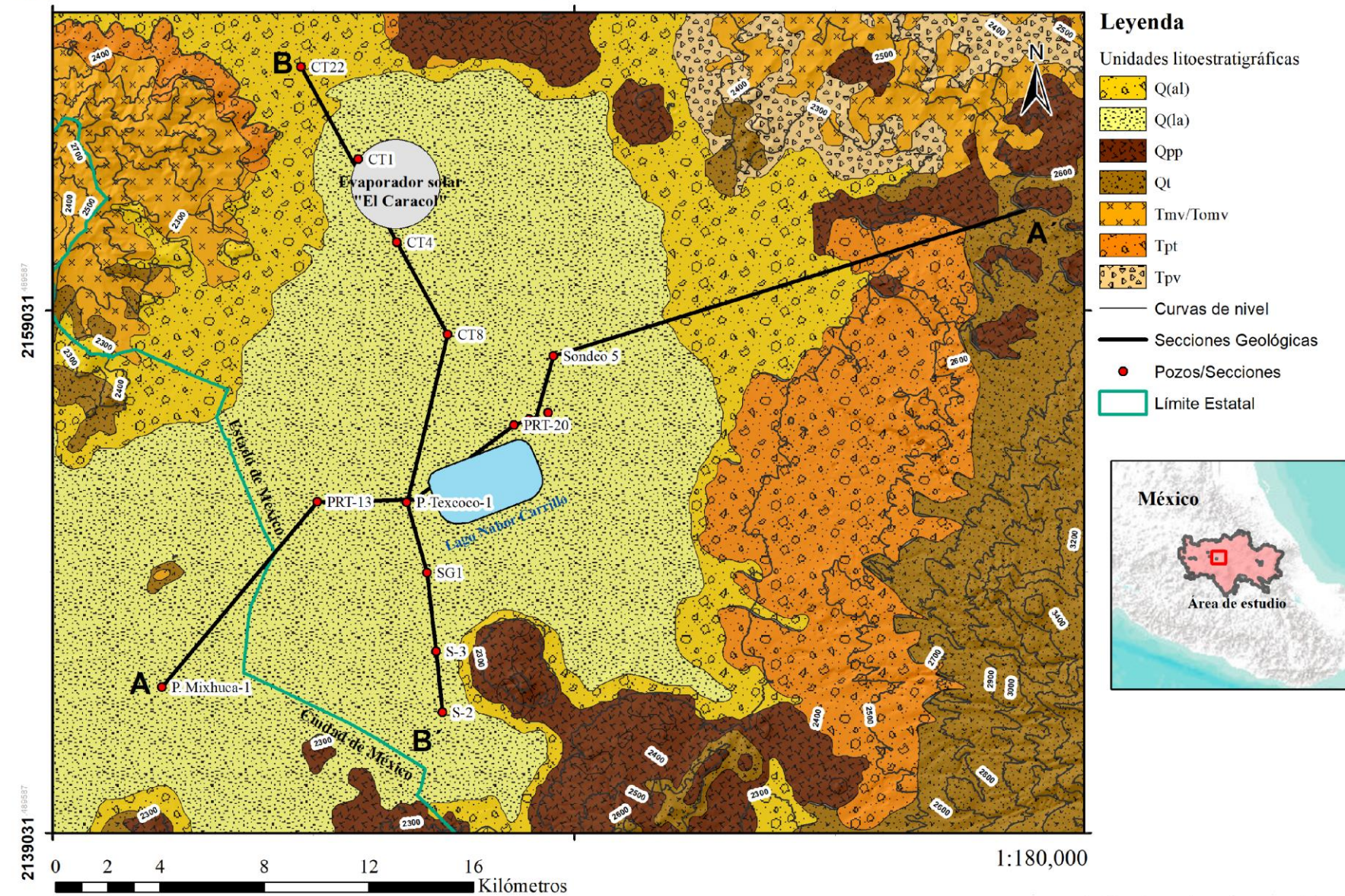


Figura 9 Pozo Mixhuca-1 tomado de (Unda-López, 2016), Pozo profundo Texcoco-1 Y Sondeo-5 tomado de (SHCP, 1969), Pozos Ramal Texcoco (PRT-13, PRT-15, PRT-16, PRT-17, PRT-18, PRT-20) tomados de (CONAGUA, 2006b), Sección geofísica 1 (CFE, 1996) y Secciones geológicas 2 y 3 (S-2 y S-3) tomadas de (Mendoza-Archundia, 2012).

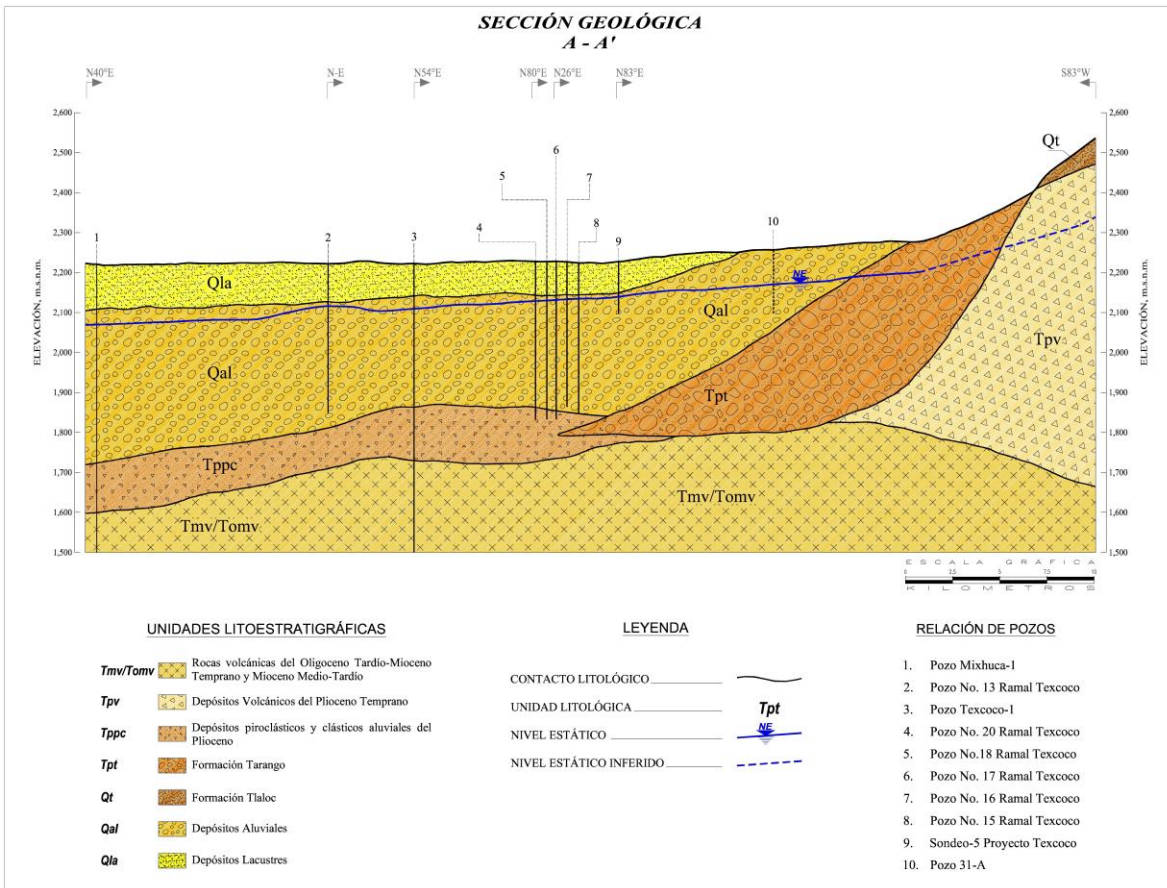


Figura 10 Sección Geológica A – A', Elaboración propia

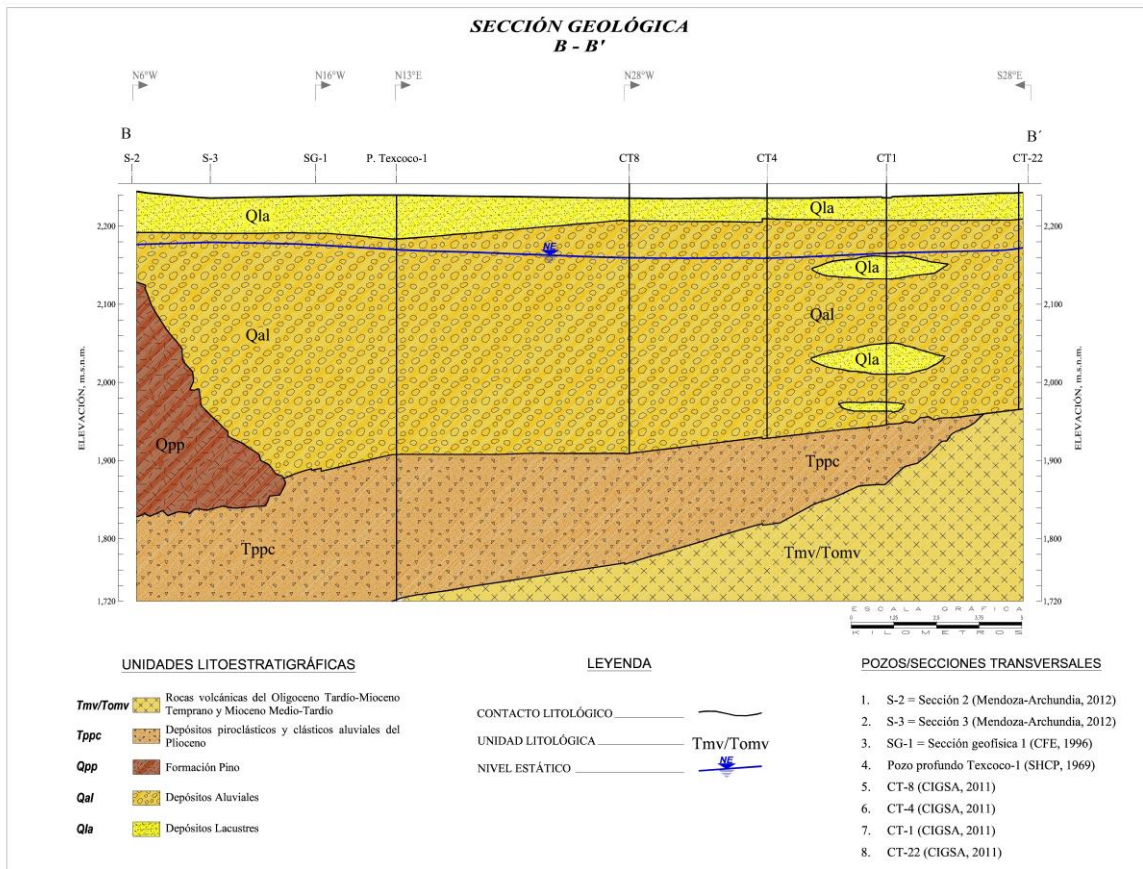


Figura 11 Sección Geológica B – B', Elaboración propia

6. MODELO GEOFÍSICO

Como complemento de esta investigación, se analizó información de estudios de geofísicos publicados en trabajos anteriores para la zona de estudio. Estos trabajos se mencionan en el capítulo 3 (CFE, 1996 y COPEI Ingeniería, 2105).

Con base en el análisis de la información, se pudieron definir 3 unidades geoelectricas. La primera se encuentra en el extremo superior de los depósitos localizados al interior de la cuenca y corresponde a formaciones arcillosas con bajos valores de resistividad eléctrica (<

1-5.50 Ohm/m). En las secciones geoeléctricas publicadas por Comisión Federal de Electricidad (1996). Se observaron cambios en la resistividad dentro de los estratos arcillosos, estos valores están asociados a cambios en la salinidad del agua ya que las resistividades más bajas están asociadas con agua de mayor salinidad, lo que indica mayor cantidad de Sólidos Totales Disueltos (SDT) y por lo tanto una menor calidad del agua.

La segunda unidad que se propone está asociada a un rango de resistividades más alto (11-81 Ohm/m) a profundidades de entre 80 y los 350 m que corresponde a los Depósitos Aluviales, los cuales se encuentran saturados con agua mayormente dulce. En algunas partes se observa una disminución en la resistividad eléctrica asociada a un contenido de agua con mayor salinidad, esto se debe a que las unidades forman parte de una formación geológica heterogénea (Tabla 2).

Finalmente, se observa una disminución en la resistividad (40-150 Ohm/m) la cual está asociada a una intercalación de calizas lacustres, margas y tobas reportada en exploraciones profundas, (SHCP, 1969). Esta intercalación comprende la tercera unidad geoeléctrica de la zona.

Las secciones geofísicas utilizadas como referencia para definir las unidades geofísicas en este estudio, se pueden observar en la Figura 12 donde se muestra su ubicación en planta y las unidades que las conforman.

Tabla 2. Se presentan 3 unidades geofísicas para la zona de estudio, las cuales fueron definidas con base en valores de resistividad eléctrica, tipo de litología y salinidad del agua (CFE, 1996: COPEI Ingeniería, 2015).

Unidad Geofísica	Sub-unidad geofísica	Correspondencia Litológica	Resistividad eléctrica (Ohm/m)	Salinidad del agua	Profundidad (m)
U1	U1A	Arenas y arcillas muy salitrosas	0.18-5.5	Agua salada a salobre	
	U1B	Arenas y arcillas salitrosas	5.5-14	Agua salada	
	U1C	Arenas y arcillas	14-50	Agua dulce	0 - 80
U2	U2A	Intercalación de arenas, limos y arcillas	11-32	Agua dulce a salobre	
	U2B		40-81	Agua dulce	80 - 350
U3		Intercalación de calizas lacustres y margas con tobas.	40-150	¿?	350 - 500

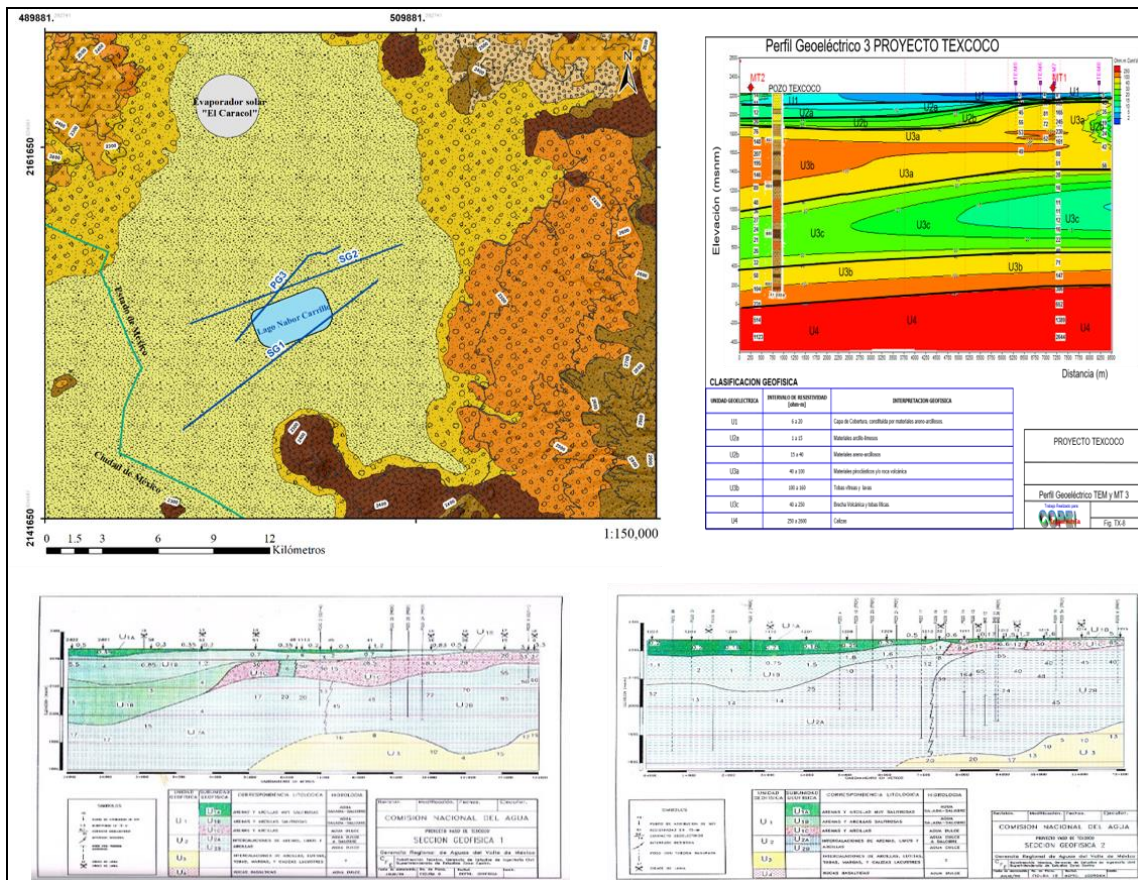


Figura 12 Se muestran en el mapa 3 secciones geofísicas con clave SG1: Sección geofísica 1 (CFE, 1996), SG2: Sección geofísica 2 (CFE, 1996) y PG3: Perfil geofísico 3 (COPEI Ingeniería, 2015).

7. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO

El modelo hidrogeológico que se presenta en este capítulo se desarrolló a partir de la integración de información obtenida de estudios geofísicos, censos de piezometría, estudios geológicos, hidrogeológicos y de calidad del agua mencionados en el capítulo 3.

El acuífero Texcoco pertenece al Organismo de Cuenca XIII “Aguas del Valle de México” y es jurisdicción territorial del Estado de México y se ubica dentro de la zona federal del Ex-Lago de Texcoco.

Se define al sistema acuífero de Texcoco en explotación, como un acuífero de tipo semiconfinado conformado por 6 unidades hidroestratigráficas, estas son:

- 1) Un acuitardo que actúa como capa confinante superior asociado a los Depósitos Lacustres de tipo arcilloso del Cuaternario (Qla).
- 2) Un acuífero semiconfinado compuesto por materiales granulares, lacustres y aluviales con algunas intercalaciones de materiales volcánicos
- 3) Un acuitardo inferior de muy baja permeabilidad compuesto por los Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno.
- 4) Coladas lávicas fracturadas que forman parte de la Sierra Rio Frio y Santa Catarina a través de las cuales se infiltra el agua que recarga al acuífero.
- 5) Depósitos acuíferos en rocas fracturadas de productividad media a baja con agua de mala calidad, los cuales se ha comprobado su existencia por medio de perforaciones profundas.
- 6) Tobas y lahares de la Formación Tarango ubicadas en el piedemonte de la Sierra Rio Frio que actualmente funcionan como la zona de recarga para el acuífero por medio de flujos subterráneos horizontales.

El flujo subterráneo, según las configuraciones del nivel estático para los años 2006 y 2018, es de tipo local con dirección radial-concéntrica hacia la zona central del Lago. Se

observa la presencia de algunos conos de abatimiento causados por el bombeo excesivo en el acuífero.

Originalmente el acuífero de Texcoco se encontraba sometido a una condición de confinamiento total (CONAGUA, 2005) y la recarga principal para el acuífero provenía de la infiltración del agua de lluvia a través de las formaciones geológicas que afloran en la zona de estudio donde también un porcentaje de este volumen de agua se infiltraba en las elevaciones topográficamente más altas y recargaba al acuífero posteriormente en forma de flujos subterráneos. La descarga ocurría en forma de manantiales en las faldas de los cerros y pozos brotantes.

En la actualidad, los sistemas de flujo siguen siendo de tipo local, teniendo recarga de agua en las partes más altas generando flujos que descargan en la región centro occidental del acuífero. Sin embargo, el comportamiento hidrogeológico del acuífero aluvial ha cambiado al de un acuífero de tipo semiconfinado (Lojero-Ochoa, 2014) el cual va perdiendo carga hidráulica debido a la excesiva explotación por medio de pozos de bombeo.

Debido a que la recarga proviene de la infiltración de agua de lluvia por medio de rocas fracturadas en las elevaciones más altas, el agua que fluye a través de los medios geológicos disuelve sales y minerales a su paso, lo cual ha generado altas concentraciones de iones disueltos en las aguas. Se observa que las menores concentraciones de salinidad se presentan en las zonas de recarga incrementándose hacia la zona de descarga que representaba el Lago anteriormente.

En acuíferos semiconfinados, cuando las capas que confinan a un acuífero no son perfectamente impermeables, permiten filtraciones que contribuyen en cierta proporción al caudal que extraemos del acuífero semiconfinado. En el caso del acuífero de Texcoco, debido a que el acuitardo arcilloso que actúa como capa semiconfinante cuenta con una muy baja conductividad hidráulica y a que la mayoría de los pozos de extracción se encuentran ubicados fuera de la zona que se encuentra cubierta por el acuitardo arcilloso de los cuales depende el caudal de bombeo que propicia el proceso de “goteo”. Se considera una aportación al acuífero proveniente del acuitardo relativamente baja.

De acuerdo con CONAGUA (2005). Se ha comprobado que las aguas albergadas en estratos con profundidades hasta los 80 m (dependiendo de la zona), son del tipo fósil con una altísima salinidad, mientras que las localizadas a mayor profundidad son frescas. Esto indicaría que las aguas contenidas en las formaciones arcillosas superiores son contemporáneas a su depósito y que el acuífero aluvial está sujeto a procesos de recarga por agua meteórica.

A continuación, se presenta una descripción detallada de todos los elementos que conforman al sistema acuífero en explotación para la zona del Ex-Lago de Texcoco, así como una sección y un mapa hidrogeológicos (Figuras 18 Y 19).

7.1. Dominio y geometría del sistema

Evidencias geológicas, estructurales, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo semiconfinado, heterogéneo y anisótropo, constituido por

sedimentos aluviales y fluviales de origen volcánico con granulometría variada que conforman los cauces de los arroyos y los valles.

Se consideró el polígono generado para el acuífero administrativo 1507 (Figura, 13), el cual sensiblemente concuerda con los parteaguas topográficos e hidrodinámicos que delimitan al acuífero. Este polígono tiene un área de 933.57 km².

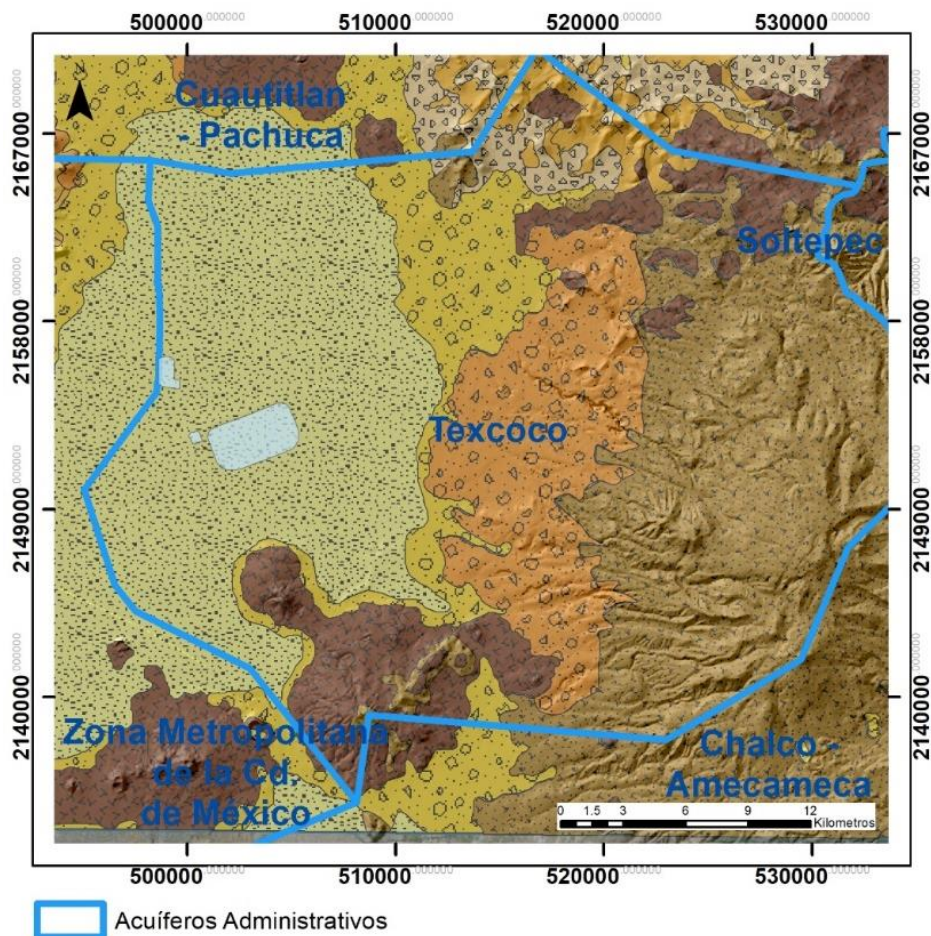


Figura 13 Polígono para el acuífero administrativo 1507 y acuíferos colindantes.

La condición de semiconfinamiento del acuífero se debe a la presencia de un acuitardo arcilloso con espesor superior a los 60 m en la parte central del Ex-Lago de Texcoco. El acuitardo se adelgaza hacia los márgenes de este, donde se encuentran las sierras que limitan al acuífero (CONAGUA, 2002).

Para fines de este trabajo, solo se considerará al acuífero granular de la zona a pesar de que otras formaciones geológicas de la zona se encuentran actualmente saturadas. Esto se debe a que el acuífero granular es el que se encuentra en explotación hoy en día. Se encuentra definido administrativamente como acuífero 1507 en la disponibilidad de aguas subterráneas publicada anualmente por la Comisión Nacional del Agua.

7.2. Condiciones de frontera

Para definir el comportamiento tridimensional del flujo de agua en los límites del dominio es necesario establecer las condiciones de frontera del sistema. Estas son todos los procesos físicos del ciclo hídrico que influyen en el flujo de agua subterránea para un sistema hidrogeológico.

En este caso, la frontera superior está conformada por el nivel freático dentro de los límites del acuífero. Por otra parte, la frontera inferior corresponde al basamento hidrogeológico, el cual está conformado por los Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc) (Figura 14), esta formación cuenta con una geometría horizontal que se acuña hacia los márgenes de la cuenca y cuenta con un espesor promedio de 150 m. (Figuras 10 y 11).

Las fronteras laterales están distribuidas de manera que las fronteras Norte, Sur y Oeste se definen gracias a la presencia de parteaguas subterráneos y superficiales a través de los cuales existen flujos horizontales que alimentan al acuífero; la frontera oriental corresponde a la zona de recarga del acuífero con agua proveniente de los escurrimientos que se infiltran a través de la Sierra Rio Frio.

A continuación, se presenta una sección (Figura 14) donde se observan 4 fronteras hidrogeológicas en sección. La primera frontera corresponde a la zona de recarga del acuífero por medio de flujo subterráneo horizontal en la parte oriental de la cuenca, la segunda frontera corresponde al basamento hidrogeológico del acuífero, el cual está comprendido por los Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc). La tercera frontera (frontera occidental), se asocia al parteaguas subterráneo que se observa en la porción oeste del acuífero. Finalmente, la frontera superior del acuífero la delimita la superficie del nivel freático. Las claves para cada frontera se muestran en la Tabla 3.

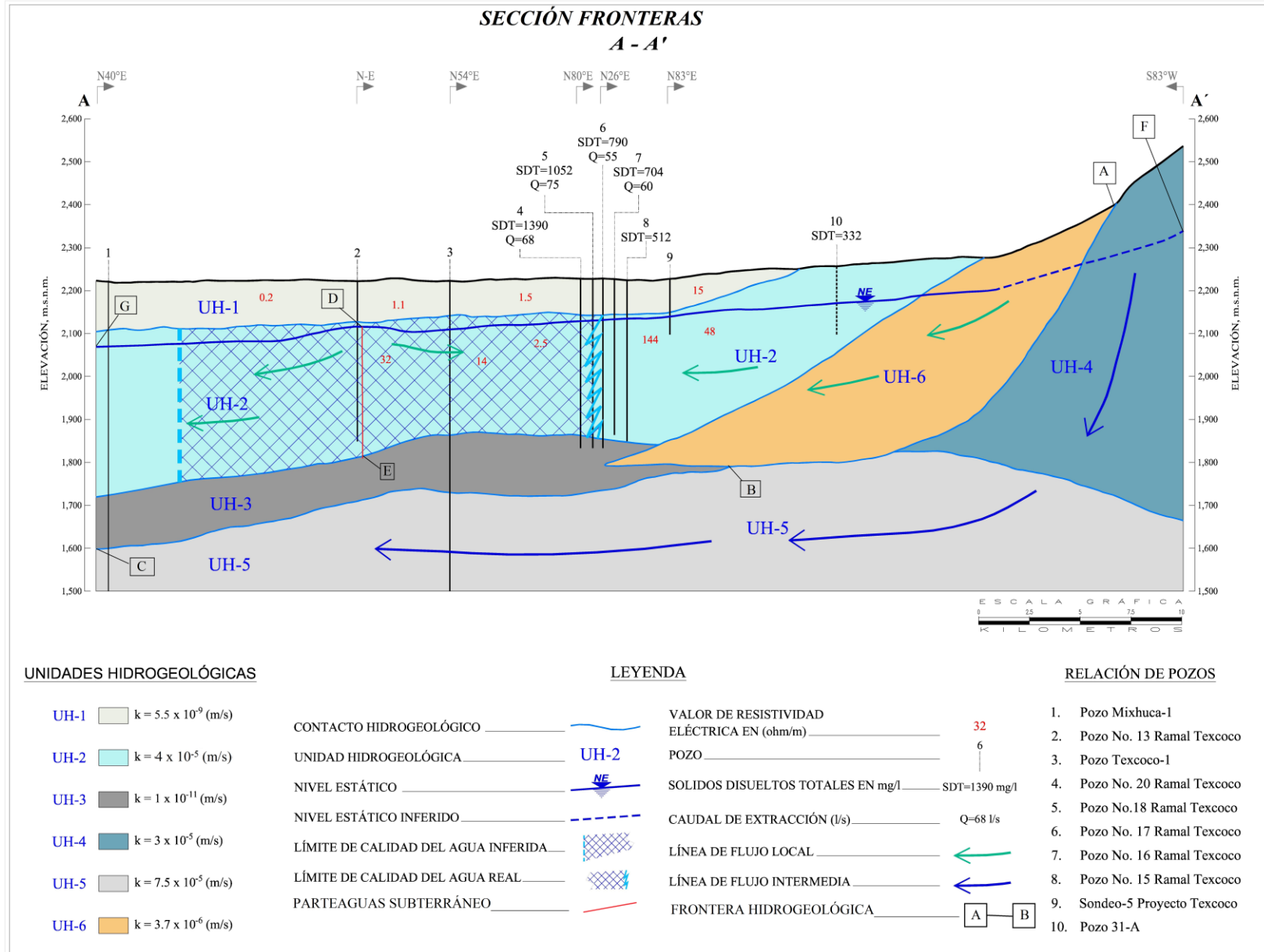


Figura 14 Sección Hidrogeológica A – A' donde se muestran las fronteras del modelo, las fronteras corresponden a la superficie entre dos puntos especificados dentro de la imagen, siguiendo el rasgo sobre el que se encuentran los dos.

Tabla 3 Fronteras hidrogeológicas

Límite	Frontera hidrogeológica
A-B	Entrada de agua por flujo subterráneo horizontal
B-C	Basamento hidrogeológico
D-E	Parteaguas subterráneo
G-H	Elevación del nivel estático

7.3. Parámetros hidráulicos

Como se mencionó anteriormente, el acuífero de Texcoco está limitado en su porción superior por un estrato de arcillas lacustres en el centro del valle que se adelgaza hacia los márgenes, seguido de una secuencia de materiales granulares aluviales, rocas y depósitos volcánicos (tobas, brechas, andesitas y cenizas), con intercalaciones de sedimentos arcillosos, que en conjunto presentan permeabilidad media, permitiendo la infiltración, circulación y almacenamiento de agua subterránea. Finalmente se tiene un estrato compuesto por depósitos piroclásticos, calizas lacustres y margas de baja permeabilidad cortadas a una profundidad de 300 en el pozo profundo Texcoco-1 que funcionan como basamento hidrogeológico. La porción que subyace al estrato arcilloso inferior está alojada en rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

La Comisión Nacional del Agua es el organismo que se ha encargado de la realización de la mayoría de las pruebas de bombeo dentro del área de estudio y del Valle de México. Los estudios consultados en esta investigación en materia de pruebas de bombeo fueron:

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012) Pruebas de recarga instantánea y a corto plazo (activa y pasiva), Proyecto piloto de recarga Artificial El Caracol. Ciudad de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2006a). Estudio de modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca. Ciudad de México.

Se asignaron parámetros hidráulicos con base en la información obtenida de pruebas de bombeo, pero debido a que no se ha realizado una amplia campaña científica de pruebas de bombeo que cubra todas las unidades presentes dentro de la zona del Ex-Lago de Texcoco, se consideraron parámetros para algunas unidades basados en la literatura disponible sobre las propiedades hidráulicas para distintos tipos de materiales.

La literatura consultada consta de los siguientes estudios: (Domenico y Schwartz, 1990), (Morris y Johnson, 1967), (Domenico, 1972) y (Rudolph *et al.*, 1991).

Los parámetros hidráulicos asignados para cada unidad hidrogeológica, así como su procedencia, se despliegan más adelante dentro de la descripción de las unidades hidrogeológicas en el apartado 7.6.

7.4. Calidad del agua subterránea.

Debido a la interacción del agua que recarga al acuífero con las formaciones geológicas albergadas en el subsuelo del Ex-Lago de Texcoco, en algunas zonas, el agua subterránea rebasa los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994), SDT = 1000 mg/l).

La calidad del agua en el acuitardo confinante y el acuífero en explotación ha sido identificada de manera indirecta por medio de estudios geofísicos y de manera directa por medio de muestreos de pozos. En general, el agua subterránea contenida en el acuitardo lacustre se considera de muy mala calidad, al compararla con la norma referida.

La información recopilada en el estudio hidrogeoquímico, realizado por (Ariel constructores, S.A., 2007) muestra concentraciones de cloruros, bicarbonatos y sólidos totales disueltos en el agua subterránea rebasan los límites máximos permisibles, que establece la norma anteriormente mencionada.

Los sistemas de flujo de la cuenca generan flujos desde las zonas de recarga con mayores elevaciones hacia la región centro occidental del acuífero donde se encuentra la altiplanicie. Se observa que las menores concentraciones de salinidad se presentan en las zonas de recarga incrementándose hacia la zona de descarga que representaba el Lago anteriormente.

Debido a que las formaciones geológicas que funcionan como acuitardo y acuífero superior son heterogéneas, existen diferentes familias de agua dentro de estas, predominando entre ellas la clorurada-sódica, bicarbonatada-sódica, clorurada-mixta, y bicarbonatada-magnésica, entre otras (Rudolph et al., 1991).

Analizando la información publicada en el estudio de calidad del agua realizado por SEMARNAT (2018) se confirmó que las zonas al oriente y norte del ex Lago de Texcoco son las que tienen la menor salinidad.

En este estudio se presenta un mapa (Figura 15) donde se ilustran límites para la calidad del agua subterránea tomando en cuenta el contenido de Sólidos Disueltos Totales (SDT) medidos en pozos aledaños, se determinó que las zonas al oriente y al norte del Ex-Lago de Texcoco son las más adecuadas para la extracción de agua ya que cuentan con menor salinidad.

Aunado a esto, se analizó la información hidrogeoquímica de pozos presentada en el estudio realizado por Ariel constructores, S.A. (2007) para corroborar los límites de calidad del agua dentro del acuífero.

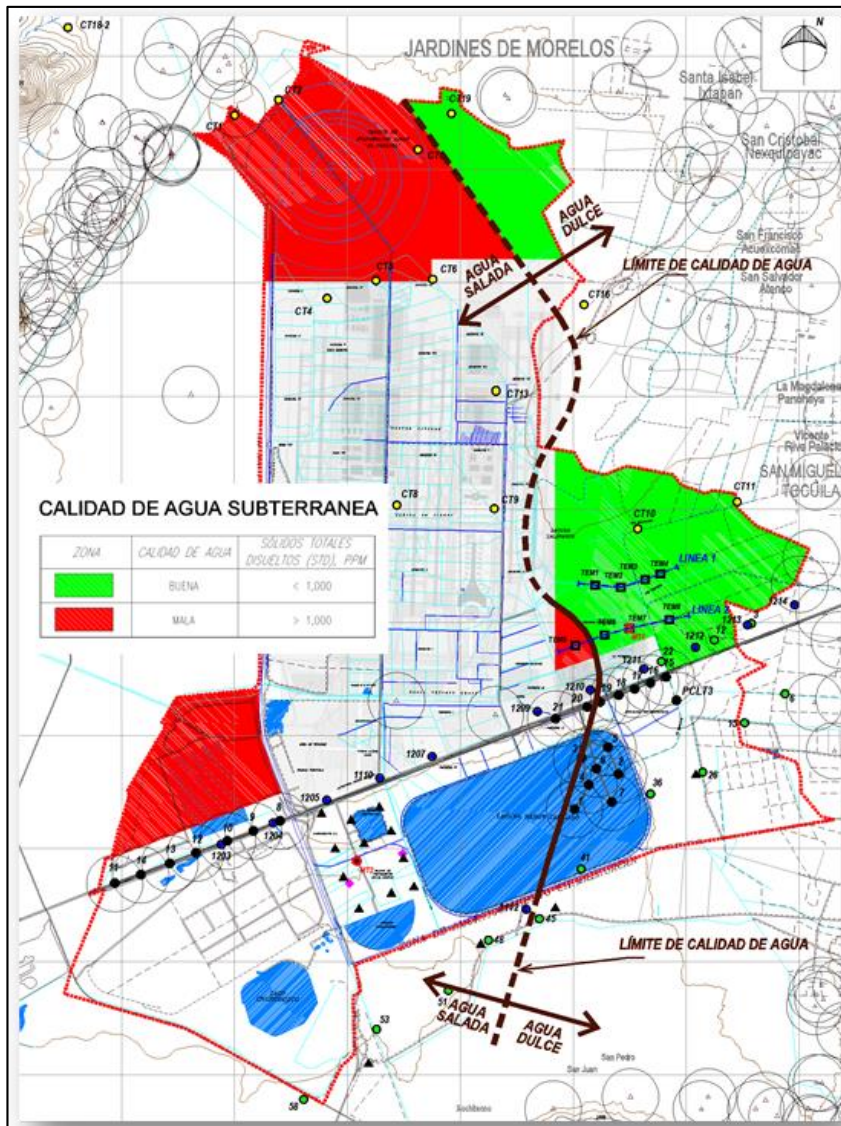


Figura 15 Límite de calidad del agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para sólidos disueltos totales. Tomado de (SEMARNAT, 2018)

7.5. Definición de los sistemas jerárquicos de flujo del agua subterránea

De acuerdo con Toth (1963), los distintos sistemas de flujo que pueden presentarse en una cuenca son los siguientes:

- Sistemas de flujo local: presentan áreas de recarga en puntos altos topográficos y el área de descarga en puntos bajos topográficos adyacentes, es decir uno al lado del otro (en su mayoría menores a 5 km de distancia).
- Sistemas de flujo intermedio: las zonas de recarga y descarga no son contiguas, ni tampoco se presentan en las elevaciones más altas o bajas de una cuenca, pero sí existe una separación entre ellas de uno o más altos y bajos topográficos.
- Sistemas de flujo regional: la zona de recarga se presenta en la división subterránea y la zona de descarga se ubica en la parte más baja de la cuenca. Estos sistemas tienen las líneas de flujo más profundas y de mayor longitud (por lo general superiores a los 50 km), con sistemas intermedios que operan en medio.

Anderson et al. (2015), definen que el indicador más directo para determinar los tipos de sistemas de flujo del agua subterránea son las mediciones piezométricas. A continuación, se presenta información relacionada con estas mediciones la cual fue utilizada para determinar los sistemas de flujo para el acuífero de Texcoco.

Las elevaciones topográficas que constituyen la zona de recarga del acuífero generan una dirección de flujo subterráneo desde las zonas norte, este y oeste de la cuenca hacia la región centro occidental del acuífero, en donde se ubica el Ex-Lago. (DOF, 2019), esto se puede observar en las Figuras 16 y 17.

7.5.1. Elevación del nivel estático

La base de datos publicada por OCAVM y SACMEX, 2018 y los datos del estudio realizado por CONAGUA 2006a fueron utilizados para comprender la situación de los sistemas de flujo y elaborar un mapa de elevación del nivel estático para el año 2006 (Figura 16).

Analizando información de años anteriores e información actual, se comprobó que la red de flujo tiene una configuración de tipo radial concéntrico en dirección a la zona centro occidental del Ex Lago de Texcoco.

Para el año 2006, la elevación del nivel estático medida era de 2310 ms.n.m. en sus partes más altas, mientras que las zonas bajas disminuyen hasta los 2182 ms.n.m. (CONAGUA, 2006a). Para el año 2018, los valores registrados de elevación del nivel estático varían de 2323 ms.n.m. en las zonas de recarga de la Sierra Nevada a valores de 2160 ms.n.m. en el centro de la planicie, disminuyendo por efecto de la topografía y el bombeo.

Se observa la presencia de conos de abatimiento en la región central y sur-occidental y central de la planicie de Texcoco, los cuales se atribuyen al bombeo excesivo de agua subterránea de la zona (Figuras 16 y 17)

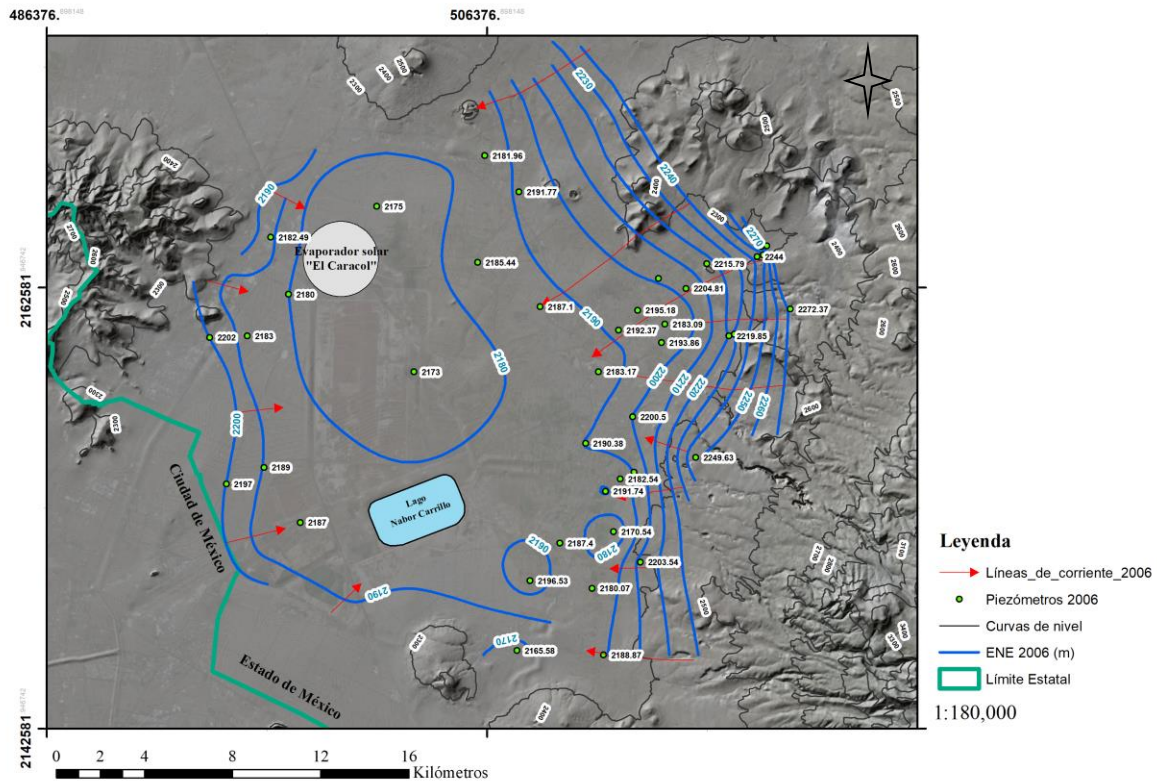


Figura 16 Elevación del nivel estático en metros para el año 2006, calculado a partir de la información publicada por OCAVM y SACMEX, 2018 para el año 2006. Elaboración propia.

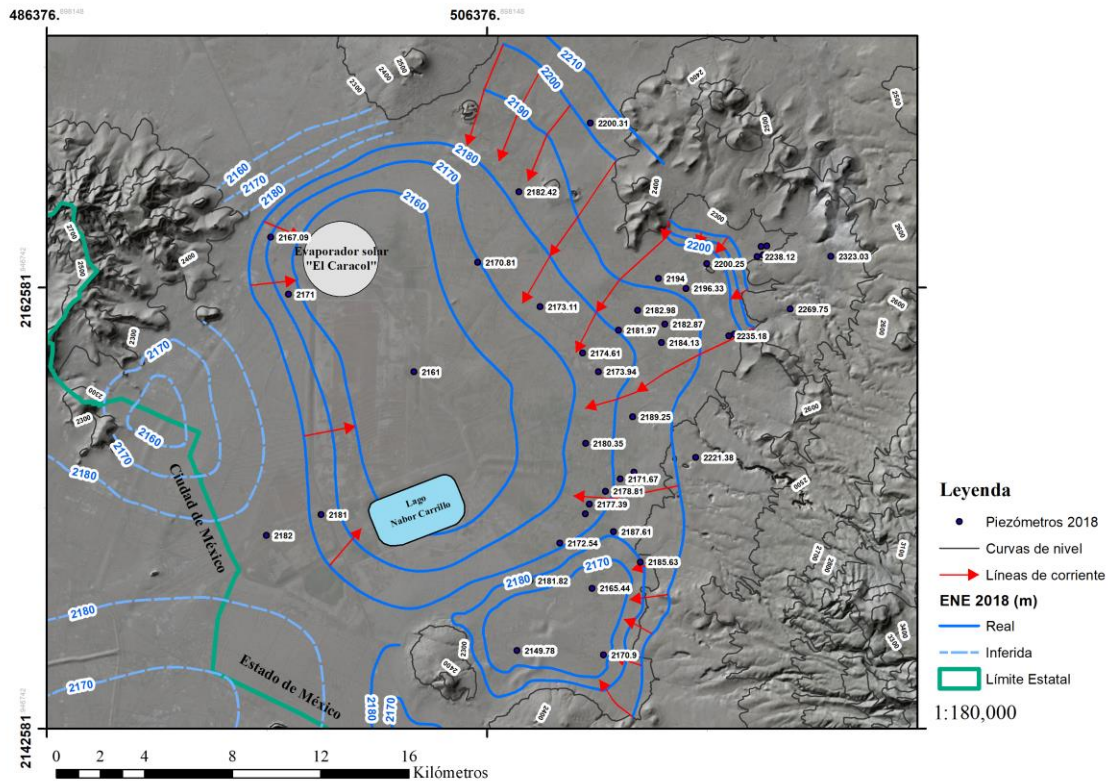


Figura 17 Elevación del nivel estático en metros para el año 2018, calculado a partir de la información publicada por OCAVM y SACMEX, 2018 para el año 2018. Las líneas punteadas fueron calculadas infiriendo una evolución del nivel estático de -1 m/año partiendo de los niveles publicados para el año 2005. Elaboración propia.

7.6. Unidades Hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas (Tabla 4) presentadas a continuación son propuestas con base en la síntesis de la información geológica, geofísica, hidrogeológica y piezométrica que ha sido descrita a lo largo de este estudio.

- Unidad hidrogeológica 1 (UH-1):

Está constituida por un paquete de 0 a 80 m de espesor de arcillas muy deformables intercaladas con lentes y estratos arenosos y limo arenosos de vidrio volcánico delgados de

1 a 3 m de espesor. Esta unidad se encuentra sobresaturada con agua con concentraciones salinas de 5.000 a 10.000 ppm de STD, lo que provoca que la unidad presente resistividades muy bajas de 1 a 10 Ohm/m. Hidrogeológicamente se comporta como un acuitardo confinante de muy baja permeabilidad. Rudolph et al. (1991) asignan un valor al acuitardo de $K = 5.5 \times 10^{-9}$ m/s. Esta unidad tiene un rendimiento específico de 0.03, tomado del estudio de CONAGUA (2006a) y un almacenamiento específico de 1.13×10^{-2} de acuerdo al valor medio establecido por Domenico (1972), para arcillas plásticas.

– Unidad hidrogeológica 2 (UH-2):

A partir de los 80 m y hasta los 300 m profundidad se encuentra un paquete areno-gravoso intercalado ocasionalmente con lentes arcillosos, derrames volcánicos y capas de cenizas. Esta unidad se encuentra totalmente saturada y corresponde al acuífero principal en explotación de la zona. El acuífero se caracteriza por presentar agua de mediana calidad, variando de los 600 a 2.000 ppm de STD dependiendo de dónde se extraiga agua, dando como resultado resistividades eléctricas que varían de 30 a 70 Ohm/m. Con base en las pruebas de bombeo realizadas en el estudio de CONAGUA (2012), se decidió proponer un valor para esta unidad de 4×10^{-5} m/s. Los valores de rendimiento específico y almacenamiento específico fueron asociados a los valores calculados por CONAGUA, (2006a) (rendimiento específico) $S_y = 0.15$ y Domenico, (1972) (almacenamiento específico) $S_s = 7.4 \times 10^{-5}$ correspondiente al valor medio para grava arenosa densa.

– Unidad hidrogeológica 3 (UH-3):

A los 300 m de profundidad, se encuentra un paquete compuesto por depósitos piroclásticos, calizas lacustres y margas de unos 150 m de espesor, compacta y de baja a nula permeabilidad. Corresponden con el basamento hidrogeológico del acuífero principal y han sido detectadas en las exploraciones profundas realizadas por SHCP (1969). Se caracterizan por tener resistividades eléctricas >38 Ohm/m. Su conductividad hidráulica $K = 1 \times 10^{-11}$ (m/s) fue calculada con base en la información publicada por Domenico y Schwartz (1990). Su rendimiento específico se asoció al valor medio para calizas (0.14) publicado por Morris y Johnson (1967) y su almacenamiento se asignó un valor de 1×10^{-7} asociado a los valores para rocas sólidas publicado por Domenico (1972). Se desconocen los niveles de calidad del agua para esta unidad.

– Unidad hidrogeológica 4 (UH-4)

Las Coladas lávicas que forman parte de la Sierra Rio Frio y Santa Catarina cuentan con un espesor máximo en el centro de la Sierra Rio Frio de 1800 m el cual se acuña hacia los alrededores. Estas constituyen una unidad acuífera de alta productividad en rocas volcánicas localizadas en zonas de mayor elevación correspondientes a la zona de recarga.

La unidad acuífera cuenta con una conductividad hidráulica por fracturamiento de alrededor de 3×10^{-5} (m/s) y rendimiento específico $S_y = 0.04$, valores que fueron tomados del estudio de CONAGUA (2006a). Para el almacenamiento específico se consideró un valor medio de 3.6×10^{-5} establecido por Domenico (1972) para rocas fracturadas.

– Unidad hidrogeológica 5 (UH-5)

Los depósitos acuíferos en rocas fracturadas de productividad media a baja se encuentran alojados en secuencias de rocas volcánicas (tobas y brechas) interestratificadas con lavas de tipo andesítico. Tienen un espesor mayor a los 1500 m y cuentan valores de conductividad hidráulica de 7.5×10^{-5} (m/s) (CONAGUA 2006a) y debido a la falta de datos de campo, consideró un rendimiento específico para tobas de 0.2 propuesto por Morris et al. (1967) y un almacenamiento específico medio para rocas fracturadas de 3.6×10^{-5} (Domenico, 1972).

– Unidad Hidrogeológica 6 (UH-6)

Constituida por depósitos piroclásticos (tobas y lahares) que fueron originados por procesos gravitacionales y eruptivos los cuales se encuentran interdigitados con cenizas y lavas del Cuaternario. Esta unidad aflora en los pies de todas las elevaciones del Terciario Medio y Superior de la Sierra Nevada, Sierra de Guadalupe y la Sierra de las Cruces. Cuenta con un espesor promedio de 350 metros. Cuenta con valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico calculados en campo de 3.7×10^{-6} (m/s) (Goevaluaciones y Perforaciones S.A. de C.V., 2012) y 0.2 (CONAGUA 2006a) respectivamente. Para el valor del almacenamiento específico, se consideró lo establecido por Domenico (1972) asociado al valor medio dentro del campo de rocas fracturadas el cual es 3.6×10^{-5} .

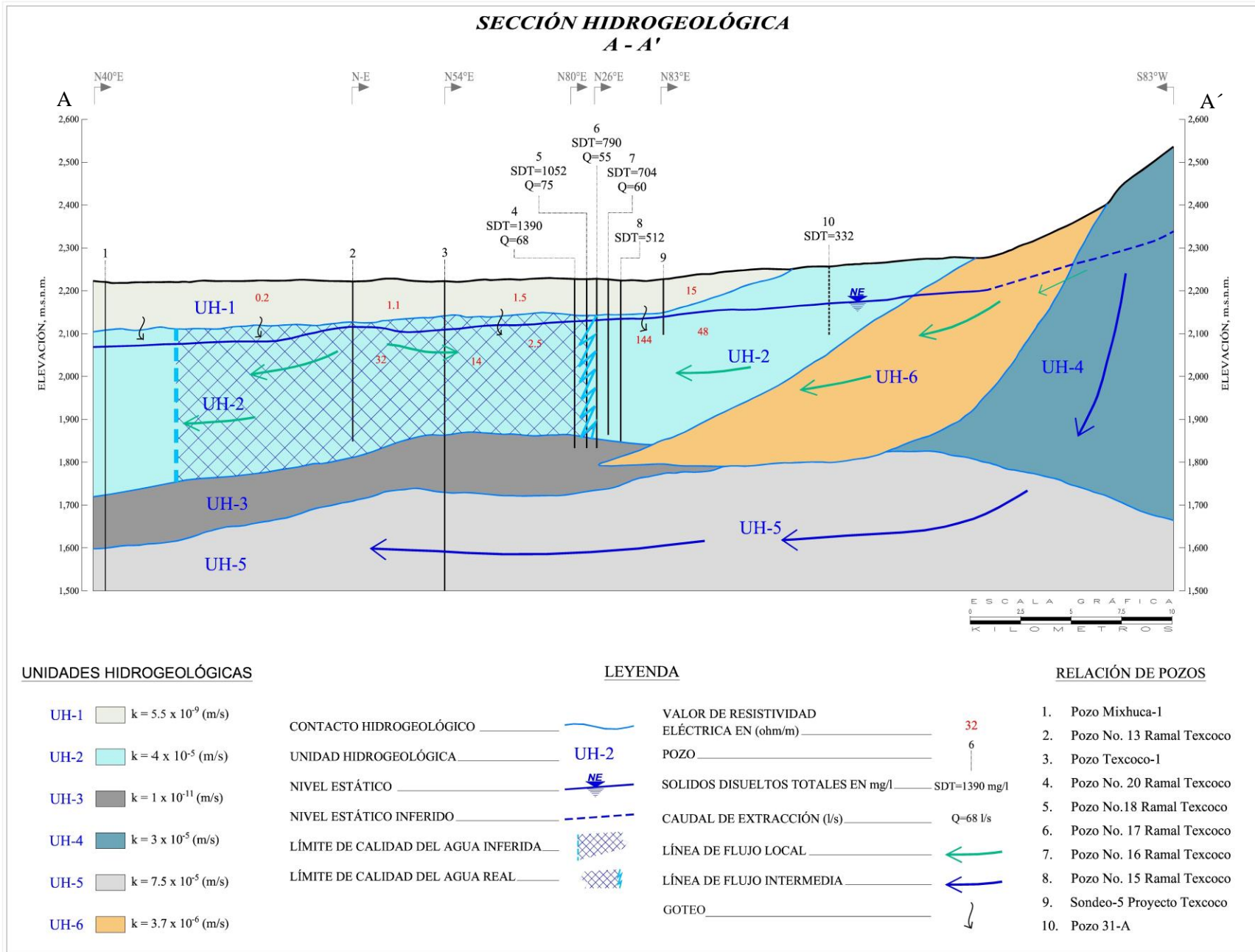


Figura 18 Sección hidrogeológica A - A'. Elaboración propia

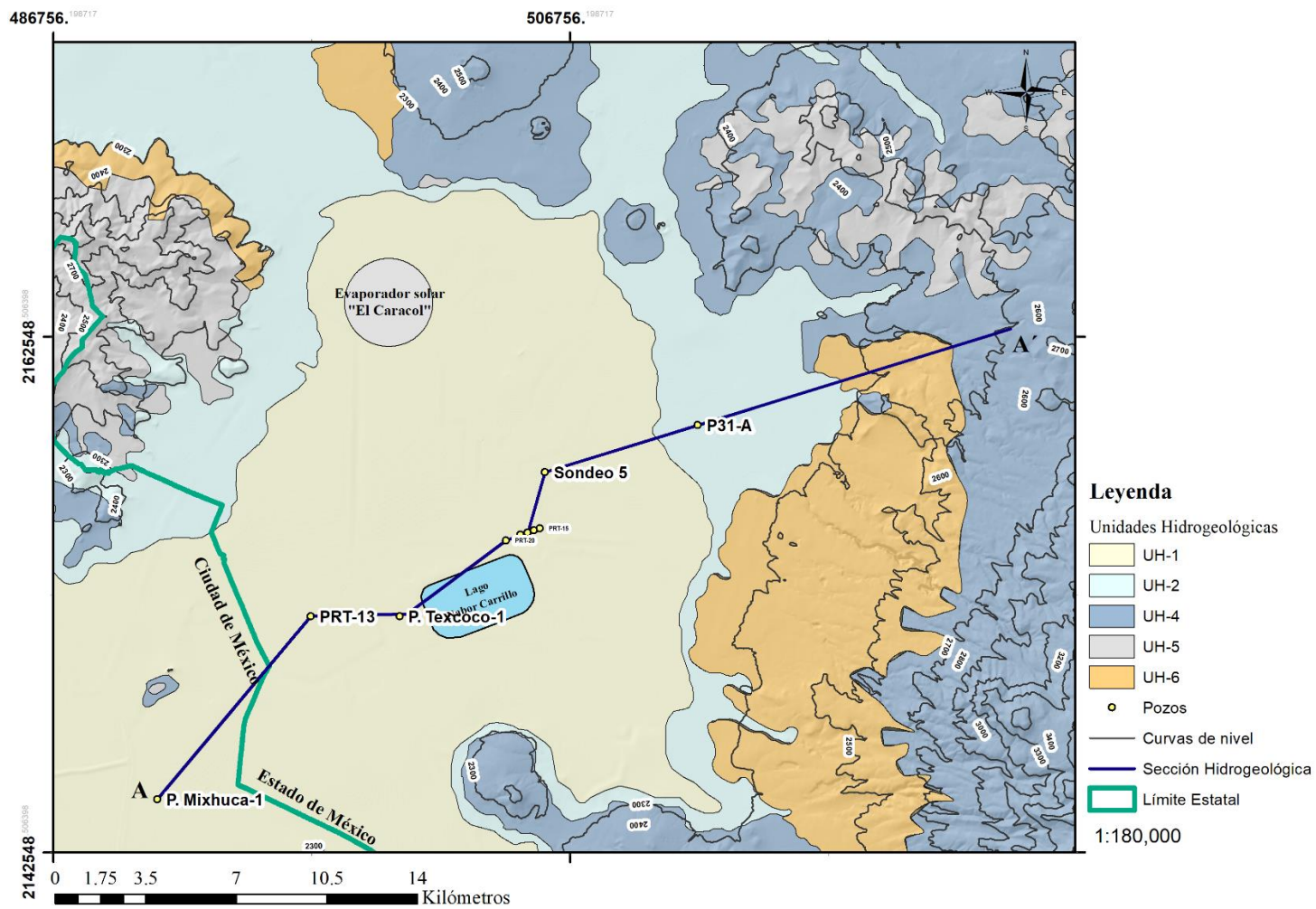


Figura 19 Mapa hidrogeológico y sección A - A'

Tabla 4 Unidades hidrogeológicas

Unidad Hidrogeológica	Descripción Litológica	K (m/s)	Fuente	Sy	Fuente	Ss	Fuente	SDT	Espesor medio	Descripción Hidrogeológica.
UH-1	Arcillas muy deformables bentónicas y montmorilloníticas, con carbonato de calcio, intercaladas con lentes o estratos arenosos y limo arenosos de ceniza y vidrio volcánico delgados (Qla)	5.5×10^{-9}	Rudolph et al, (1991)	0.03	CONAGUA (2006a)	1.13×10^{-2}	Domenico (1972)	X	80 m	Esta unidad funciona como un acuitardo confinante de muy baja permeabilidad.
UH-2	Paquete areno-gravoso intercalado ocasionalmente con lentes arcillosos, derrames volcánicos y capas de cenizas (Qal)	4×10^{-5}	CONAGUA (2012)	0.15	CONAGUA (2006a)	7.4×10^{-5}	Domenico (1972)	150 - 1390	220 m	Esta unidad se encuentra totalmente saturada y corresponde al acuífero principal de la zona. (acuífero granular superior)
UH-3	Tobas, calizas lacustres y margas (Tppc)	1×10^{-11}	Domenico & Schwartz (1990)	0.14	Domenico (1972)	1×10^{-7}	Domenico (1972)	X	150 m	Esta unidad corresponde al basamento hidrogeológico del acuífero principal por sus características litológicas y su muy baja permeabilidad.
UH-4	Tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas intercaladas con derrames lávicos y autobrechados que forman parte de la Sierra Río Frio y Santa Catarina (Tpv, Qt y Qpp)	3.4×10^{-5}	CONAGUA (2006a)	0.04	CONAGUA (2006a)	3.6×10^{-5}	Domenico (1972)	508 – 3596	1800 m	Unidad acuífera de alta productividad con permeabilidad por fracturamiento, en rocas volcánicas localizadas en zonas de mayor elevación correspondientes a la zona de recarga.
UH-5	Secuencias de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobaceas y aglomerados, interestratificadas con lavas de tipo andesítico. (Tmv/Tomv)	7.4×10^{-5}	CONAGUA (2006a)	0.2	Morris & Johnson (1967)	3.6×10^{-5}	Domenico (1972)	136 - 204	> 1500 m	Unidad acuífera de media - baja productividad, con permeabilidad por fracturamiento, en rocas volcánicas localizadas en zonas de mayor elevación.
UH-6	Depósitos piroclásticos (tobas y lahares) que fueron originados por procesos gravitacionales y eruptivos los cuales se encuentran interdigitados con cenizas y lavas del Cuaternario (Tpt)	3.7×10^{-6}	Geoevaluaciones y Perforaciones S.A. de C.V. (2012)	0.2	CONAGUA (2006a)	3.6×10^{-5}	Domenico (1972)	196 - 524	350 m	Corresponde a la unidad por la cual se infiltra el agua superficial que recarga al acuífero en los pies de todas las elevaciones de la Sierra Nevada, Sierra de Guadalupe y la Sierra de las Cruces.

7.7. Recarga del agua subterránea

Las zonas de recarga del acuífero se encuentran al oriente, norte y occidente del valle de Texcoco. La recarga proviene de la infiltración de agua de lluvia a través de las fracturas alojadas en rocas volcánicas Terciarias de la Sierra Rio Frío y de la Formación Tarango en las faldas de la Sierra (Lojero-Ochoa, 2014) y a través de flujos horizontales que pasan a través de los materiales que conforman al acuífero, provenientes del occidente. También se cuenta con un volumen de agua proveniente del acuífero Cuautitlán-Pachuca que recarga al acuífero de Texcoco por medio de flujos horizontales en la parte Nor-Oriental de la cuenca.

Estas componentes, recarga al acuífero en forma de recarga vertical y como entradas por flujo subterráneo debido a que una parte de la precipitación se infiltra en las zonas topográficamente más altas y llega al acuífero posteriormente en forma de recarga horizontal.

Para cuantificar el volumen de agua que recarga al acuífero de forma vertical es necesario considerar una lámina de precipitación promedio que para el Valle de México tiene un valor de 649 mm/año (CONAGUA, 2018). Posteriormente, se necesita medir el porcentaje de este volumen que se infiltra a través del subsuelo. Para esto, es necesario realizar estudios específicos. CONAGUA (2006a) realizó un balance hidrometeorológico para la zona de recarga del Ex-Lago de Texcoco donde se obtuvo un coeficiente de infiltración con un valor del 7.05%.

Debido a que dentro de la zona de recarga existe la presencia de 4 unidades hidrogeológicas, se optó por utilizar dos coeficientes de infiltración, el primero,

mencionado anteriormente será aplicado a las unidades UH-2 y UH-6 debido a que cuentan con valores de conductividad hidráulica y litologías muy similares. Posteriormente, para las unidades UH-4 y UH-5, se consideró un coeficiente de infiltración mayor debido a la presencia de rocas de tipo basáltico fracturadas. Este coeficiente fue calculado por CONAGUA (2014a) y tiene un valor del 20%.

Así como la recarga vertical, las entradas al acuífero por flujo subterráneo horizontal juegan un papel importante para la recarga del acuífero. Por medio del análisis de la piezometría para el año 2006 (Figura 16) y el uso de la Ley de Darcy, se calculó que el volumen de agua que recarga al acuífero por flujo subterráneo horizontal es del orden de los 74.153 Mm³/año. El cálculo realizado para obtener el valor de la recarga por flujo subterráneo horizontal, se muestra a detalle más adelante en el apartado 7.9.1 correspondiente al Balance de aguas subterráneas.

Finalmente se considera al volumen de agua que recarga al acuífero por medio de la filtración de agua proveniente del acuitardo, debido a la extracción por bombeo. Este proceso comienza en cuanto la presión del acuífero llega a ser menor que la del acuitardo semiconfinante y, por lo tanto, el agua comienza a pasar del acuitardo hacia el acuífero en explotación (Sánchez-San Román, 2017). El proceso de filtraciones desde el acuitardo o “goteo” es dependiente de las extracciones que se llevan a cabo en el acuífero, de la conductividad hidráulica y espesor del acuitardo y la transmisividad del acuífero, entre otros factores. Debido a que el acuitardo arcilloso que confina al acuífero en explotación cuenta con una conductividad hidráulica muy baja, ($k = 5.5 \times 10^{-9}$ m/s) y a que la mayoría de los aprovechamientos se encuentran en la zona de recarga, fuera de la unidad que

comprende a este acuífero. el volumen de agua que llega al acuífero será poco y se deja el cálculo de estas entradas para ser computado por medio del modelo matemático de flujo.

Debido a que en este modelo se considera que el acuífero no tiene salidas por flujo subterráneo debido a la presencia de un parteaguas subterráneo en la porción occidental de la cuenca, solo se considerarán los flujos que recargan al acuífero de manera subterránea.

7.8. Identificación de fuentes y/o sumideros

Con el objetivo de conocer las condiciones de explotación del acuífero, se elabora un análisis detallado de los censos de aprovechamientos de aguas subterránea publicados en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) para los años de 2006 y 2018.

Para el año 2006 se identificó un total de 570 aprovechamientos activos que arrojaron un total de 183,02 Mm³/año, de los cuales se identificó que los usos principales corresponden al público urbano 70.57 %, le sigue el agrícola con el 25.8 %, el industrial con el 2% y otros usos incluyendo al pecuario suman el 1.6%.

Tabla 5 Volúmenes extraídos por tipo de uso para el acuífero de Texcoco en los años 2006 y 2018, según el REPDA 2006 y REPDA 2018.

	REPDA mayo 2006	REPDA 2018
Tipo de uso	Extracción [m3/año]	Extracción [m3/año]
Público urbano	129,162,750.60	87,558,132.36
Agrícola	47,275,903.13	54,334,328.29
Industrial	3,663,227.00	4,704,578.60
Pecuario	828,535.00	479,905.50
Otro	2,097,025.00	31,324,139.50
Total	183,027,440.73	178,401,084.25

Con respecto a la información más actual, se encontró que para 2018 se registraron un total de 529 aprovechamientos activos, los cuales extraen un volumen total de 178.4 Mm³/año, de los cuales se identificó que los usos principales corresponden al público urbano 49.08 %, le sigue el agrícola con el 30.46 %, el industrial abarca el 2.64% y otros usos incluyendo al pecuario suman el 17.83%.

Se presenta a continuación una gráfica de extracción por tipo de uso (Figura 20) para 2006 y 2018 junto con un mapa de elevación del nivel estático donde se observan los pozos de bombeo activos para cada año divididos por tipo de uso.

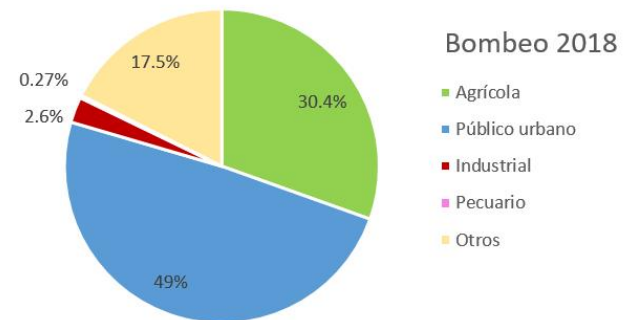
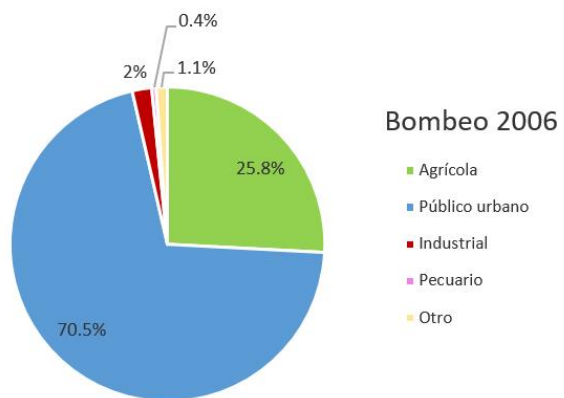
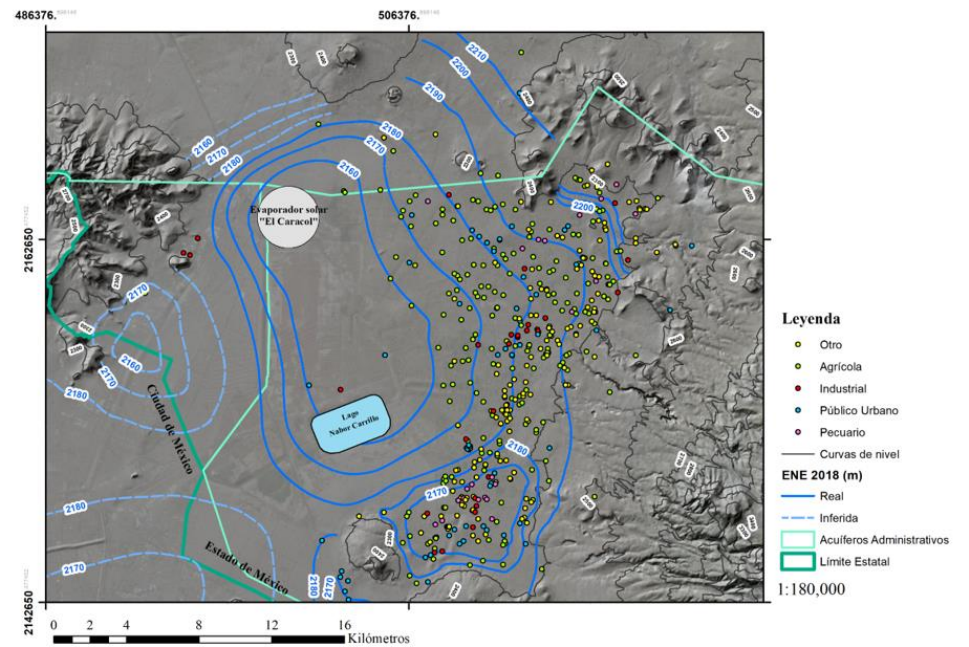
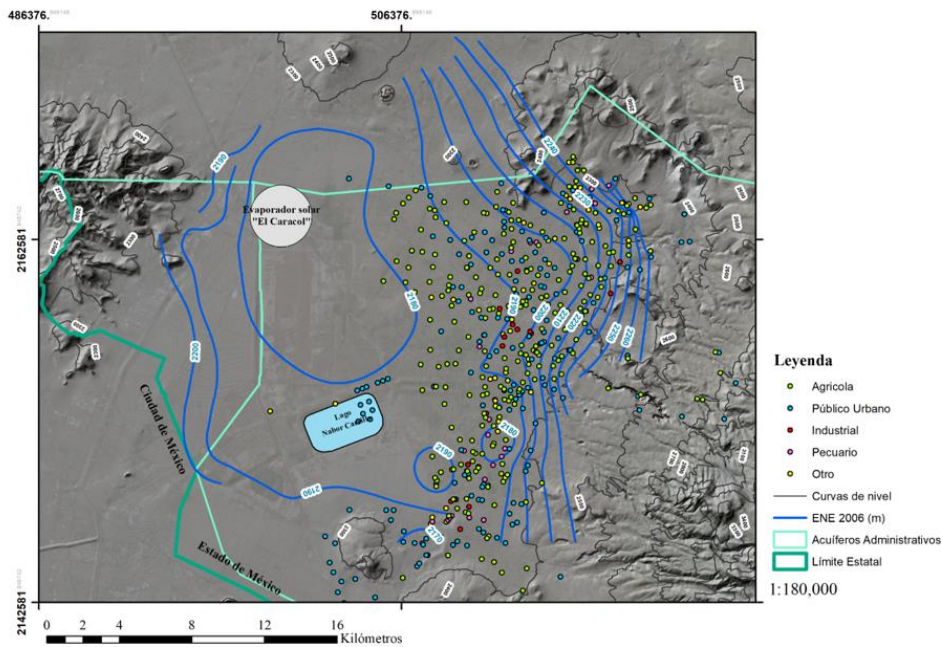


Figura 20 Pozos de extracción activos para 2006 (izquierda) y 2018 (derecha) divididos por tipo de uso, mostrando una gráfica del tipo de uso en porcentaje para cada año.

Para el año 2018, se observa una disminución en el porcentaje de agua extraída para uso “Público urbano”, un aumento sustancial en el agua destinada para “Otros” usos y un aumento ligero en las extracciones para uso “Agrícola” e “Industrial” comparado con la información consultada para el año 2006.

Además, hubo una disminución en las extracciones totales del año 2018 con respecto a las del año 2006. Estos factores y las variaciones en los porcentajes pueden estar relacionados con el número de pozos activos para cada periodo. Se observa que para el año 2018, se tiene un total de 529 aprovechamientos activos, mientras que en el 2006 se tenía un total de 570.

Debido a que la disminución de las extracciones totales no fue de gran magnitud, se pueden comparar los porcentajes de extracción por tipo de uso con cierto margen de error, de esta manera se observa que el aumento para el año 2018 en los usos “Otro”, “Industrial” y “Agrícola”, pueden asociarse a la disminución que tuvo la extracción para el uso “Público urbano”. La razón por la cual se realizaron estos cambios en los ordenamientos por parte del REPDA para los tipos de usos se desconoce y queda a manera de discusión.

7.9. Balance de aguas subterráneas

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2006 - 2018 en una superficie de 554.38 km² que corresponde al dominio del modelo matemático. Para realizar el balance de las aguas subterráneas se considera que la diferencia entre la suma total de las entradas (recarga vertical y entradas por flujo subterráneo horizontal) y la suma total de las salidas (perdidas por bombeo y descarga a y salidas por flujo subterráneo

horizontal), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance del acuífero queda representada de la forma siguiente:

$$\textit{Entradas (E)} - \textit{Salidas (S)} = \textit{Cambio de almacenamiento } \Delta V(S)$$

7.9.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico que establece la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2014a). La recarga total que recibe el acuífero (R_t) ocurre por dos procesos naturales principales:

- a) Por infiltración de agua de lluvia y escurrimientos (R_v)
- b) Por flujo subterráneo horizontal. (E_h)

Además de los procesos naturales que contribuyen a las entradas del sistema acuífero, existe un tercer componente. La recarga inducida (R_i) conformada por la infiltración generada por los excedentes del riego agrícola, el agua residual de las descargas urbanas y las pérdidas en las redes de distribución de agua potable.

- **Recarga vertical (R_v)**

Como se mencionó anteriormente en el Apartado 6.7, la recarga vertical ocurre por medio de la infiltración de agua de lluvia a través de fracturas en dos principales unidades

volcánicas. Estas unidades cuentan con áreas y coeficientes de infiltración distintos. El volumen de agua que recarga al acuífero por medio de recarga vertical, se calculó como el producto de la lámina de lluvia promedio anual, el coeficiente de infiltración y el área de las unidades hidrogeológicas. La ecuación es la siguiente:

$$Rv = P * ci * A$$

Donde:

Rv = Recarga vertical

P = Precipitación (m/año)

ci = coeficiente de infiltración

A = Área de la unidad (m²)

La precipitación promedio es de 649 mm/año, los coeficientes de infiltración y áreas para las unidades (UH-5, UH-6) y (UH-4, UH-2) son 0.0705 y 0.2 y sus áreas 70.66 y 159.1 km². Que al resolver la ecuación anterior para cada unidad da un valor de **3.233** y **20.651** Mm³/año respectivamente dando un total de **23.884** Mm³/año.

- **Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)**

Como se mencionó anteriormente, una parte del volumen de lluvia que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra a través de rocas

fracturadas y a través del piedemonte. Este volumen infiltrado posteriormente recarga al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan al acuífero superior.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy en donde se establece que el caudal que pasa a través de una sección de terreno es igual producto de la transmisividad del material por la longitud del área transversal al flujo considerada, multiplicada a su vez por el gradiente hidráulico. Partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2006 (Figura 21) (Tabla 6).

De acuerdo con la ubicación de las celdas de entrada, se consideran únicamente dos valores de transmisividad. El primero corresponde a la unidad hidrogeológica UH-6, la cual recarga al acuífero en la parte occidental, cuenta con un valor de conductividad hidráulica de 3.7×10^{-6} y un espesor de $b = 350 \text{ m}$; las celdas asociadas a este valor son: 1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7. El segundo valor de transmisividad es asignado a las celdas 8, 9, 10 y 11 y corresponde a las entradas horizontales que provienen de la parte occidental del acuífero que pasan a través de la unidad hidrogeológica UH-2. Esta unidad cuenta con un valor de $k = 4 \times 10^{-5}$ y un espesor de $b = 220 \text{ m}$.

Se obtuvieron valores de transmisividad con la siguiente fórmula:

$$T = k * b$$

Donde:

T = Transmisividad [m^2/s]

k = Conductividad hidráulica [m/s]

b = Espesor de la unidad [m]

Aplicando la ecuación para los dos conjuntos de celdas, se obtiene un valor de **T = 0.0013** para la UH-6 y un valor de **T = 0.0088** para la UH-2.

Cada celda corresponde al área delimitada entre dos curvas equipotenciales y dos líneas de corriente. De esta manera se marcaron 12 celdas de entrada para el sistema acuífero Texcoco (Figura 21). mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

Q = Gasto [m³/s]

T = Transmisividad [m²/s]

B = Longitud de la celda [m]

I = Gradiente hidráulico

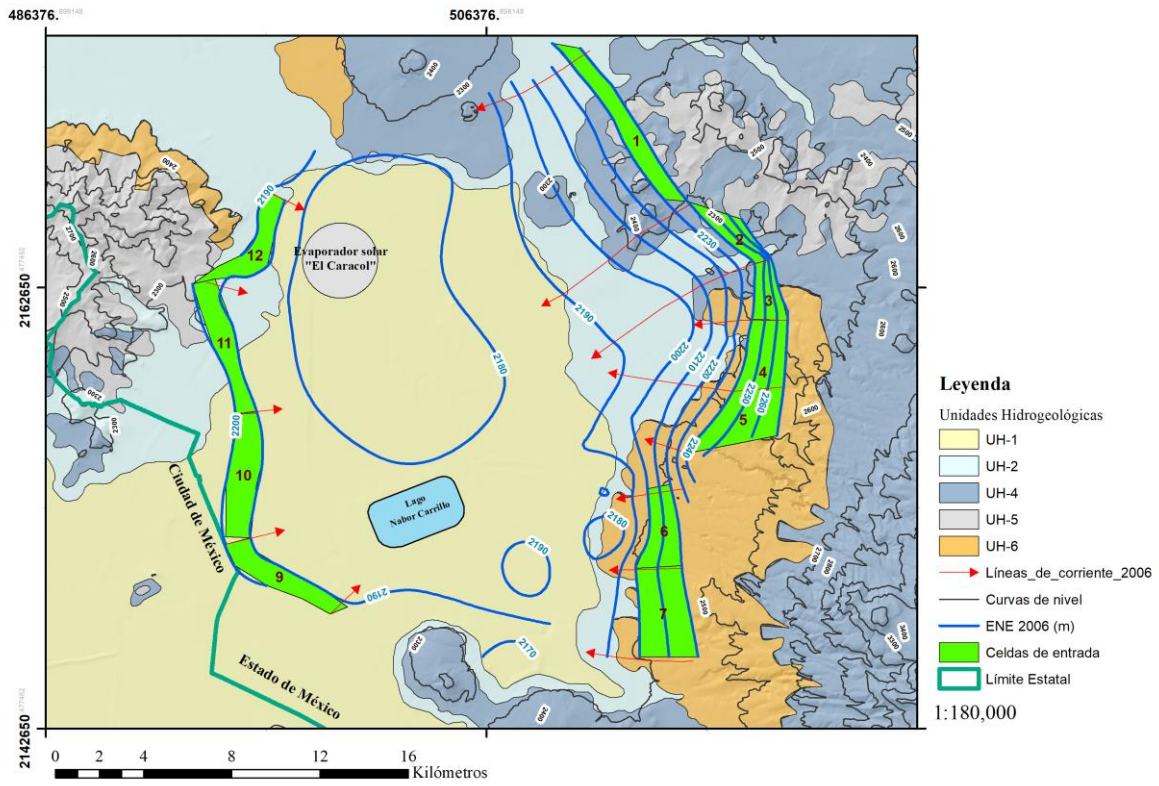


Figura 21 Elevación del nivel estático (2006) donde se observan las entradas por flujo subterráneo (líneas de flujo) dentro de 7 diferentes celdas de entrada.

Tabla 6 Calculo de entradas por flujo subterráneo horizontal

Flujo subterráneo horizontal							
Entradas							
Celda	Ancho	Largo	h_1-h_2	Gradiente hidráulico	Transmisividad (T)	Caudal	Volumen
	m	m	m	i	m^2/s	m^3/s	$hm^3/año$
1	916	8600	10	0.011	0.0013	0.12298	3.878
2	1200	3100	30	0.025	0.0013	0.10075	3.177
3	1000	2600	30	0.03	0.0013	0.1014	3.197
4	1800	3150	30	0.017	0.0013	0.069615	2.195
5	2700	2450	30	0.011	0.0013	0.035035	1.104
6	1300	3650	20	0.015	0.0013	0.071175	2.244
7	2250	4000	20	0.0089	0.0013	0.04628	1.459
8	1000	5900	10	0.01	0.0088	0.5192	16.37
9	1400	5600	10	0.00714	0.0088	0.351	11.069
10	1000	6200	10	0.01	0.0088	0.5456	17.20
11	1300	5750	10	0.00769	0.0088	0.389	12.26
						Total	74.153

Según la información calculada el volumen de entradas por flujo horizontal es de **(Eh) =**

74.153 Mm³/año.

- **Recarga inducida**

De acuerdo con el estudio realizado por CONAGUA (2002) La recarga inducida se considera como despreciable debido a que el material arcilloso que forma el primer estrato de la zona es impermeable y no permite la infiltración de agua. Las láminas de riego son esporádicas ya que se riega en temporada de estiaje en zonas arboladas por lo tanto no se toman en cuenta.

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$Rt = Eh + Rv$$

$$Rt (2006) = 74.153 + 23.884 = \mathbf{98.037}$$

$$Rt (2018) = 74.153 + 23.884 = \mathbf{98.037}$$

7.9.2. Salidas

La descarga total del acuífero ocurre principalmente mediante la extracción por bombeo
(B) No existen, descargas por flujo base, flujo subterráneo o por evapotranspiración.
(CONAGUA, 2014a).

- **Bombeo (B)**

Las extracciones de aguas subterránea, según los censos realizados en 2006 y 2018 dan como resultado de acuerdo con lo expuesto en el capítulo anterior un volumen de 183.027 Mm³ para el año 2006 y 178.401 Mm³ para 2018. Estos volúmenes se muestran separados por tipo de uso en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7 Volúmenes extraídos por tipo de uso para el acuífero de Texcoco en el año 2006, según el REPDA 2006

REPDA mayo de 2006	
Tipo de uso	Extracción [m3/año]
Público urbano	129,162,750.60
Agrícola	47,275,903.13
Industrial	3,663,227.00
Pecuario	828,535.00
Otro	2,097,025.00
Total	183,027,440.73

Tabla 8 Volúmenes extraídos por tipo de uso para el acuífero de Texcoco en el año 2018, según el REPDA 2018

REPDA 2018	
Tipo de uso	Extracción [m3/año]
Público urbano	87,558,132.36
Agrícola	54,334,328.29
Industrial	4,704,578.60
Pecuario	479,905.50
Otro	31,324,139.50
Total	178,401,084.25

7.9.3. Balance

Con base a la información mostrada anteriormente en este capítulo, se obtuvo el siguiente balance de aguas subterráneas (Tabla 9), el cual se muestra a continuación:

Tabla 9 Resumen del balance de aguas subterráneas, Acuífero de Texcoco.

Concepto	Mm ³ /año	Mm ³ /año
	2006	2018
Entradas		
Recarga vertical	23.884	23.884
Flujo horizontal	74.153	74.153
Recarga total	98.037	98.037
Salidas		
Bombeo	183.027	178.401
Descarga total	183.027	178.401
Entradas – Salidas	-84.99	-80.364

Con el objetivo de comprender el comportamiento actual del acuífero de Texcoco en la actualidad y su posible comportamiento futuro, se planteó un modelo matemático de flujo subterráneo el cual se describe en el capítulo 8.

8. MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO

El modelo matemático de flujo del acuífero de Texcoco tiene como finalidad estudiar el comportamiento dinámico y la respuesta del acuífero a las condiciones a las que se encuentra sometido. Con el modelo es posible simular escenarios y programas con fines predictivos para conocer la variación del nivel estático producida por un determinado régimen de explotación o recarga. Para obtener estas variaciones piezométricas, el modelo calcula la respuesta del acuífero a la extracción por bombeo. En este balance influyen además de las características físicas del acuífero, las entradas por flujo subterráneo horizontal, la recarga natural por lluvia y los regímenes de bombeo.

Una vez entendidas las características morfológicas, geológicas, hidrogeológicas, climáticas, piezométricas y los balances de agua subterránea, se generan archivos digitales que deben ser ingresados de manera ordenada para poder ser leídos por el programa y posteriormente ser utilizados en la simulación del comportamiento del acuífero.

Este modelo se creó por medio del uso de la interfaz gráfica de usuario Model Muse implementado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, la cual utiliza la paquetería de MODFLOW. Se optó por utilizar este software debido a que es de uso libre, permite la incorporación de archivos compatibles con sistemas de información geográfica, imágenes georreferenciadas y bases de datos.

Para el desarrollo de este capítulo se definen los siguientes conceptos:

a) Calibración:

Se define como la acción efectuada para demostrar que el modelo es capaz de reproducir las cargas y los flujos observados en campo

b) “General Head Boundary” (GHB) o “Frontera de carga general”:

Paquete cuya función es la de simular el flujo dentro o fuera de una celda para una fuente externa en proporción de la diferencia entre la carga hidráulica en la celda y la carga hidráulica asignada a la fuente externa.

c) Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

La raíz del error cuadrático medio es una herramienta usada para medir las diferencias entre valores observados y valores simulados por un modelo dentro de una muestra de datos.

d) Modelo matemático de flujo

Simulación del flujo de agua subterránea por medio de una ecuación gobernante que represente los procesos físicos que ocurren en ese sistema. Incluye condiciones de frontera.

A continuación, se explica cómo se ha generado cada uno de los componentes del modelo para el acuífero de Texcoco:

8.1. Software empleado

El modelo matemático del acuífero de Texcoco se realizó para esta etapa con base en el código MODFLOW y la adaptación del mismo dentro de la interfaz gráfica de usuario Model Muse. Actualmente, el MODFLOW es el paquete de modelación de flujo subterráneo más utilizado, tanto en México como en los Estados Unidos.

El modelo matemático de MODFLOW fue tomado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), quienes desarrollaron la interfaz gráfica de usuario Model Muse con el objetivo de facilitar el manejo de datos e integrar los diferentes paquetes de modelación en un solo software. Se optó por utilizar este software debido a que es de uso libre, permite la incorporación de archivos compatibles con sistemas de información geográfica, imágenes georreferenciadas y bases de datos.

8.2. Definición del área del modelo

Para la elaboración del modelo, se utilizó un plano base que corresponde al polígono que se muestra en la Figura 22. No se consideró el polígono del acuífero administrativo debido a que no se cuenta con información piezométrica para la porción oriental del acuífero lo cual genera incertidumbre y problemas en la modelación. El área utilizada para el modelo fue implementada considerando las fronteras del modelo y corresponde a la zona donde se cuenta con información disponible y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

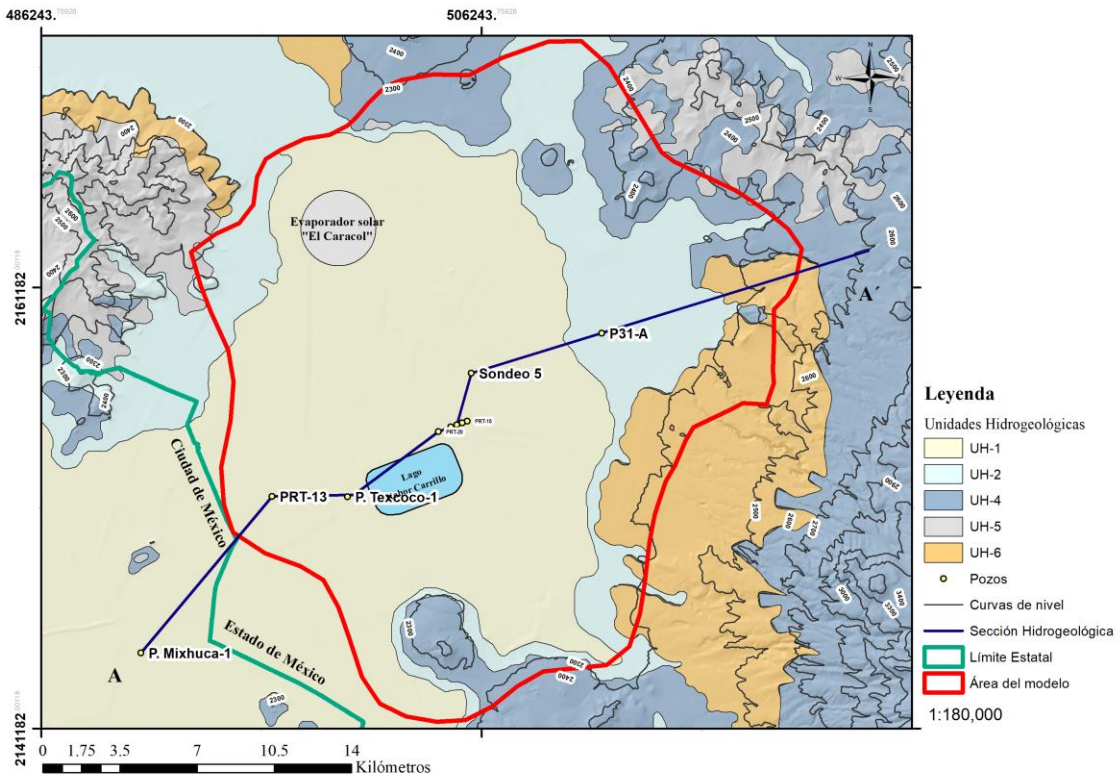


Figura 22 Área del modelo matemático de flujo

8.3. Discretización espacial y temporal

El modelo actual se definió para un área de 554.38 km². La discretización espacial para el modelo se definió en una malla de 93 x 104 elementos en celdas de 300 m por 300 m. Una resolución alta de malla se utilizó para obtener una mejor representación del sistema acuífero y por lo tanto una mejor simulación del flujo subterráneo en un terreno mayormente plano. Se generó un modelo de 3 capas con el objetivo de modelar las condiciones del acuífero en explotación con espesores de 80, 250 y 150 m respectivamente, partiendo de la superficie topográfica. La capa 1 corresponde al acuitardo confinante, la

capa 2 corresponde al acuífero en explotación y la capa 3 corresponde al basamento hidrogeológico. A las dos capas superiores se les asignó un tipo de capa convertible para simular las condiciones para un acuífero semiconfinado. A la tercera capa se le asignó un tipo de capa confinado debido a su posición estratigráfica. Para efectos de la modelación, se subdividieron las capas 1 y 2 que corresponden al acuitardo confinante y al acuífero en explotación en 3 subcapas cada una de igual espesor.

El objetivo de este estudio es contar con un modelo matemático de flujo calibrado para el año 2018 y utilizarlo para simular planes de gestión en distintos escenarios futuros. Para lograr esto, es necesario simular el flujo de agua del acuífero en estado transitorio.

Es necesario contar con una base de datos completa que contenga información confiable sobre las condiciones históricas del acuífero para poder establecer un periodo de modelación para realizar predicciones. Abarcar un periodo de modelación con una extensión mayor a la del periodo con el que se cuenta con información histórica, podría prestarse a una mala práctica o a generar información errónea debido a que no se contaría con la información suficiente para sustentar el comportamiento del acuífero.

Debido a que únicamente se pudo obtener una base de datos completa para el periodo 2006-2018, se optó por implementar un periodo de modelación de 12 años (18 de mayo de 2006 a 18 de mayo de 2018) dividido en 3 periodos de estrés de 4 años (2006-2010, 2010-2014 y 2014-2018), cada uno subdividido en 10 pasos de tiempo con un multiplicador de 1.2.

8.4. Definición de zonas activas e inactivas

Las celdas activas se definieron a partir de las condiciones de frontera naturales del acuífero con un área total de 554.382 km². Se consideran como activas todas las celdas contenidas dentro del polígono que se muestra en la Figura 23 para las tres capas del modelo. Las orillas del modelo funcionan como fronteras de no flujo o celdas inactivas a excepción de las celdas donde fue aplicado el paquete de “*General head boundary*” (GHB), el cual se menciona más adelante en el Apartado 8.7.

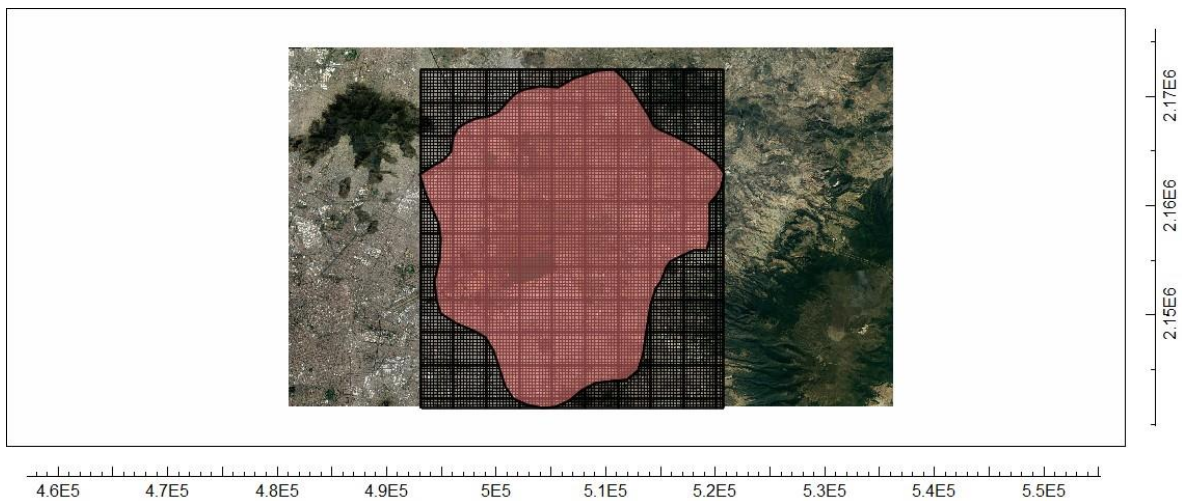


Figura 23 Zona activa (rojo)

8.5. Asignación de parámetros hidráulicos

Para la asignación de parámetros se considera un total de 6 unidades hidrogeológicas, con base en la información expresada anteriormente en el apartado 7.6 Se asignan valores de conductividad hidráulica, almacenamiento específico y rendimiento específico para todas las unidades.

Las figuras 24, 25 y 26 muestran una distribución de las conductividades utilizadas (kx) para las diferentes capas del modelo. En la Tabla 10 Se muestran los valores de conductividad hidráulica, almacenamiento específico (Ss) y rendimiento específico (Sy) para todas las unidades que conforman el modelo.

Tabla 10 Parámetros hidráulicos para las unidades hidrogeológicas UH-1, UH-2, UH-3, UH-4, UH-5 y UH-6

Unidad Hidrogeológica	kx (m/s)	Sy	Ss
UH-1	5.5×10^{-9}	0.03	1.13×10^{-2}
UH-2	4×10^{-5}	0.15	7.4×10^{-5}
UH-3	1×10^{-11}	0.14	1×10^{-7}
UH-4	7.4×10^{-5}	0.04	3.6×10^{-5}
UH-5	3.4×10^{-5}	0.2	3.6×10^{-5}
UH-6	3.7×10^{-6}	0.2	3.6×10^{-5}

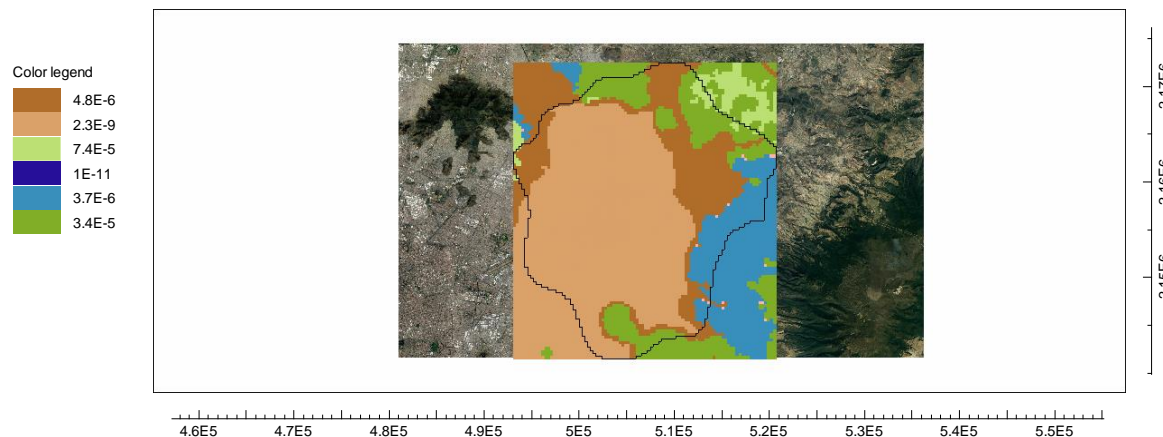


Figura 24 Distribución de la conductividad hidráulica, capa 1 (valores por color en m/s)

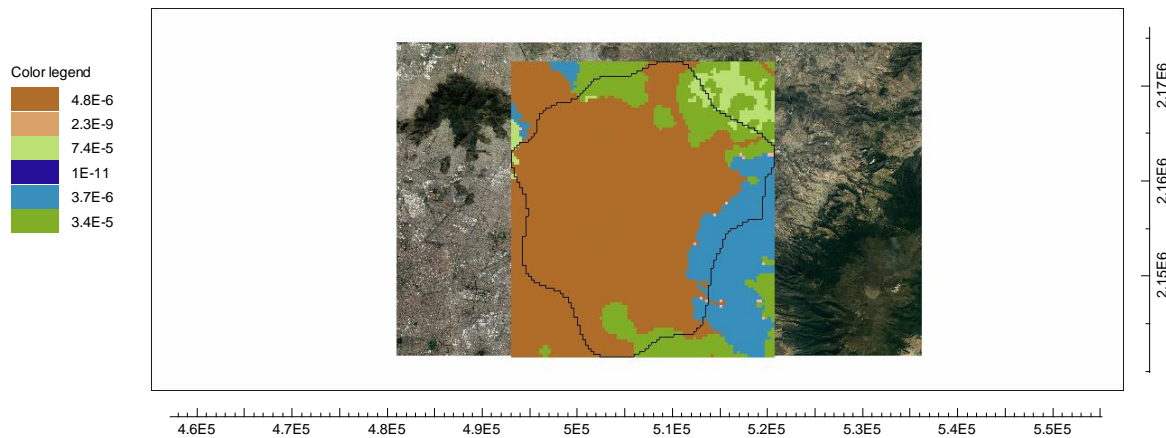


Figura 25 Distribución de la conductividad hidráulica, capa 2 (valores por color en m/s)

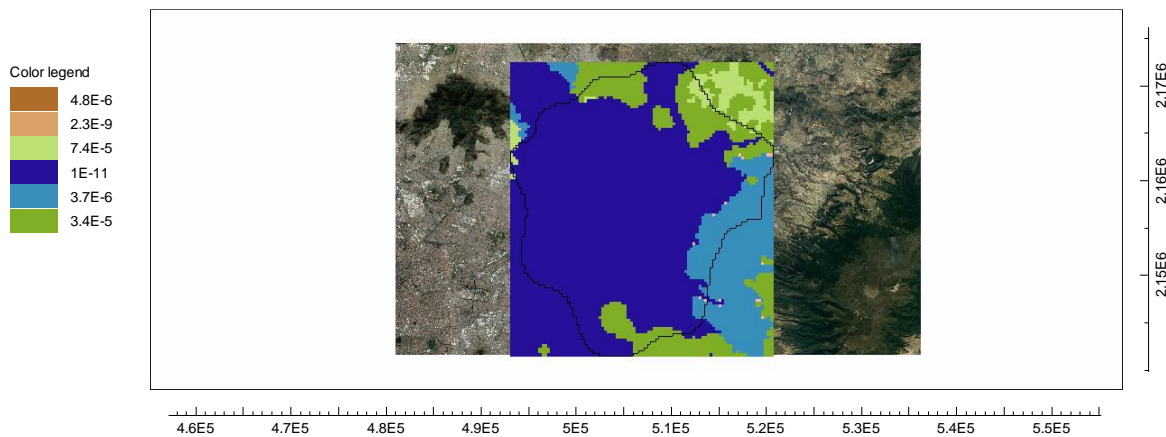


Figura 26 Distribución de la conductividad hidráulica, capa 3 (valores por color en m/s)

8.6. Condiciones iniciales

Para el análisis del comportamiento de un acuífero y su reproducción es necesario definir las condiciones con las cuales se inicia la simulación. Con respecto a las cargas iniciales del modelo, se utilizó una malla o superficie generada con Surfer correspondiente a la elevación del nivel estático para el año 2006, generada a partir de la información

presentada por OCAVM y SACMEX (2018) (Figura 16). Se tomará como tiempo cero al 18 de mayo de 2006.

8.7. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera fueron definidas como parte del modelo conceptual en el apartado 7.2. y fueron traducidas a condiciones de frontera numéricas.

Los parteaguas y las fronteras en la parte oriental fueron simuladas como dependientes de la carga por medio del paquete “General Head Boundary”. Las GHB fueron utilizadas para considerar el flujo subterráneo horizontal que recarga al acuífero. Se muestra a continuación las condiciones de frontera empleadas en el modelo:

- Recarga

Debido a que la UH-3 no forma parte de la recarga y no aflora en la zona de estudio y a que la UH-1 no permite la infiltración de agua al subsuelo, se tienen así 4 unidades que recargan al acuífero, la UH-2, UH-4, UH-5 y UH-6. Para la simulación de la recarga a través de estas unidades, se implementaron dos diferentes coeficientes de infiltración. Estos fueron calculados por medio del método del balance hidrometeorológico y la resolución de un balance de aguas subterráneas en estudios anteriores, esto se describe a detalle en el apartado 7.7.

Dentro del modelo, para las unidades UH-4 y UH-5 se consideró un coeficiente de infiltración del 20% de la lámina de precipitación promedio debido a que estas unidades están compuestas por rocas volcánicas que cuentan con alta permeabilidad por

fracturamiento. Para las unidades UH-2 y UH-6 se consideró un coeficiente del 7.05% (Figura 27) el cual se asignó debido a que estas unidades cuentan con valores de conductividad hidráulica y litologías muy similares, asociados a una menor capacidad de infiltración.

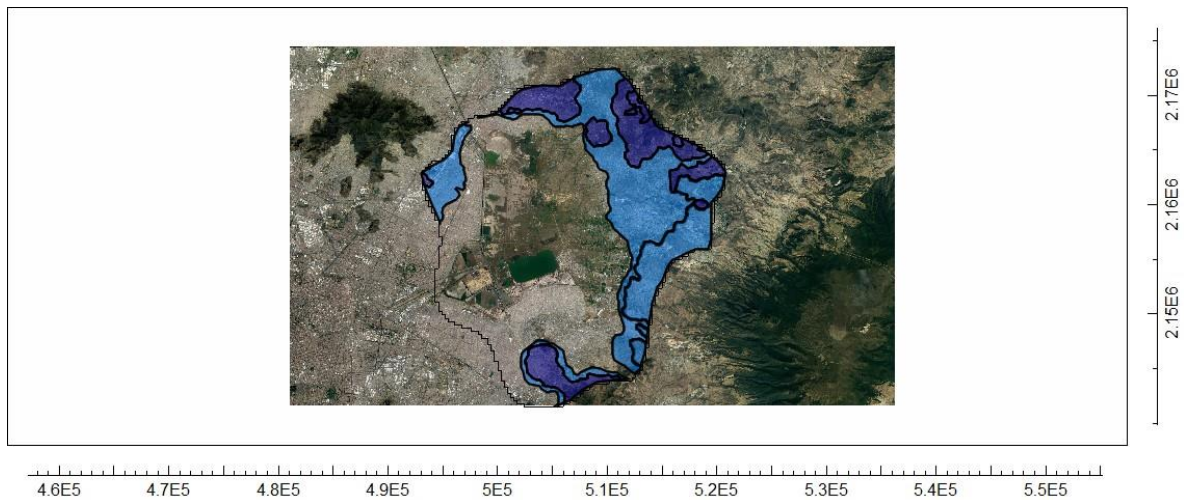


Figura 27 Área de recarga dividida en dos zonas, la zona azul marino corresponde al coeficiente de infiltración de 20% y la zona azul cielo tiene un coeficiente de infiltración del 7.05%

- Bombeo

Otra de las condiciones de frontera dentro de la zona de estudio corresponde al bombeo de agua a través de pozos (Figura 28). Este régimen no ha sufrido modificaciones mayores con respecto a la cantidad de agua bombeada desde el año 2006 hasta la fecha. Para los pozos ingresados al modelo, se implementó un régimen de extracción constante igual para todos los usos, tomando en cuenta el volumen extraído anualmente para cada pozo. La información de los regímenes de bombeo fue publicada dentro del REPDA.

Debido a que solo se cuenta con registros de bombeo para los años 2006 y 2018 y a que no se presentó una disminución significativa (2.52%) en el bombeo registrado para el año 2018 (183.027 Mm³) comparado con el del año 2006 (178.401 Mm³). Se decidió implementar los regímenes de extracción del año 2006 de forma constante para los primeros 2 periodos de estrés 2006-2010 y 2010-2014 e implementar los regímenes del año 2018 para el periodo de estrés de 2014-2018.

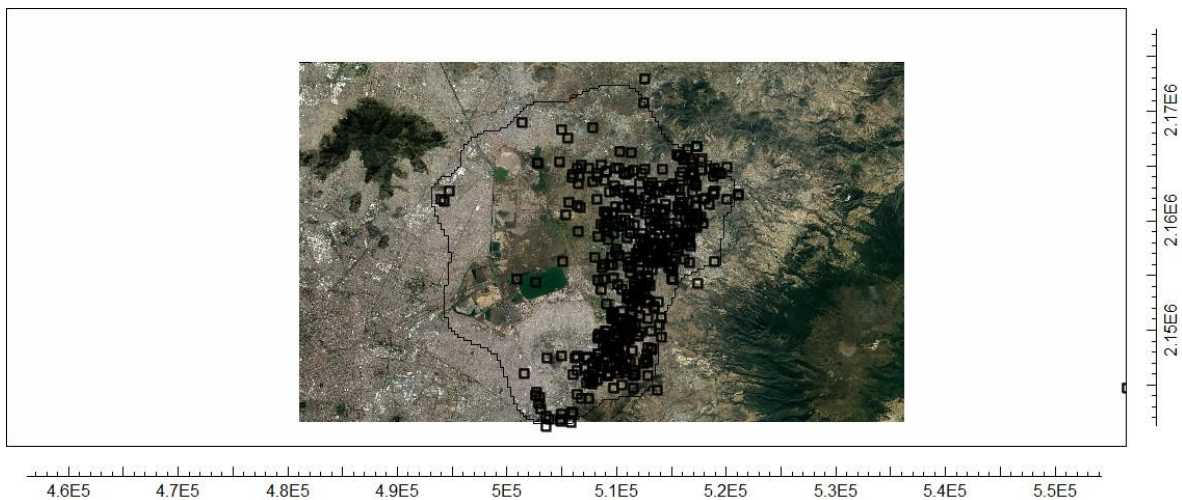


Figura 28 Pozos de bombeo dentro del modelo matemático

- GHB

La frontera de carga general permite calcular la elevación de la carga hidráulica en la celda en que se asigna. Esta frontera introduce el concepto de “carga lejana” y alimenta al modelo con el valor de una carga hidráulica fuera del área del modelo (II-UNAM, 2018). Esto, permite que varíe la carga de la celda en la que se asigna esta frontera. El flujo del

agua se calcula con el gradiente hidráulico entre la “carga lejana” y el valor de la carga de la celda, haciendo uso de la “conductancia”, un valor que no puede ser medido en campo y que se obtiene mediante la calibración del modelo.

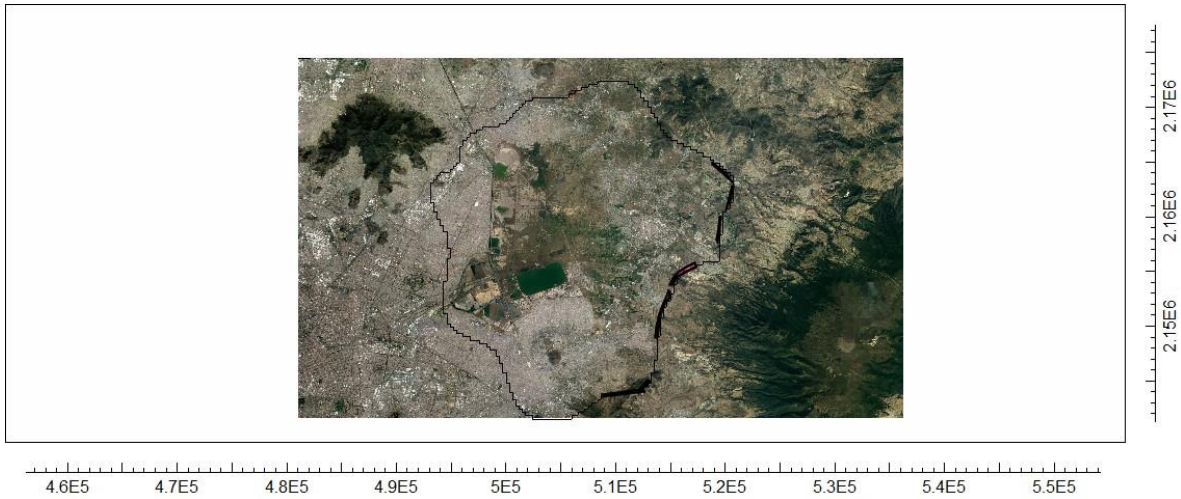


Figura 29 Celdas de entrada por flujo subterráneo horizontal (GHB)

Para simular las entradas por flujo subterráneo horizontal utilizando un total de 10 celdas de entrada dentro de todo el tiempo de la simulación (Figura 29). Las fronteras fueron asignadas para todo el espesor del acuífero (capas 1, 2 y 3) y los valores de conductancia fueron ingresados de forma directa mediante la calibración del modelo.

8.8. Etapa de calibración

El objetivo de la calibración es demostrar que el modelo es capaz de reproducir los valores de las cargas hidráulicas para representar correctamente las condiciones en el sistema acuífero, aumentando la confiabilidad y la capacidad de predicción del modelo.

La calibración se lleva a cabo mediante el ajuste de los parámetros, condiciones de frontera y condiciones iniciales del modelo, dentro de rangos razonables, para obtener un buen ajuste entre observaciones y resultados (II-UNAM, 2018).

Considerando el grado de incertidumbre que generan las estimaciones del flujo subterráneo horizontal para este modelo, debido a que no se cuenta con información suficiente para cuantificar estas entradas con exactitud; objetivamente se adaptan los valores utilizados en el modelo hidrogeológico conceptual para la calibración del modelo y finalmente simular estas condiciones de frontera. Los parámetros de conductividad hidráulica, almacenamiento específico, rendimiento específico y recarga vertical se mantienen constantes y no se toman en cuenta para la calibración debido a que se cree que estos valores tienen una base sólida y que al manipularlos se generarían efectos contraproducentes para la simulación de este modelo.

La calibración para este modelo se efectuó en estado transitorio, siguiendo los siguientes pasos:

- a) Seleccionar los pozos de observación para calibrar el modelo.

- b) Calibrar el modelo en estado transitorio para el periodo de 2006 a 2018.
- c) Estimar el error máximo permisible entre la carga medida y la carga calculada.
- d) Correr el modelo y realizar cambios manuales en cada corrida hasta que las cargas calculadas por el modelo coincidan con las cargas reales.
- e) Realizar un análisis de la sensibilidad de la conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y recarga.

Con base en la información disponible en (OCAVM y SACMEX, 2018), se ingresa una red de 31 pozos de observación para el año 2010, 32 para el año 2014 y 28 para el 2018, mismos que se muestran en las Tablas 11, 12 y 13.

Tabla 11 Pozos de observación para el año 2010, con coordenadas X y Y en UTM, Valor observado de elevación del nivel estático, valor simulado por el modelo y valor residual obtenido de la diferencia del valor simulado con el valor observado.

Calibración 2010				
X	Y	Valor Observado	Valor Simulado	Residual
507830	2166924	2189.13989	2192.95654	-3.81665039
505961	2163726	2184.26001	2183.96973	0.29028321
496559	2164867	2177.12012	2181.97217	-4.85205078
508783	2161714	2186.6001	2183.98047	2.61962891
511146	2148940	2178.06006	2174.85693	3.203125
520159	2161604	2266.73999	2264.89844	1.84155273
514299	2160088	2189.62012	2196.98169	-7.36157226
513227	2161552	2187.46997	2194.76245	-7.29248047
512356	2160643	2188.73999	2189.66797	-0.92797852
518650	2163988	2239.37012	2230.62842	8.74169922
517603	2160466	2234.73999	2235.98218	-1.2421875
515421	2162547	2200.5	2207.41089	-6.91088867
514170	2162998	2194.57007	2202.82129	-8.2512207
516352	2163662	2212.13989	2214.97754	-2.83764648
511442	2158767	2184.51001	2181.14648	3.36352539
512999	2156719	2195.82007	2185.98071	9.83935547
514273	2156651	2198.73999	2198.03271	0.70727539
511765	2153340	2187.73999	2177.89819	9.84179687
510721	2159609	2184.63989	2181.35181	3.28808594
511021	2152754	2186.03003	2177.75415	8.27587891
509692	2150985	2183.07007	2175.9314	7.13867188
510843	2152323	2182.52002	2175.92188	6.59814453
512431	2153896	2176.67993	2178.24683	-1.56689453
513050	2154210	2185.34009	2194.17578	-8.83569336
512131	2151504	2185.51001	2174.68481	10.8251953
513344	2150127	2199.26001	2200.2749	-1.01489257
510853	2155517	2187.34009	2181.7937	5.54638672
511068	2170050	2212.43994	2205.15088	7.2890625
514453	2160919	2187.13989	2197.89453	-10.7546387
507730	2146110	2159.47998	2161.08813	-1.6081543
511670	2145913	2180.67993	2189.7019	-9.02197266

Tabla 12 Pozos de observación para el año 2014, con coordenadas X y Y en UTM, Valor observado de elevación del nivel estático, valor simulado por el modelo y valor residual obtenido de la diferencia del valor simulado con el valor observado.

Calibración 2014				
X	Y	Valor Observado	Valor Simulado	Residual
507830	2166924	2184.07007	2191.68677	-7.61669922
505961	2163726	2172.70996	2182.9458	-10.2358398
496559	2164867	2182.5	2181.41113	1.08886719
508783	2161714	2176.08008	2182.30615	-6.22607422
511146	2148940	2169.92993	2168.96143	0.96850586
520159	2161604	2270.34009	2259.14844	11.1916504
514299	2160088	2185.8501	2194.61768	-8.76757812
513227	2161552	2186.6001	2191.92188	-5.32177734
512356	2160643	2178.8501	2186.50732	-7.65722656
517369	2160384	2234.54004	2224.24805	10.2919922
518650	2163988	2244.37988	2235.36035	9.01953125
518830	2164447	2246.28003	2237.04663	9.23339844
517603	2160466	2234.21997	2230.88062	3.33935547
515421	2162547	2196.95996	2205.48511	-8.52514648
514170	2162998	2193.8999	2200.10693	-6.20703125
516352	2163662	2211.68994	2213.88428	-2.19433593
511442	2158767	2177.43994	2177.38062	0.05932618
512999	2156719	2191.5	2182.12183	9.37817383
511765	2153340	2185.59009	2174.11304	11.4770508
510721	2159609	2176.51001	2177.69629	-1.18627929
511021	2152754	2179.12988	2175.16382	3.96606445
509692	2150985	2167.09009	2172.7251	-5.63500977
510843	2152323	2178.15991	2173.24414	4.91577149
512431	2153896	2181.80005	2174.57715	7.22290039
512131	2151504	2180.77002	2171.96973	8.80029297
513344	2150127	2195.34009	2201.38428	-6.04418945
508333	2149284	2179.40991	2174.85132	4.55859375
510853	2155517	2182.92993	2179.47656	3.45336914
511068	2170050	2202.75	2201.21924	1.53076172
514453	2160919	2183.82007	2195.77759	-11.9575195
507730	2146110	2154.09009	2152.57764	1.51245117
511670	2145913	2174.71997	2165.33667	9.38330078

Tabla 13 Pozos de observación para el año 2018, con coordenadas X y Y en UTM, Valor observado de elevación del nivel estático, valor simulado por el modelo y valor residual obtenido de la diferencia del valor simulado con el valor observado.

Calibración 2018				
X	Y	Valor Observado	Valor Simulado	Residual
507830	2166924	2182.41992	2189.96509	-7.54516601
505961	2163726	2170.81006	2181.77881	-10.96875
508783	2161714	2173.11011	2180.84839	-7.73828125
511146	2148940	2165.43994	2159.99316	5.44677735
520159	2161604	2269.75	2271.72046	-1.97045898
514299	2160088	2184.12988	2191.66992	-7.54003907
513227	2161552	2182.97998	2188.73999	-5.76000976
512356	2160643	2181.96997	2183.57837	-1.60839844
517603	2160466	2234.80005	2224.79565	10.0043945
515421	2162547	2196.33008	2200.82983	-4.49975586
514170	2162998	2194	2196.26782	-2.26782227
516352	2163662	2200.25	2207.23218	-6.98217773
512999	2156719	2189.25	2179.81079	9.43920898
511765	2153340	2178.81006	2172.99365	5.81640625
510721	2159609	2174.61011	2175.05713	-0.44702149
511021	2152754	2177.38989	2173.83618	3.55371094
509692	2150985	2172.54004	2170.12988	2.41015625
510843	2152323	2175.02002	2171.7688	3.2512207
512131	2151504	2187.61011	2179.78809	7.82202148
508333	2149284	2181.82007	2171.13672	10.6833496
510853	2155517	2180.3501	2178.06543	2.28466797
511068	2170050	2200.31006	2198.28638	2.02368164
514453	2160919	2182.87012	2192.67358	-9.80346679
507730	2146110	2149.78003	2146.90234	2.87768555
511670	2145913	2170.8999	2174.16821	-3.26831055
496361.4	2151337.3	2182	2173.63916	8.36083984
497368.8	2162276	2171	2178.58398	-7.58398438
503065.9	2158759.8	2161	2170.31152	-9.31152344

Se tiene en cuenta que algunos errores en la información piezométrica ingresada como pozos de observación pueden incluir, (entre otros) efectos transitorios no reflejados en el modelo, y errores asociados a la precisión del aparato que se utilice para medir las cargas.

Algunas causas probables de las discrepancias entre los valores simulados y observados pueden abarcar desde una mala representación de la heterogeneidad de los materiales, errores en la conceptualización del sistema, errores en la parametrización del modelo e incertidumbre dentro de los valores observados.

Se logró calibrar el modelo, simulando eficientemente las cargas hidráulicas dentro del área de estudio por medio de la variación de las entradas por flujo subterráneo para los tres periodos de estrés. Este proceso se llevó a cabo comparando los valores observados para los tres periodos de calibración con los valores simulados en el modelo. Una vez que se consideró aceptable la calibración, se comprobó la eficiencia del modelo obteniendo el valor de la raíz del error cuadrático medio. Se tiene un valor de 6.67 considerando un total de 91 pozos de observación (Figura 30).

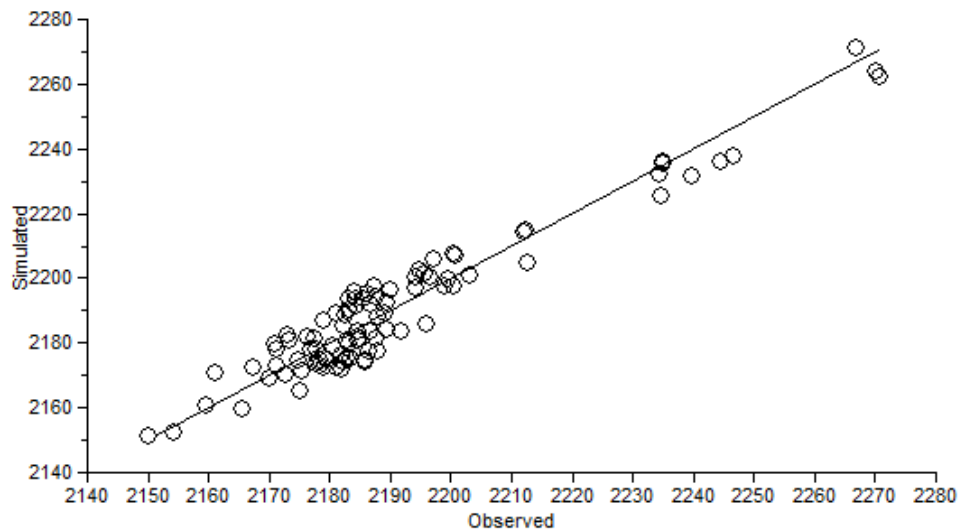


Figura 30 Gráfica "Valor observado vs Valor simulado" de 92 pozos de observación para los años 2010, 2014 y 2018.

La calibración se considera aceptable si al comparar en forma puntual los valores de las cargas en los pozos de observación con las obtenidas por el modelo se obtienen valores de elevación del nivel estático semejantes con un error total menor al 10%. Para este modelo, se obtuvo un porcentaje de error por medio de la siguiente ecuación donde se divide raíz del error cuadrático medio (RMSR) por sus siglas en inglés, entre la diferencia del valor máximo y el valor mínimo observado.

$$NRMSR = RMSR / (X_{obs})_{max} - (X_{obs})_{min}$$

Donde:

NRMSR = Raíz del error cuadrático medio normalizado

RMSR = Raíz del error cuadrático medio

$(X_{obs})_{max}$ = Valor máximo de carga hidráulica observada

$(X_{obs})_{min}$ = Valor mínimo de carga hidráulica observada

Considerando el valor de RMSR obtenido por el modelo, el cual es igual a 6.67 y tomando en cuenta los valores máximo y mínimo para los pozos de observación obtenidos de OCAVM y SACMEX (2018) de $(X_{obs})_{max} = 2270.34$ y $(X_{obs})_{min} = 2149.78$ respectivamente. Se obtiene un valor de $NRMSR = 5.53\%$, esto refleja que la calibración del estado transitorio es confiable, pues el modelo tiene un error menor al 6 por ciento.

La diferencia máxima de los valores observados contra los simulados en la muestra es de 11.95 m y la mínima de 0.063 m. La desviación estándar para los residuales es de 3.36 m

y la media de 5.78 m, comparando la configuración del nivel estático realizada en el apartado 7.5.1 (Figura 17) con la configuración obtenida con el modelo (Figura 31) y considerando el error obtenido, se puede concluir que la calibración del modelo es aceptable.

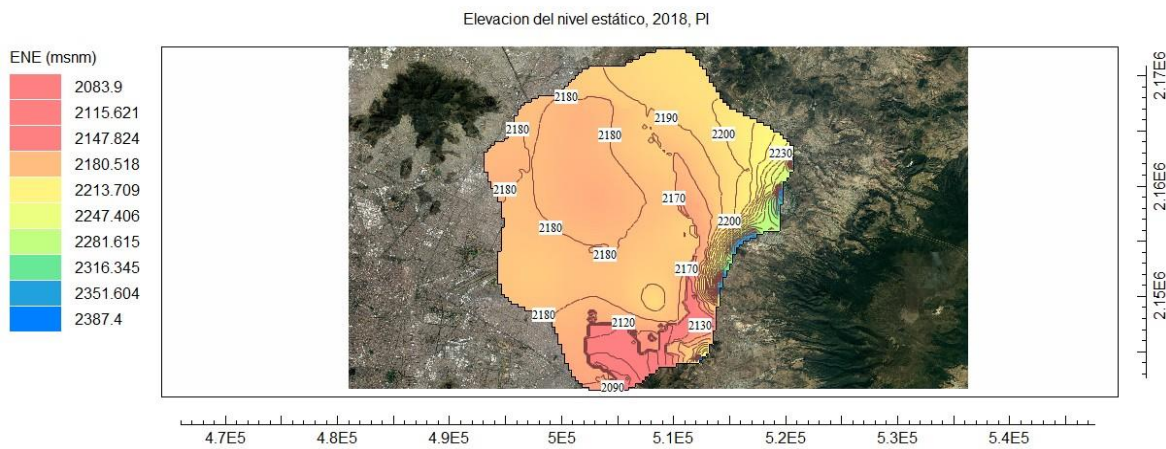


Figura 31 Elevación del nivel estático, año 2018

8.8.1 Resultado del balance de masas obtenido con el modelo calibrado.

Los resultados obtenidos en el balance de aguas subterráneas para el año 2018 se presentan a continuación (Tabla 14):

Tabla 14 Balance de aguas subterráneas 2018

Entradas hm³/año (2018)			
Almacenamiento	68.34	Entradas totales	88.188
Recarga	16.523		
Horizontales	71.665		
Total	156.528		
Salidas hm³/año (2018)			
Almacenamiento	14.069	Salidas totales	136.66
Bombeo	136.66		
Total	150.729		
Entradas – Salidas		Minado	-48.472

Se puede observar una variación en los componentes del balance para modelo calibrado con respecto al balance para el modelo hidrogeológico conceptual, especialmente en la recarga por flujo subterráneo horizontal y en las salidas por Bombeo, esto se debe a que las entradas por flujo subterráneo horizontal fueron el parámetro que se utilizó para la calibración del modelo y debido a que los valores de conductancia para esta componente no pueden ser obtenidos en campo, se calibraron por medio del método manual de prueba y error, variando el valor de conductancia para cada celda de entrada en los diferentes periodos de estrés y analizando el comportamiento de las cargas con respecto a estas variaciones. Con respecto a las salidas por bombeo, se considera que pueden existir errores en las bases de datos del REPDA, con respecto a la profundidad de pozo o una disminución en el volumen extraído debido a la desecación de pozos por abatimientos en el nivel estático.

8.8.1 *Análisis de sensibilidad*

Una vez calibrado el modelo, coincidiendo sensiblemente las cargas observadas con las cargas simuladas, se realiza como complemento, un análisis para conocer los parámetros con más influencia en la simulación del comportamiento del acuífero, se probó la variación de dos parámetros, la recarga por flujo subterráneo horizontal y la conductividad hidráulica horizontal de las unidades a través de un análisis de sensibilidad.

El análisis se lleva a cabo haciendo variar un parámetro a la vez, en porcentajes de -10% y +10% (Figura 32) corriendo el modelo.

Por medio de la elaboración de gráficas (Figuras 33, 34, 35 y 36), donde se muestran los valores de las simulaciones y los valores obtenidos posteriores a la calibración, se pudo observar la respuesta de la elevación del nivel estático a los cambios en la conductividad hidráulica de las unidades y a los cambios en las entradas por flujo subterráneo horizontal.

Las cargas hidráulicas calibradas tuvieron una respuesta mayor a la disminución de las entradas por flujo subterráneo horizontal y la conductividad hidráulica, teniendo la mayor variación en el RMSR de 2.09% al disminuir las entradas por flujo subterráneo en un 10%.

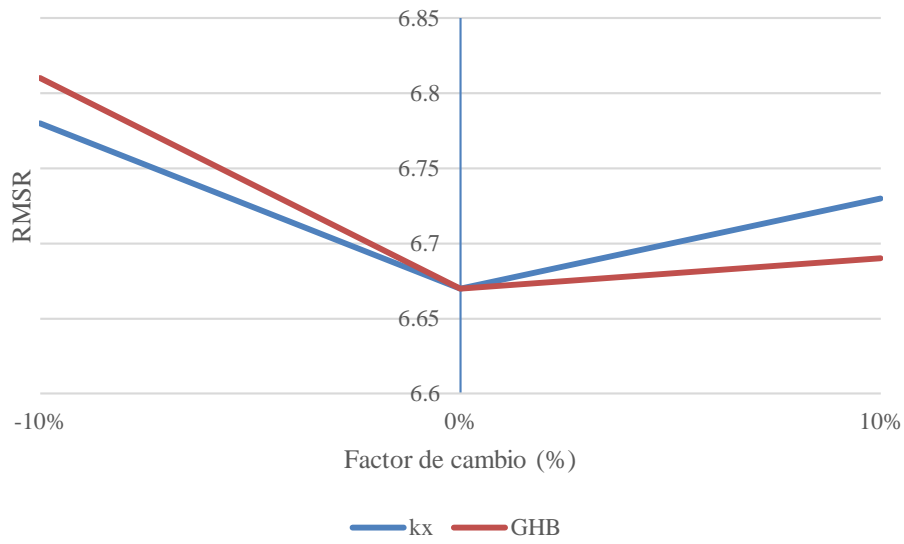


Figura 32 Cambios en la Raíz del error cuadrático medio conforme a una variación de los parámetros GHB y k_x

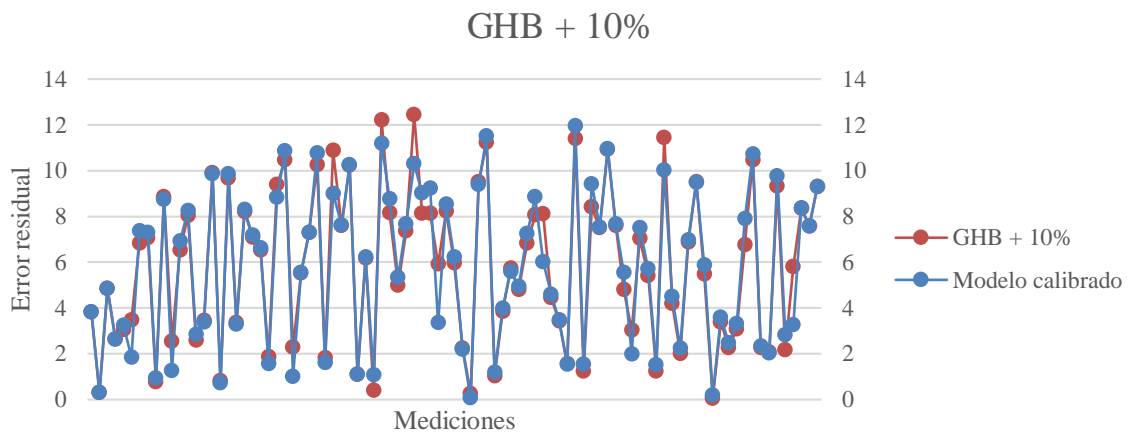


Figura 33 Gráfica de análisis de sensibilidad. Se muestran los valores del modelo calibrado y del modelo con un aumento del 10% en las entradas por flujo subterráneo horizontal.

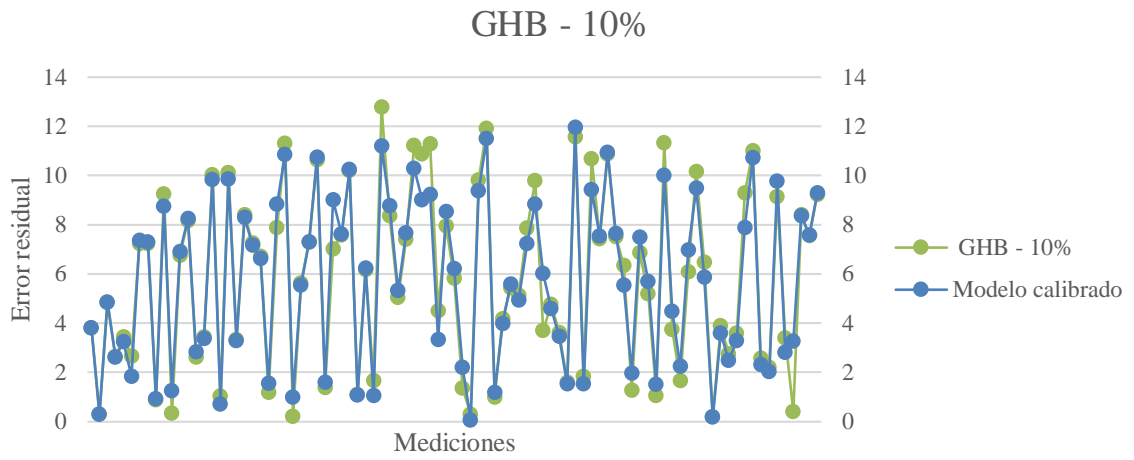


Figura 34 Gráfica de análisis de sensibilidad. Se muestran los valores del modelo calibrado y del modelo con una disminución del 10% en las entradas por flujo subterráneo horizontal.

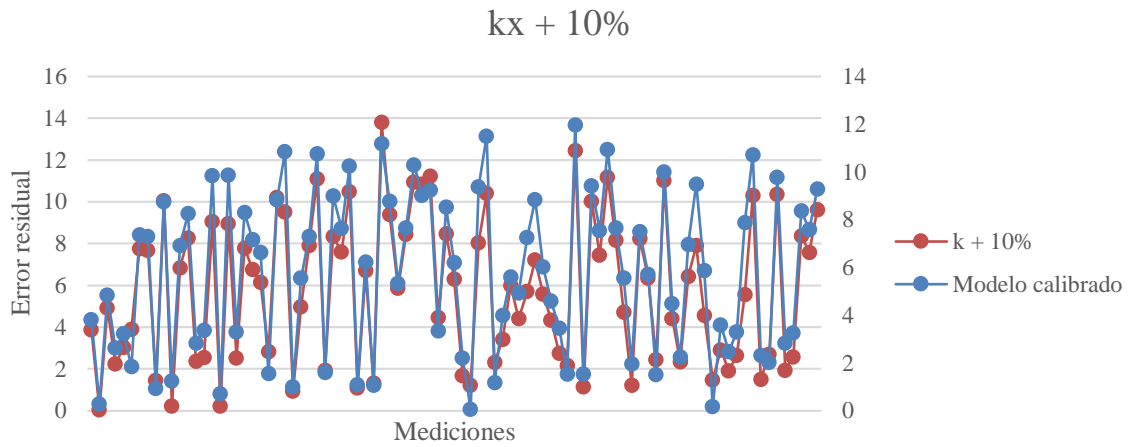


Figura 35 Gráfica de análisis de sensibilidad. Se muestran los valores del modelo calibrado y del modelo con un aumento del 10% en la conductividad hidráulica

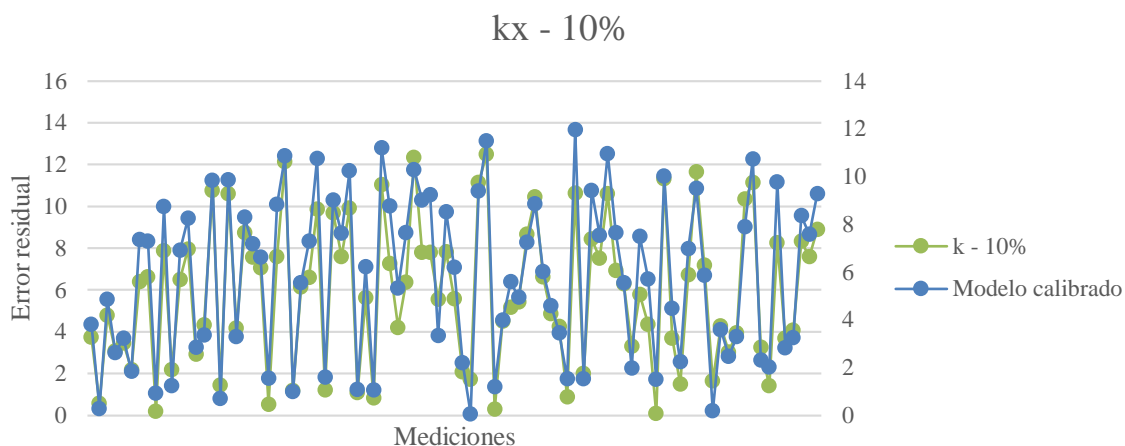


Figura 36 Gráfica de análisis de sensibilidad. Se muestran los valores del modelo calibrado y del modelo con una disminución del 10% en la conductividad hidráulica

9. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS Y PROGRAMAS DE GESTIÓN HÍDRICA.

En este capítulo se plantean algunos criterios técnicos y regulatorios para orientar a los organismos encargados de la gestión del acuífero, como CONAGUA y OCAVM; en la formulación e implementación de un plan de manejo sustentable para lograr disminuir los abatimientos del nivel estático y la condición de sobreexplotación actual del acuífero de Texcoco, con una meta final de 12 años a futuro.

Para lograr esto, es indispensable implementar y consolidar distintas políticas que respondan a los conceptos de seguridad y soberanía nacional del agua, en el entendido de que este recurso es el eje de la vida económica y social de la región (II-UNAM, 2018). Se requiere establecer programas de gestión basados en el modelo matemático de flujo para ejecutar acciones de fortalecimiento institucional, de adecuación jurídica, política, social y

económica relacionadas con el consumo de agua para el sector agrícola y finalmente, acciones que permitan la implementación de proyectos de recarga artificial dentro del área del acuífero.

Se han definido escenarios para ser evaluados conjuntamente bajo la implementación de diversos programas. Los programas se definen como el grupo de acciones y elementos que, implementados, colaboran a la disminución de abatimientos y a mitigar las condiciones de sobreexplotación.

Para el desarrollo de este capítulo se definen los siguientes conceptos:

a) Escenario:

Se define como escenario a las condiciones en las que se desarrolla una acción o suceso, en materia de gestión hídrica, las condiciones dependen de 5 factores principales dentro del área de estudio; la población, economía, gobernabilidad, tecnología y medio ambiente (II-UNAM, 2018).

b) Programas:

Los programas se definen como el grupo de acciones y elementos que, implementados, colaboran a la disminución de abatimientos y hundimientos. (II-UNAM, 2018)

c) Sobreexplotación:

La sobreexplotación de un acuífero se produce cuando las descargas o salidas del acuífero superan a las entradas, lo cual implica el consumo progresivo de agua que se encontraba dentro del almacenamiento del acuífero.

d) Sustentabilidad:

La sustentabilidad es la situación de desarrollo que permite satisfacer las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

e) Programa de adecuación de derechos del uso del Agua

Programa en el cual se otorga un apoyo económico a los usuarios que decidan renunciar voluntariamente a su derecho de agua, tendiente a equilibrar la oferta sustentable de las fuentes de abastecimiento de agua con los volúmenes de agua concesionados a las asociaciones civiles de usuarios de los distritos de riego (CONAGUA, 2014).

9.1. Escenarios

Para la estimación de la demanda futura de agua y la factibilidad para implementar programas de gestión, deben generarse escenarios en los que se considere la variación de la población, las perspectivas socioeconómicas de la zona, las posibles mejoras tecnológicas para el acceso al agua, entre otros aspectos (II-UNAM, 2018).

Como parte de esta investigación se consideran únicamente dos escenarios. El primero, llamado “Escenario tendencial” está basado en la historia y considera un desarrollo en materia de gestión hídrica igual al que se ha observado a través de los años. El segundo, llamado “Escenario sustentable” toma en cuenta una situación propicia para la implementación de programas de gestión y, además, una conciencia ambiental amplia.

A continuación, se realiza una breve descripción de cada una de las componentes para los dos escenarios mencionados:

- Escenario tendencial:

Este escenario considera, basado en la historia, un desarrollo relativamente lento en materia de gestión de los recursos del acuífero. En este escenario se toma en cuenta que habrá un incremento poblacional con una tasa de crecimiento demográfico del 1.32% anual para el Estado de México (INEGI, 2015) y con respecto al crecimiento económico, se consideran presupuestos fiscales anuales insuficientes para la implementación de políticas públicas, así como una escasa coordinación y monitoreo de los recursos hídricos. No se implementarán nuevos sistemas tecnológicos para el manejo de los recursos hídricos y tampoco se considera un cambio en la cultura y normatividad con respecto al medio ambiente y a la protección de las zonas de recarga.

- i. Escenario sustentable:

En este caso se adopta un enfoque tecnológico que ayude a alcanzar la sustentabilidad del acuífero, considerando un crecimiento poblacional moderado con respecto a la tasa actual para el Estado de México. Además, económicamente se considera que los presupuestos fiscales serán suficientes y que estarán bien distribuidos. Gracias a esto y vinculando a la industria, al gobierno y a la academia, aumentará la factibilidad de realizar inversiones en obras hidráulicas, técnicas de uso eficiente del agua, reúso del agua, monitoreo de acuíferos y continuidad de los modelos de flujo. Estas acciones permitirán hacer más eficiente el uso y gestión del agua tanto superficial como subterránea.

Finalmente, se considera que existirá una mayor conciencia ambiental y una efectiva aplicación de un ordenamiento territorial.

9.2. Programas de gestión hídrica

La implementación de programas eficientes para la gestión del agua subterránea del acuífero de Texcoco es imperativa para el desarrollo sustentable de la región, estos programas necesitarán responder a los conceptos de prioridad, seguridad y soberanía del agua, debido a que este recurso es el eje de la vida económica y social de la región. En este estudio se plantean dos programas basados en estos conceptos.

Para generar un contraste en la valoración de los programas de gestión, se propone la evaluación de un programa basado en la historia del acuífero llamado “Programa inercial” donde se implementan acciones que responden a los conceptos mencionados anteriormente, pero se consideran mínimas o ineficientes en relación a la capacidad de estas para alcanzar los objetivos deseados.

El segundo programa, llamado “Programa de rescate” implementa acciones basadas en ciencia, tecnología y cultura que se consideran necesarias y urgentes para el rescate del acuífero de Texcoco. Estas se dividen en tres ejes principales: a) Fortalecimiento institucional, b) adecuación jurídica, política, social y económica relacionadas con el consumo de agua para el sector agrícola y c) la implementación de proyectos de recarga artificial con agua residual tratada dentro del área del acuífero. Estos ejes, entre otros, fueron desarrollados como parte del Plan de Gestión y Recarga del Acuífero del Valle de

México realizado por II-UNAM (2018) y adaptados para la elaboración de este programa de gestión.

A continuación, se presenta una descripción detallada de los programas de gestión propuestos en esta investigación:

9.2.1. Programa inercial

Simula la tendencia actual donde las acciones implementadas para la mejora de las condiciones del acuífero por las autoridades son escasas, por lo que los regímenes de bombeo se mantienen constantes. Se considera que los regímenes publicados por el REPDA para el año 2018 permanecen iguales durante un periodo de 12 años. No se considera un aumento en la extracción por bombeo debido a que, de acuerdo con el Diario Oficial de la Federación (2019); en el acuífero de Texcoco (1507), se encuentran vigentes los siguientes instrumentos jurídicos:

- "DECRETO que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida por Cuenca o Valle de México", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de agosto de 1954, cuyas disposiciones aplican en un área del acuífero Texcoco, clave 1507.
- "DECRETO por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos del Estado de México, que no quedaron incluidos en las vedas impuestas mediante Decretos Presidenciales de 7 de diciembre de 1949, 21 de julio de 1954, 10 de agosto de 1965 y 14 de abril de 1975 y Acuerdo Presidencial de 11 de julio de 1970", publicado en el

Diario Oficial de la Federación el 10 de julio de 1978, cuyas disposiciones aplican en un área del acuífero de Texcoco, con clave 1507.

9.2.2. Programa de rescate

En este programa se llevan a cabo una serie de acciones planteadas con el objetivo de mitigar las condiciones de sobreexplotación del acuífero y contribuir a un mejor manejo de los recursos hídricos. Estas acciones fueron planteadas con base en las condiciones actuales del acuífero, con el objetivo de alcanzar la sustentabilidad para este a través de un proceso que conlleve las menores repercusiones para la sociedad y el medio ambiente, se tomó como apoyo la información referente a programas de gestión publicada en el estudio del II-UNAM, 2018 donde se plantean diversos programas y estrategias para alcanzar la sustentabilidad de los acuíferos que forman parte del Valle de México. Para este estudio, únicamente se consideraron 3 programas, los cuales se dividen en 3 ejes principales: El fortalecimiento institucional dentro de los organismos reguladores del acuífero, la cancelación del uso de agua para el sector agrícola y la implementación de 2 proyectos de recarga artificial con agua residual tratada, estos se describen a continuación:

- i. **Fortalecimiento institucional dentro de los organismos que gestionan los recursos hídricos del acuífero (CONAGUA Y OCAVM), se plantea:**
 - Establecer el Comité Nacional de Gestión y Recarga de Acuíferos con objeto de:
 - Emitir lineamientos para la formulación de planes de gestión y recarga de acuíferos

- Establecer prioridades e implementar el seguimiento del “Programa de rescate”.
- Crear un programa presupuestario específico con la SHCP para asignar recursos al estudio de los acuíferos.
- Asignar un porcentaje de la recaudación por extracción de aguas subterráneas del Valle de México para financiar el plan.
- Concretar convenio de gestión y recarga con gobiernos estatales, CDMX, dependencias federales y organizaciones de usuarios para el rescate del acuífero de Texcoco.
- Implementar los programas y acciones asociadas al “Programa de rescate” y en particular, concretar la reglamentación de los acuíferos poniendo límites estrictos para la extracción en el tiempo, así como ejecutar los proyectos piloto de recarga artificial Recarga Artificial Texcoco-1 y Recarga Artificial Texcoco-2
- Realizar los estudios a nivel anteproyecto de los sitios potenciales para los proyectos mencionados anteriormente (pruebas piloto).
- Actualizar el REPDA.

ii. Adecuaciones jurídicas, políticas, sociales y económica relacionadas con el consumo de agua.

- Implementar una reforma legal otorgando concesión para parte del volumen recargado como libre del pago de derechos.

- Cancelación del uso de agua subterránea para el sector agrícola con posible aplicación del “Programa de Adecuación de Derechos del Uso del Agua” (CONAGUA, 2014b).
- Revisión de la NOM-014-CONAGUA-2003 para adecuar los requisitos de calidad del agua de recarga de acuerdo a las condiciones específicas del lugar en el que se infiltrará.
- Revisión de la NOM-014-CONAGUA-2003 para establecer el uso de pruebas piloto de recarga in-situ como parte de los estudios de anteproyecto.
- Eliminar la tarifa 9 para el acuífero de Texcoco.
- Crear una nueva norma oficial que haga obligatorio el uso de modelos matemáticos de flujo para cada acuífero y su seguimiento con el tiempo.

iii. Implementación de dos proyectos de recarga artificial con agua residual tratada dentro de la zona de estudio.

- Recarga Artificial Texcoco-1

El primer proyecto consiste en la construcción de dos baterías de pozos de infiltración en las cercanías del Lago Nabor Carrillo (Figura 37). El agua necesaria para abastecer los pozos provendría de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Contracorriente y la PTAR Lodos Activados (ambas actualmente en proceso de rehabilitación) (II-UNAM, 2018).

Estas instalaciones cuentan con agua residual tratada de alta calidad (NOM-003-ECOL-1997) disponible para la infiltración con gastos de 0.5 m³/s (PTAR Contracorriente) y 1 m³/s (PTAR Lodos Activados) (II-UNAM, 2018).

Se propone inyectar este volumen de agua mediante recarga activa a lo largo de dos baterías de 16 y 30 pozos de infiltración para las PTAR Contracorriente y Lodos activados respectivamente, cada pozo tendrá una separación de 250 m. El gasto de infiltración para cada pozo se considera del orden de los 27 litros por segundo. Este valor fue calculado por Piñón-Martínez, 1989 a través de la Comisión del Lago de Texcoco, quienes elaboraron e implementaron tres proyectos experimentales para pozos de infiltración con agua residual tratada en las cercanías del Lago Nabor Carrillo a profundidades de entre 160 y 200 metros y ranurados a partir de los 70 m. Para este proyecto se infiltrará agua a profundidades de 150 m.

- Recarga Artificial Texcoco-2

El segundo proyecto de recarga artificial propone una batería de 50 pozos de infiltración dentro de la zona federal de “El Caracol” (Figura 37). Los pozos serán abastecidos con agua residual tratada en la PTAR El Caracol, la cual de acuerdo con II-UNAM (2018), formaría parte del Programa de recarga directa de acuíferos del Valle de México con agua residual tratada de CONAGUA, destinando a la recarga un volumen de 1 m³/s.

Se considera un gasto de infiltración de 20 litros por segundo y una profundidad de pozo de 250 m con ranurado desde los 200 m, tomando en cuenta los valores obtenidos en el estudio realizado por CONAGUA (2012).

Ambos proyectos de recarga seguirán la reglamentación establecida en las normas oficiales NOM-014-CONAGUA-2003, NOM-013-CONAGUA-2000, y NOM-127-SSA1-1994.

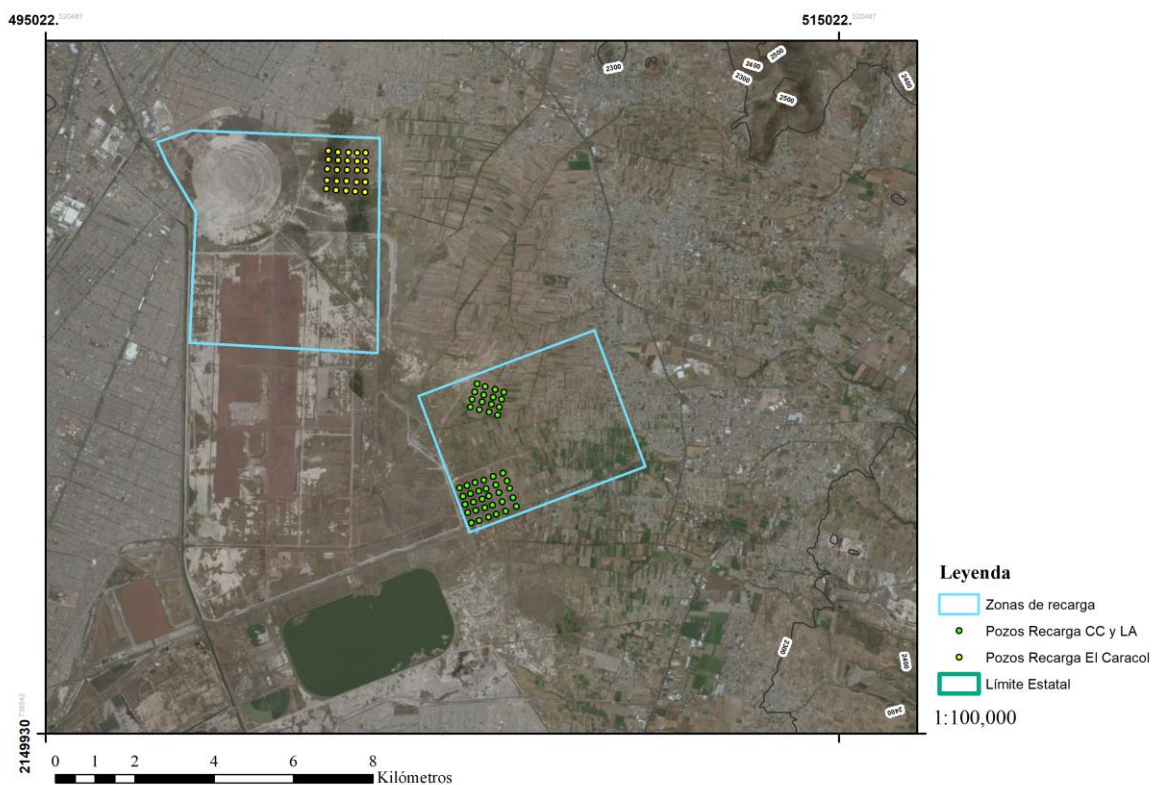


Figura 37 Ubicación de los pozos propuestos para la implementación de los proyectos de recarga artificial.

10. RESULTADOS DEL MODELO Y EVALUACIÓN DE PROGRAMAS DE GESTIÓN.

Se presenta en este capítulo la evaluación de los programas de gestión para el acuífero de Texcoco, cada programa es evaluado bajo un escenario distinto. Estos programas

evalúan la necesidad de implementar cambios en las políticas y ejecución de acciones para lograr alcanzar la sustentabilidad del acuífero y disminuir los abatimientos del nivel estático (Tabla 16).

La forma de evaluación de los programas de gestión, es mediante el uso del modelo matemático de flujo, el cual, al realizar las corridas con los datos de la entradas y salidas de agua, simula el comportamiento del acuífero en relación a la elevación del nivel estático y al balance de agua subterránea.

El “Programa de rescate se evalúa bajo el Escenario Sustentable mientras que el “Programa inercial” se evalúa de acuerdo al Escenario tendencial (Tabla 15).

La evaluación se realiza considerando que los programas se implementan a partir del año 2018 esperando alcanzar la meta establecida de disminuir los abatimientos del nivel estático en un periodo 12 años, tratando de igualar las extracciones en el acuífero a la recarga natural y artificial.

Tabla 15 Evaluación de Escenarios y Programas de gestión 1

		Escenarios	
		Sustentable	Tendencial
Programas	Rescate	X	
	Inercial		X

Tabla 16 Evaluación de Escenarios y Programas de gestión 2

Escenario	Programa	Acciones
Sustentable	Rescate	<ul style="list-style-type: none"> • Fortalecimiento institucional dentro de los organismos que gestionan los recursos hídricos del acuífero (CONAGUA Y OCAVM) • Adecuaciones jurídicas, políticas, sociales y económica relacionadas con el consumo de agua. • Implementación de dos proyectos de recarga artificial con agua residual tratada dentro de la zona de estudio
Tendencial	Inercial	<ul style="list-style-type: none"> • Decretos de VEDA publicados en los años 1949, 1954, 1965, 1970, 1975 y 1978. • Régimen de extracción conforme al REPDA 2018.

Los resultados de la aplicación de los programas de gestión se presentan de manera cuantitativa a través de un conjunto de 4 mapas de elevación del nivel estático (Figura 38), 4 mapas de abatimiento del nivel estático con respecto al nivel inicial (2006) (Figura 39) y 4 hidrógrafos digitales (Figuras 40 y 41) los cuales fueron obtenidos a través de archivos generados por el modelo matemático de flujo para el periodo 2018-2030 (mapas) y 2006-2030 (hidrógrafos).

PROGRAMA INERCIAL

PROGRAMA DE RESCATE

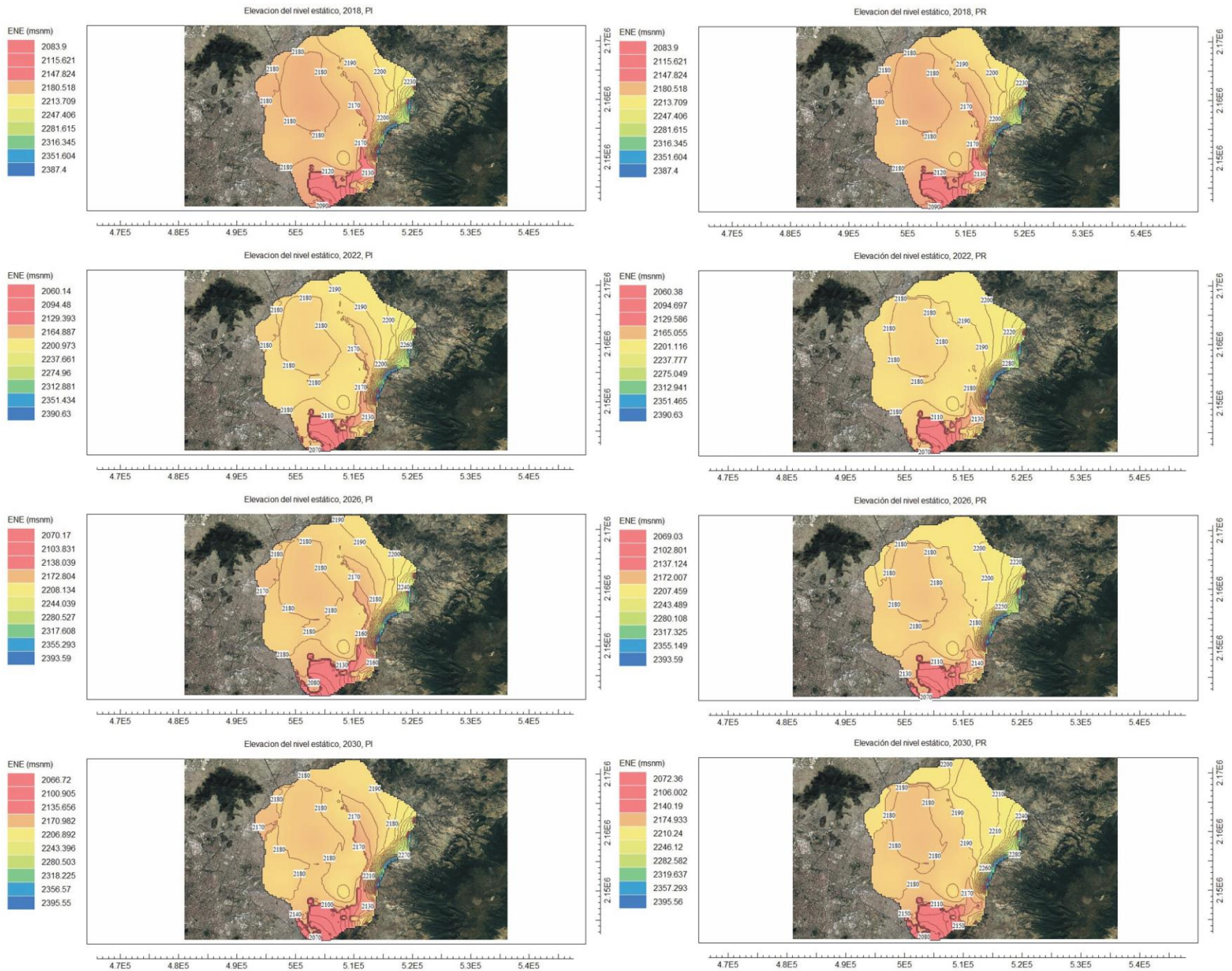
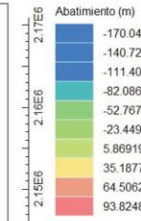
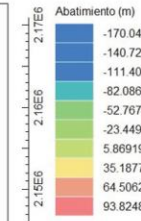
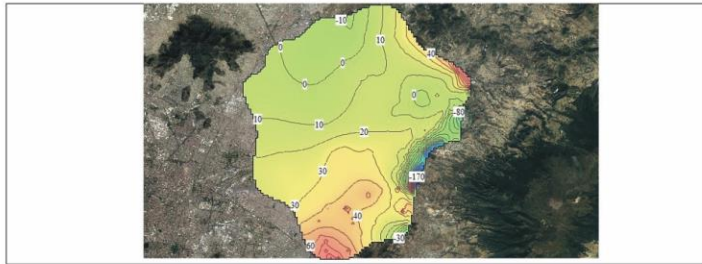
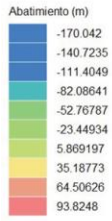


Figura 38 Elevación del nivel estático para los programas Inercial y de Rescate en los años 2018, 2022, 2026 y 2030

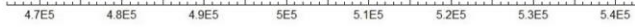
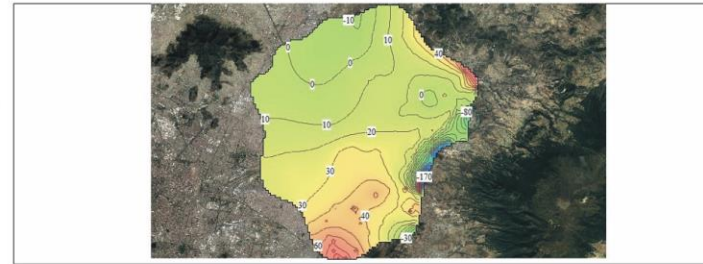
PROGRAMA INERCIAL

Abatimientos, 2018, capa 2, PI

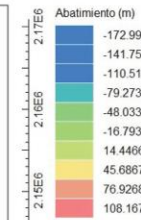
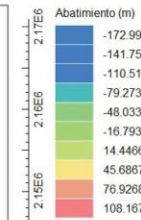
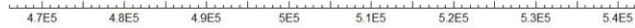
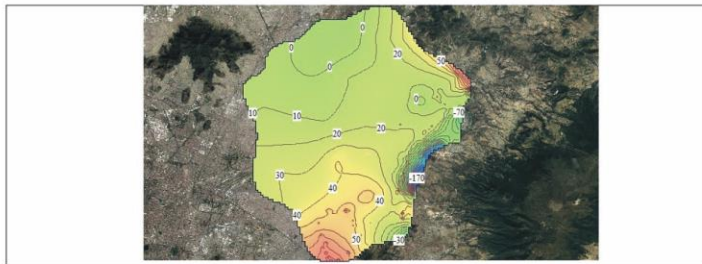
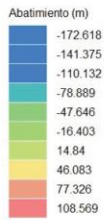


PROGRAMA DE RESCATE

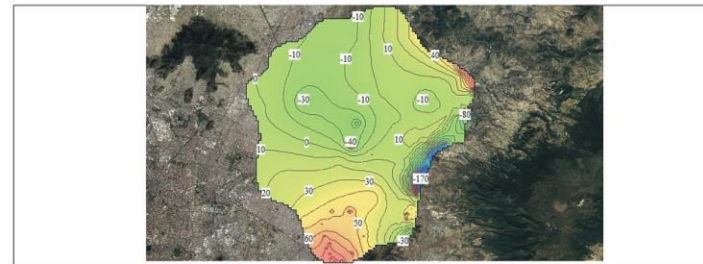
Abatimientos, 2018, capa 2, PR



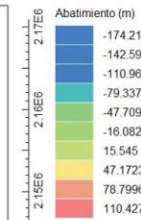
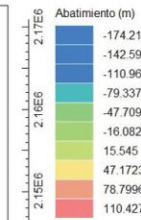
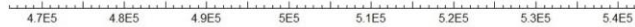
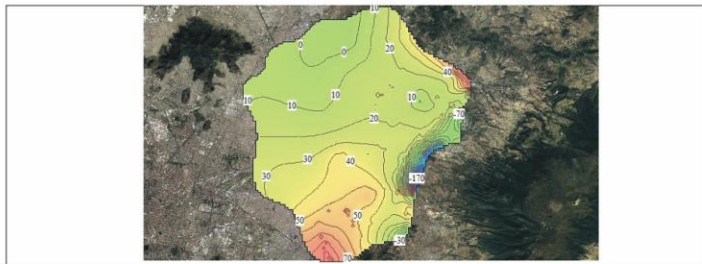
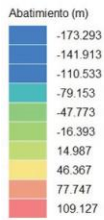
Abatimientos, 2022, capa 2, PI



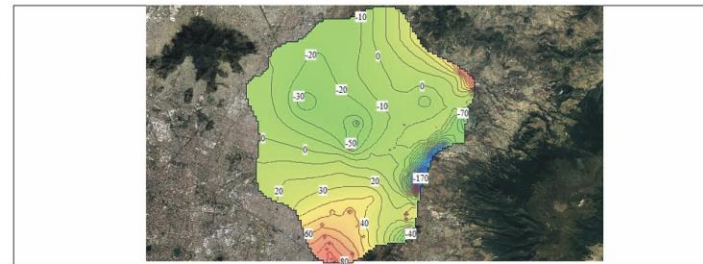
Abatimientos, 2022, capa 2, PR



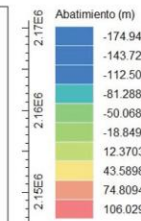
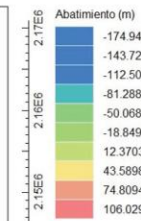
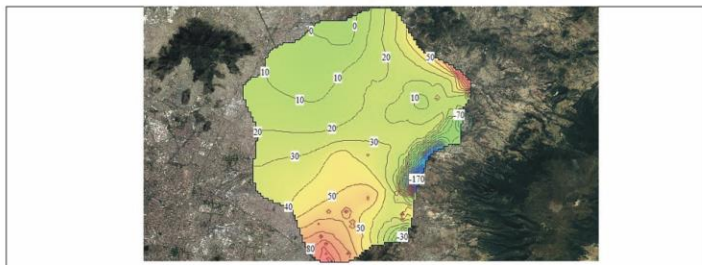
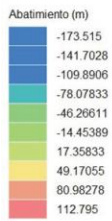
Abatimientos, 2026, capa 2, PI



Abatimientos, 2026, capa 2, PR



Abatimientos, 2030, capa 2, PI



Abatimientos, 2030, capa 2, PR

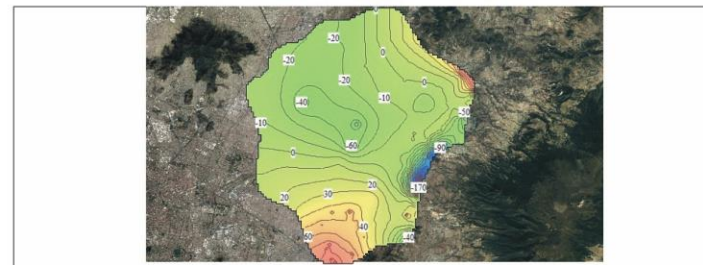


Figura 39 Abatimientos del nivel estático para los programas Inercial y de Rescate en los años 2018, 2022, 2026 y 2030

Para el año 2018, las condiciones iniciales muestran una recuperación de los niveles del orden de los 10 m en la zona norte del acuífero, condición que cambia en dirección hacia el sur hasta llegar a tener abatimientos de 60 metros en el límite del área del modelo y 40 m en la zona Este. Los mapas obtenidos en el modelo demuestran que los abatimientos mayores en el acuífero de la Texcoco, se presentan en la zona sur, que colinda con el acuífero de la Zona Metropolitana del Valle de México Ciudad de México y en la parte central del Ex-Lago de Texcoco.

El primer programa que se evalúa corresponde al “Programa inercial”, el cual se implementa bajo el “Escenario tendencial”. Las acciones llevadas a cabo establecen que los regímenes de bombeo se mantienen constantes, sin disminuciones ni aumentos. (debido al incremento poblacional).

De las configuraciones obtenidas como resultado de la implementación de este programa con respecto a la elevación del nivel estático y tomando la curva de elevación 2190 ms.n.m. como referencia, se observa que la curva pasa de encontrarse en la parte centro-oriental del área de estudio para el año 2018 a encontrarse en la zona oriental, cerca del límite del modelo para el año 2030. Esto indica un “desarrollo” del cono de abatimiento principal, el cual se expande debido al bombeo excesivo y seguirá una tendencia de aproximadamente 1.2 m de abatimiento en promedio anual para el periodo 2018-2030.

El segundo programa evaluado es el “Programa de rescate”, bajo el “Escenario sustentable”. Se considera que, bajo este escenario, se logra llevar a cabo eficientemente una cancelación del uso de agua subterránea para el sector agrícola la cual genera de

manera directa un ahorro de 54.334 Mm³ por año para el almacenamiento del acuífero. Se lleva a cabo la construcción de dos proyectos piloto de recarga artificial que contribuyen a la recarga del acuífero con un total de 39.167 Mm³/año (Recarga Artificial Texcoco-1) y 31.536 Mm³/año (Recarga Artificial Texcoco-2).

En la simulación de este programa se observa que para el año 2030, en el límite sur del área de estudio, se tiene una elevación del nivel estático de 2080 ms.n.m., que comparada con el mapa del “Programa inercial” donde para el mismo año en el mismo límite se observa una elevación de 2070 ms.n.m. Esto quiere decir que el “Programa inercial” tiene una elevación del nivel estático 10 metros por debajo de la que se tendría aplicando el “Programa de rescate” para la misma zona en el año 2030.

Además, se observa en los mapas de abatimientos para el “Programa de rescate” la presencia de un cono invertido con valores de hasta 4 m de recuperación anual del nivel estático en la zona central del Ex-Lago. También se observa un cambio en la distribución de los abatimientos, pasando a tener valores positivos que indican una recuperación del nivel para la mayoría del área del modelo.

Para observar el comportamiento del acuífero en zonas específicas, se hace uso de un software llamado “GW Chart” desarrollado por el USGS con el cual es posible observar el comportamiento de cada celda dentro del modelo a través del tiempo que dura la simulación.

Se crearon 4 hidrógrafos (Figura 41) dentro del área del modelo en 4 celdas específicas para la capa 2, subcapa 1. El primer hidrógrafo se encuentra en el centro del altiplano, en

una posición cercana a los proyectos pilotos para la recarga artificial, el segundo hidrógrafo se ubica en la parte norte del área del modelo, cercano a la zona de recarga principal del acuífero. El tercer hidrógrafo se ubica en la zona sur, donde se tienen los mayores abatimientos del nivel estático para el acuífero en explotación debido al alto volumen de extracción por bombeo. El cuarto hidrógrafo se localiza en la parte Nor-occidental del área del modelo, en las cercanías de la zona federal de “El Caracol”. Se muestra a continuación un mapa (Figura 40) con la ubicación puntual para estos hidrógrafos.

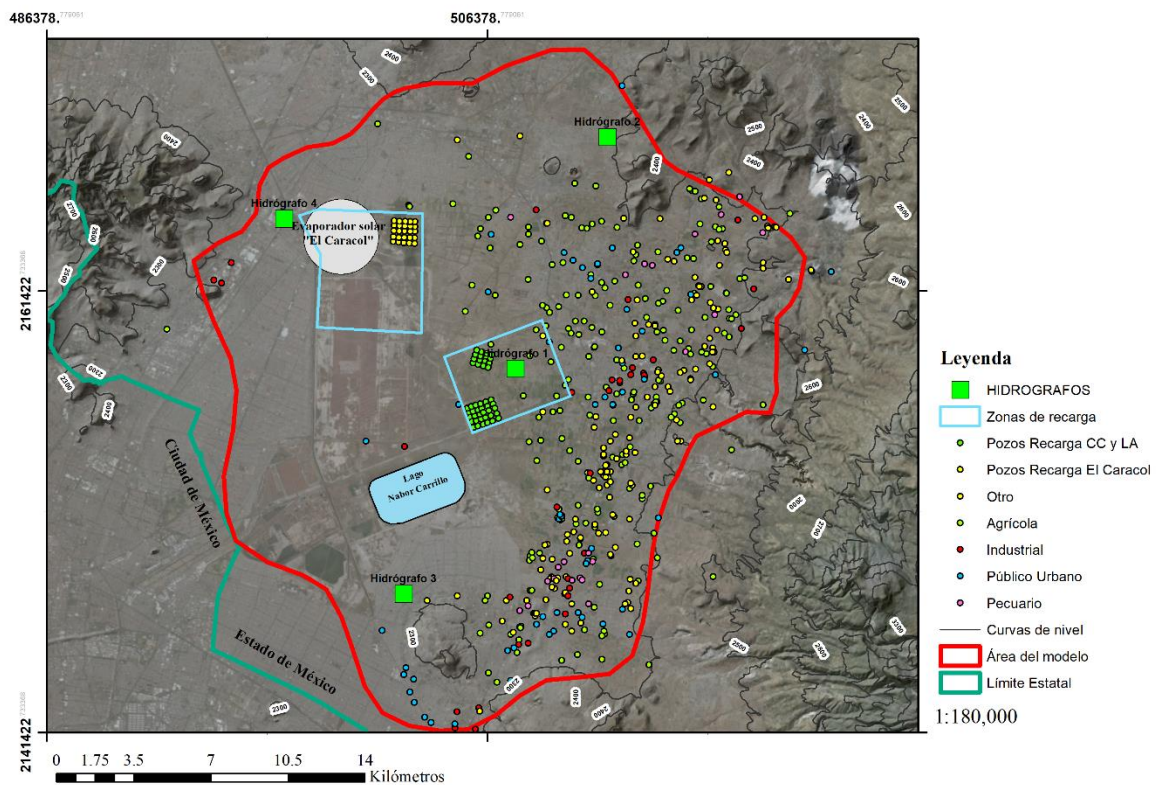
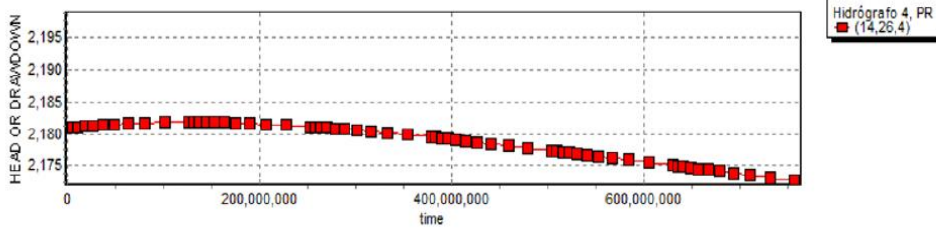
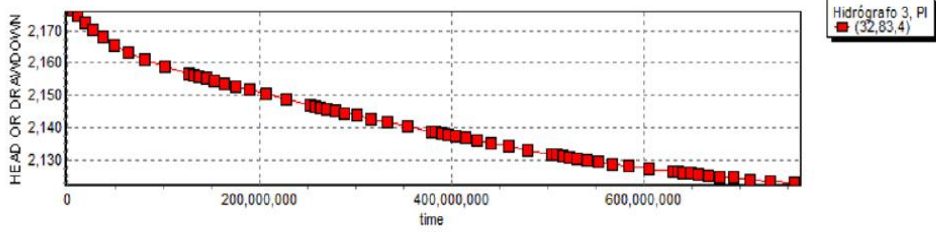
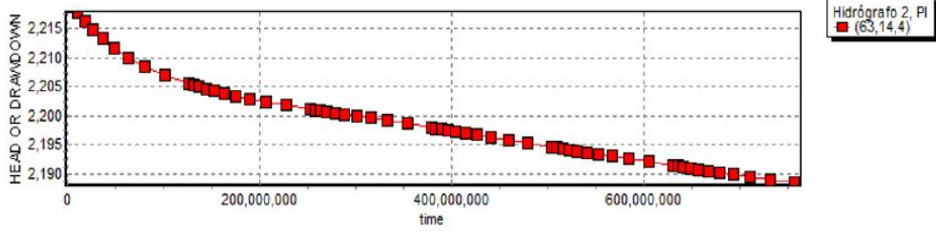
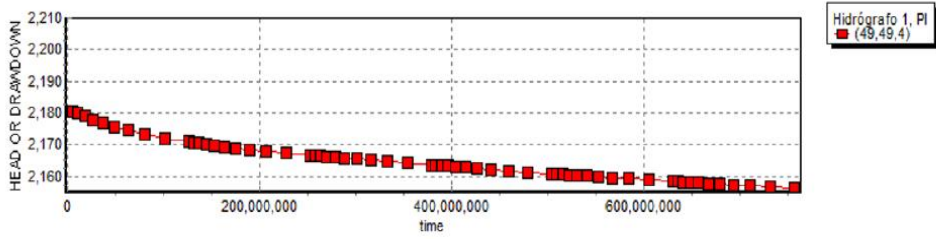


Figura 40 Hidrógrafos de modelo

PROGRAMA INERCIAL



PROGRAMA DE RESCATE

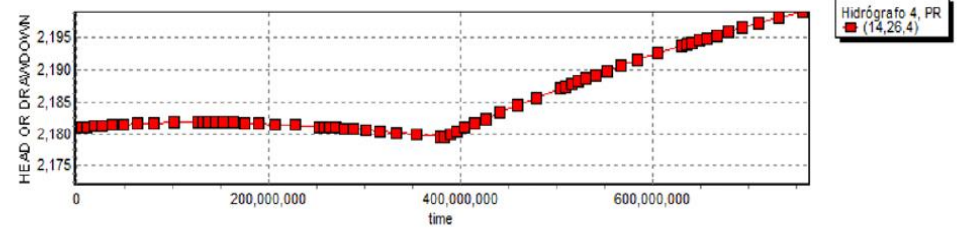
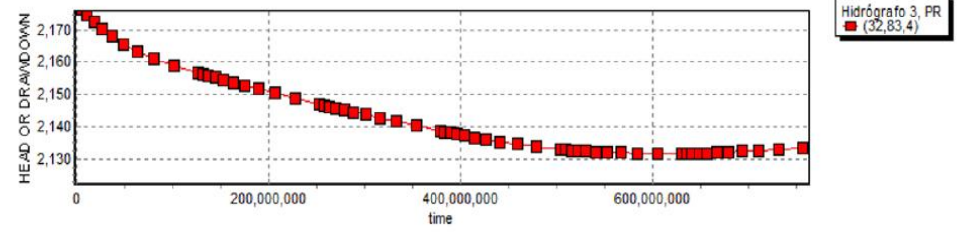
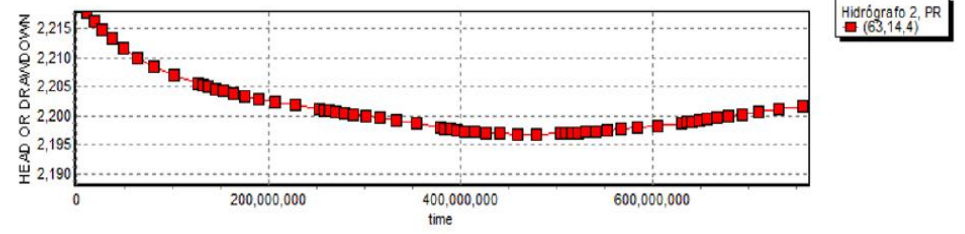
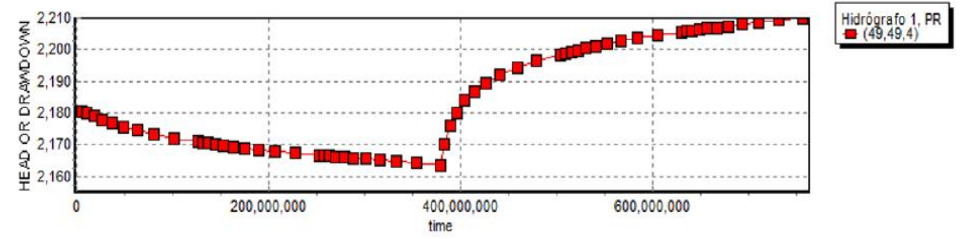


Figura 41 Hidrógrafos del modelo para los programas Inercial y de Rescate en los años 2018, 2022, 2026 y 2030

Se observa que, bajo el “Programa inercial”, los hidrógrafos muestran un comportamiento similar para las diferentes zonas dentro del acuífero, en donde se detecta un abatimiento constante para el nivel estático del acuífero a través del periodo de tiempo 2006-2030.

Con respecto al “Programa de rescate”, se observa en los hidrógrafos una clara recuperación en los hidrógrafos 1 y 4 a partir del año 2018 en el cual se implementó este programa. En el hidrógrafo 1 se tuvo un aumento de un nivel inicial de 2155 ms.n.m. en el año 2006 a tener una elevación de 2210 para el año 2030, mostrando una clara recuperación, el hidrógrafo 4 muestra el mismo comportamiento pasando de un nivel inicial de 2172 ms.n.m. en el año 2006 a un nivel de 2199 para el año 2030. Los otros dos hidrógrafos demuestran un comportamiento distinto, en estos se observa un cambio en la pendiente de la curva de “abatimientos vs. tiempo”, la cual cambia a partir de la implementación del programa de rescate en el año 2018 disminuye su pendiente hasta invertirse.

Esto demuestra un cambio en las condiciones que regían al acuífero como se observa en los hidrógrafos implementados en el “Programa inercial” y comprueba un cambio de condiciones al tener valores de recuperación de los niveles para los últimos pasos de tiempo en la simulación.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1. Conclusiones

- El matemático de flujo del acuífero de Texcoco elaborado, se utilizó para simular los flujos de agua que pasan a través del acuífero y las variaciones del nivel estático para el periodo 2006-2018. El modelo consideró las propiedades hidrogeológicas de las unidades que conforman al acuífero, así como las componentes de recarga vertical y horizontal y finalmente, la extracción por bombeo a través de pozos. Este modelo fue calibrado haciendo coincidir los valores de piezometría simulados por el modelo con valores observados en pozos. Se logró obtener un error de 5.53%. Gracias a esto se considera como un modelo válido para realizar predicciones.
- Por medio del análisis de los resultados del modelo calibrado, se corroboró que las condiciones actuales del acuífero en explotación presentan flujos de tipo radial concéntrico con abatimientos significativos del orden de los 1.2 metros anuales, los cuales se atribuyen a la extracción por bombeo. Se observa la presencia de un cono de abatimiento principal en la parte central del Ex-Lago y otros conos menores en las partes sur y sur-oriental, finalmente se comprobó que las condiciones actuales están llevando al acuífero a pasar de un estado de confinamiento a una condición de semiconfinamiento.
- Se elaboraron 2 programas de gestión hídrica el “Programa inercial” y el “Programa de rescate” basados en la situación actual del acuífero, los cuales fueron evaluados

por medio del uso del modelo matemático de flujo, tomando en cuenta dos posibles escenarios para su desarrollo.

- La simulación del “Programa inercial” a través del modelo matemático de flujo permite ver una clara tendencia desfavorable en la que los abatimientos continúan aumentando a razón de 1.2 m por año para el área del acuífero.

- Si no hay una mejor gestión del agua subterránea, la infraestructura actual para la extracción y distribución del agua subterránea se verá afectada gravemente. La profundidad de pozo promedio en el acuífero de Texcoco, según el REPDA es de 120 m aproximadamente y considerando que los niveles actuales para la zona donde se ubican la mayoría de los aprovechamientos subterráneos se encuentran a una profundidad aproximada de 67 m en promedio, en un periodo no mayor a 60 años, la mayoría de estos aprovechamientos dejarían de funcionar causando enormes daños a toda la infraestructura y a la sociedad, tanto económica como socialmente.

- El “Programa de Rescate”, se simuló sobre un escenario sustentable a través del modelo matemático de flujo. En este programa se implementan acciones basadas en tres ejes principales:
 - a) **Fortalecimiento institucional dentro de los organismos que gestionan los recursos hídricos del acuífero (CONAGUA Y OCAVM)**

- b) **Adecuaciones jurídicas, políticas, sociales y económica relacionadas con el consumo de agua.**
- c) **Implementación de dos proyectos de recarga artificial con agua residual tratada dentro de la zona de estudio.**

El “Programa de rescate” genera un cambio en el comportamiento del acuífero el cual se atribuye a la disminución de las extracciones y al volumen de agua que se recarga artificialmente. El comportamiento del acuífero pasó de tener abatimientos de 1.2 m por año promedio a contar con valores de recuperación de hasta 4 m por año en algunas zonas.

- Debido a que, para el acuífero de Texcoco, el uso de agua para el sector agrícola excluyendo al agricultor de subsistencia tiene que ser re-evaluado. Se tienen que realizar cambios en la normativa y las concesiones debido a que este uso representa el 30.4% de las extracciones para el acuífero y su beneficio económico y social es mucho menor que las repercusiones que este genera el extraer agua del acuífero comparado con los tipos de usos.

11.2. Recomendaciones

- Tomar acciones inmediatas basadas en ciencia, tecnología y especialmente en el uso de modelos matemáticos de flujo para mitigar la situación de sobreexplotación del acuífero ya que, si no se actúa al respecto, se tendrán grandes repercusiones económicas y sociales para la población en un futuro.
- Es fundamental un cambio de paradigmas sobre la visión del agua subterránea como un recurso explotable ya que la situación actual en el país ha generado que se disponga de este recurso sin contemplar las consecuencias que conlleva su uso excesivo. Se necesita considerar fuentes alternas, implementar estrategias de captación de agua de lluvias y plantas de tratamiento. El agua subterránea tiene que ser vista como una reserva y no como una fuente interminable de agua.
- Normar la implementación de modelos matemáticos de flujo como el que se presenta en esta investigación, con el fin de tener un mejor entendimiento de los acuíferos del país para poder implementar de manera eficiente programas de gestión específicos para cada uno, así como la actualización anual de estos modelos y las redes de monitoreo del acuífero.
- Re-evaluar la norma oficial NOM-014-CONAGUA-2003 con el objetivo de mejorar el proceso de implementación de sistemas de recarga artificial, se recomienda incluir la realización de pruebas piloto de recarga in situ para determinar la capacidad de infiltración como parte de los anteproyectos de factibilidad.

- Re-evaluar la norma oficial NOM-014-CONAGUA-2003 de tal forma que garantice que la calidad del agua de recarga se equipare al agua nativa de cada sitio sin sobrepasar la calidad de esta agua.
- Se recomienda re-evaluar la norma oficial NOM-014-CONAGUA-2003 para determinar la ubicación de los pozos de monitoreo con base en análisis hidrogeológicos específicos para cada proyecto de recarga artificial, en lugar de tener una normativa general para este proceso.
- Realizar cambios en la normativa y las concesiones para la extracción de agua en el sector agrícola dentro del acuífero de Texcoco, implementando programas que establezcan el uso de técnicas de riego modernas y el uso de fuentes alternas de agua para el riego.
- Revisar y actualizar los límites de los acuíferos debido a que en algunos casos los límites establecidos anteriormente no coinciden con los límites actuales.

ANEXOS

Tabla 17 (CONAGUA 2006b)

Pozo Ramal- Texcoco	X (UTM)	Y (UTM)
1	503974.017322	2152748.1778
2	504734.163044	2153383.87285
3	504146.021312	2153698.04681
4	504271.141284	2153119.28898
5	504535.725147	2153780.74864
6	504389.438466	2153496.96307
7	504684.55357	2152755.48617
8	498811.732605	2152520.22778
9	498315.637863	2152321.78988
10	497846.001507	2152143.19577
12	497296.989992	2151924.91409
13	496727.054745	2151710.81326
CL13	505885.501192	2154776.1348
14	496250.838855	2151507.29243
15	505590.091839	2155120.8659
16	505391.653942	2155054.71994
17	505123.634205	2154968.0364
18	504845.821149	2154868.81746
19	504501.862128	2154723.29633
20	504276.965845	2154643.92117

Tabla 18 (Cardona y Hernandez, 1985)

Grupo	Solidos totales disueltos (mg/l)	Cloruro (mg/l)	Tipo de acuífero y litología
I	136-204	2-7	Libre en rocas volcánicas de las sierras Las Cruces y Chichinautzin
II	196-524	3.9-75.3	Libre en rocas fracturadas y material granular, abarca la zona de transición y parte de la zona lacustre.
III	224-524	11-120.4	Semiconfinado en material granular dentro de la zona lacustre
IV	476-700	75.6-153.2	Libre en rocas volcánicas y semiconfinado en material granular
V	508-3596	25.7-177	Libre preferentemente en rocas volcánicas fracturadas, en los alrededores de la Sierra de Santa Catarina

Tabla 19 (CFE, 1996)

Unidad Geofísica	Sub-unidad geofísica	Correspondencia Litológica	Resistividad eléctrica (Ohm/m)	Salinidad del agua
U1	U1A	Arenas y arcillas muy salitrosas	0.18-0.35	Agua salada a salobre
	U1B	Arenas y arcillas salitrosas	0.5-5.5	Agua salada a salobre
	U1C	Arenas y arcillas	8.5-50	Agua dulce
U2	U2A	Intercalación de arenas, limos y arcillas	4-32	Agua dulce a salobre
	U2B		40-72	Agua dulce
U3		Intercalación de calizas lacustres y margas con tobas.	5-19	¿?
U4		Rocas basálticas	3-45	Agua dulce a salobre

Tabla 20 (Domenico & Schwartz 1990)

Material / Tipo de roca	Conductividad Hidráulica (m/s)
Grava	3×10^{-4} to 3×10^{-2}
Arena gruesa	9×10^{-7} to 6×10^{-3}
Arena media	9×10^{-7} to 5×10^{-4}
Arena fina	2×10^{-7} to 2×10^{-4}
Limos	1×10^{-9} to 2×10^{-5}
Till	1×10^{-12} to 2×10^{-6}
Arcilla	1×10^{-11} to 4.7×10^{-9}
Arcilla marina inalterada	8×10^{-13} to 2×10^{-9}
Calizas de tipo karst y arrecifal	1×10^{-6} to 2×10^{-2}
Calizas marinas y dolomitas	1×10^{-9} to 6×10^{-6}
Arenisca	3×10^{-10} to 6×10^{-6}
Limolita	1×10^{-11} to 1.4×10^{-8}
Depositos de sal	1×10^{-12} to 1×10^{-10}
Anhidrita	4×10^{-13} to 2×10^{-8}
Lutita	1×10^{-13} to 2×10^{-9}
Basalto permeable	4×10^{-7} to 2×10^{-2}
Rocas ígneas o metamórficas fracturadas	8×10^{-9} to 3×10^{-4}
Granito alterado	3.3×10^{-6} to 5.2×10^{-5}
Gabbro alterado	5.5×10^{-7} to 3.8×10^{-6}
Basalto	2×10^{-11} to 4.2×10^{-7}
Rocas ígneas o metamórficas inalteradas	3×10^{-14} to 2×10^{-10}

Tabla 21 (Morris & Johnson, 1967)

Material	Rendimiento específico (Sy)	
	Rangos	Media aritmética
Arenisca fina	0.02 – 0.4	0.21
Arenisca media	0.12 – 0.41	0.27
Limolita	0.01 – 0.33	0.12
Arena fina	0.01 – 0.46	0.33
Arena media	0.16 – 0.46	0.32
Arena gruesa	0.18 – 0.43	0.30
Grava fina	0.13 – 0.40	0.28
Grava media	0.17 – 0.44	0.24
Grava gruesa	0.13 – 0.25	0.21
Limo	0.01 – 0.39	0.2
Arcilla	0.01 – 0.18	0.06
Caliza	0 – 0.36	.014
Depósito de loess	0.14 – 0.22	0.18
Arena eólica	0.32 – 0.47	0.38
Esquisto	0.22 – 0.33	0.26
Toba	0.02 – 0.47	0.21

Tabla 22 (Domenico, 1972)

Material	Almacenamiento específico (Ss) [m ⁻¹]
Arcilla plástica	$2 \times 10^{-2} - 2.6 \times 10^{-3}$
Arcilla rígida	$2.6 \times 10^{-3} - 1.3 \times 10^{-3}$
Arcilla media – dura	$1.3 \times 10^{-3} - 9.2 \times 10^{-4}$
Arena suelta	$1 \times 10^{-3} - 4.9 \times 10^{-4}$
Arena densa	$2 \times 10^{-4} - 1.3 \times 10^{-4}$
Grava arenosa densa	$1 \times 10^{-4} - 4.9 \times 10^{-5}$
Rocas fracturadas	$6.9 \times 10^{-5} - 3.3 \times 10^{-6}$
Rocas sólidas	$< 3.3 \times 10^{-6}$

Tabla 23 (CONAGUA 2012)

POZO	X (UTM)	Y (UTM)	Profundidad de la bomba [m]	Rendimiento específico (Sy)	Coeficiente de almacenamiento (S)	Conductividad Hidráulica horizontal (k) [m/d]					
						Método Analítico					Método Numérico
						Theis	Cooper-Jacob	Walton	Neuman	Rec. de Theis	Rushton
460	509375	2171423	90	0.1	0.0005	0.15	0.17	0.2	0.18	0.18	0.9
459	509509	2171685	75	0.15	0.00003	9.8	-	6.76	3.25	1.42	18
452	497057	2170416	100	0.13	0.000005	2.08	5.83	1.3	0.65	4.21	3.2
441	501927	2175636	153	0.1	0.00005	50.7	9.02	20.1	17.6	24.9	15
375	507232	2175710	148	0.12	0.0001	0.1	0.11	0.11	0.11	0.1	0.65
374	498775	2175712	90	0.1	0	59.5	-	37.4	18.4	12.4	55
345	508836	2163689	95	0.13	0.001	0.76	0.79	0.76	0.46	0.7	0.95
309	507733	2171256	90	0.1	0.000005	5.31	2.79	4.14	2.08	1.78	12.5
257	498278	2169822	100	0.15	0.000001	22.2	-	15.6	8.23	6	40
234A	492537	2173074	120	0.15	0.00005	0.20	0.61	0.11	0.05	0.73	2.45
195	496511	2166066	100	0.1	0.00005	1.49	0.7	1.5	0.71	0.71	2.3
176	499509	2167508	75	0.2	0.00005	35.4	38.4	35.4	30.1	94.6	200
162	499692	2172788	140	0.2	0.00005	41.6	-	279	135	-	485
157	506627	2166553	80	0.15	0.0006	7.91	7.36	4.01	2.03	8.24	8
106	495911	2162544	100	0.15	0.00001	79.9	70.3	57.5	33.3	41.5	75
33	494964	2159645	85	0.13	0.00005	1.18	3.55	0.63	0.32	1.04	4.5
466	508169	2165031	85	0.1	0.0005	1.64	1.92	1.65	1	1.07	4
21	508001	2156697	86	0.15	0.00005	-	-	-	-	5.44	7

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, M. P., Woessner, W. W., y Hunt, R. J. 2015. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press.
- Ariel Constructores S.A. de C.V. 2007. Estudio hidrogeoquímico, así como de evolución de la calidad del agua subterránea en la cuenca del Valle de México año 2007, Ciudad de México.
- Cardona, A., y Hernández, N. 1985. Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el Valle de México. Tecnología y Ciencias del Agua, 10(3), 71-90.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) 1996. Estudio Geofísico geohidrológico de la zona del Lago Nabor Carrillo, Texcoco, Estado de México. (reporte técnico). Subdirección Técnica Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Ciudad de México, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco, Estado de México. Ciudad de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2005. Proyecto Lago de Texcoco. Rescate Hidroecológico. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. Gerencia Lago de Texcoco.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2006a. Estudio de modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca. Ciudad de México.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. 2006b. Proyecto de relocalización, reposición y rehabilitación de pozos pertenecientes al Programa De Acción Inmediata (PAI). Ciudad de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2012. Pruebas de recarga instantánea y a corto plazo (activa y pasiva), Proyecto piloto de recarga Artificial El Caracol. Ciudad de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014a. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014b. Programa de Adecuación de Derechos del Uso del Agua, Ciudad de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018, Estadísticas del Agua en México, Ciudad de México, México.
- Consorcio de Ingenieros de Guanajuato S.A. de C.V. (CIGSA), 2011. Estudio de exploración geofísica, modelo tridimensional de la geología del subsuelo, integración de los censos de aprovechamientos de las aguas subterráneas históricos y su actualización, reconstrucción de los registros piezométricos e hidrométricos históricos y recorridos piezométrico e hidrométrico, asociados a la recarga artificial con agua residual tratada al acuífero Cuautitlán-Pachuca, en la zona de El Caracol, Estado de México. Ciudad de México.
- COPEI Ingeniería. 2015. Proyecto Texcoco. (Reporte Técnico) Ciudad de México, México.

- Diario Oficial de la Federación. (DOF). 2019. Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Texcoco, clave 1507, en el Estado de México, Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas Del Valle De México.
- Domenico, P. A. 1972. Concepts and models in groundwater hydrology. McGraw-Hill, New York.
- Domenico, P.A. and F.W. Schwartz. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley y Sons, New York, 824 p.
- Fries, C. 1960. Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México., Universidad Nacional Autónoma de México.
- Goevaluaciones y Perforaciones S.A. de C.V. 2012. Estudio de pruebas de recarga continua y su monitoreo, bajo diferentes cargas hidráulicas, en pozos piloto de recarga profunda, asociados a la recarga artificial con agua residual tratada al acuífero Cuautitlán-Pachuca.
- Instituto de Geología UNAM (IG-UNAM). 2011. Proyecto de recarga artificial del acuífero con aguas tratadas del módulo experimental de tratamiento terciario en la zona federal del Lago de Texcoco, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Instituto de Ingeniería UNAM (II-UNAM). 2018. Estudios de la segunda etapa del modelo numérico del acuífero del Valle de México – Plan de gestión integral del acuífero del Valle de México. Ciudad de México.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010
Estadísticas Históricas de México 2009, México
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2015. Encuesta intercensal 2015.
- Lojero-Ochoa, V. A. 2014. Evaluación de los asentamientos por consolidación de los suelos lacustres en la zona del proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) en el antiguo Lago de Texcoco. (Tesis de maestría) Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Mendoza-Archundia. E. 2012. Caracterización hidrogeológica de la porción sureste de la planicie de Texcoco, México, para establecer sitios de recarga artificial al acuífero. (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Mooser, H. F. 1961. Informe sobre la geología de la cuenca del Valle de México y zonas colindantes (No. 557.25 C6). Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.
- Morris, D. A., y Johnson, A. I. 1967. Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the US Geological Survey, 1948-60 (No. 1839-D). US Government Printing Office.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994
- Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997
- Norma Oficial Mexicana NOM-013-CONAGUA-2000
- Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003

- Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015
- Organismo de cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM), y Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). 2018. Datos piezométricos del Valle de México. Ciudad de México.
- Ortiz, E. 2008. Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Ciudad de México, México.
- Palacios-Vélez, O. L., y Escobar-Villagrán, B. S. 2016. La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. Tecnología y ciencias del agua, 7(2), 5-16.
- Piñón Martínez, N. 1989. Módulo experimental de recarga de acuíferos. Ingeniería hidráulica en México: publicación técnica de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, 4(2), 67-72.
- Rudolph, D. L., Cherry, J. A., y Farvolden, R. N. 1991. Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico City. Water Resources Research, 27(9), 2187-2201.
- Sánchez-San Román, F. J. 2017. Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca, España
- Santoyo, E., Ovando, S. E., Mooser, F., y León, E. 2005. Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México. TGC. Geotecnia. México, DF.

- Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). 1969. Proyecto Texcoco, memoria de los trabajos realizados y conclusiones, Fiduciaria Nacional Financiera S.A, Ciudad de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018. Estudios básicos, factibilidad y proyecto ejecutivo (piloto) de recarga artificial en el acuífero de Texcoco. Ciudad de México.
- Segerstrom, K. 1962. Geology of south-central Hidalgo and northeastern Mexico: United States Geological Survey Bulletin, 1104-C, 87–162.
- Toth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. Journal of geophysical research, 68(16), 4795-4812.
- Unda-López J. A. 2016. Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México. (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Vázquez-Sánchez, E., y Jaimes-Palomera, R. 1989. Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, 28(2).