



Universidad Nacional Autónoma de México

Posgrado en Ciencias de la Tierra
Instituto de Geofísica

Modelación matemática del comportamiento hidrogeológico de la zona lacustre de Xochimilco, México

T E S I S

para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS
(Aguas Subterráneas)

presenta

Alejandro Ruvalcaba García

Director de Tesis: Dr. Tomás González Morán



México D.F., Ciudad Universitaria, 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos y dedicatoria

Es delicado, en una cuartilla mencionar a todas las Instituciones, profesores, compañeros del Posgrado, secretarías, personas comunes y otros individuos, que intervinieron de alguna manera en la realización de este trabajo. Gracias a todos.

Haciendo un esfuerzo por no quedar mal con nadie, describo los siguientes agradecimientos. Si no apareces en los párrafos, házmelo saber y te agradeceré personalmente.

Universidad Nacional Autónoma de México, gracias por existir y permíteme retribuirte con este trabajo, todo lo bueno que sigo recibiendo de ti.

Al Posgrado, en Ciencias de la Tierra lo recomiendo ampliamente, por la calidad de los personajes en todos sus departamentos y rincones, hasta la formación académica que imparten, de primer mundo.

Al personal encargado de bibliotecas y salas de consulta, del Sistema de Aguas de la Ciudad de México y Comisión Nacional del Agua, por su trato y facilidades otorgadas para consultar el material que soporta mi tesis; sin su ayuda, no hubiera resultado igual.

A todos los profesores con los que cursé mis créditos, de los cuales recibí conocimientos que nunca creí utilizar y asimilar pro mi formación inicial. En este apartado, agradezco a todos los sinodales Dra. E. Leticia Flores M., Dra. Eloísa Domínguez, Dr. Luis Marín S. por sus acertadas correcciones, las cuales mejoraron el producto final.

Dr. Oscar Escolero, no soy el primero y ni el último, en darle muchas gracias. Es una buena persona, “un gran tipo”, decimos quienes le citan y me enorgullece haberlo tratado. Su gran ayuda, tiempo, explicaciones y consejos terminaron en un buen modelo computacional de flujo presentado, así como lo habíamos imaginado.

Dr. Tomas González, profe, recuerdo cuando hace algún tiempo llegue a tocar su puerta, usted me recibió, apadrinó, y resguardó durante todo este tiempo, y sigue igualito. Me permito promoverlo como amigo, por todo el tiempo y situaciones que pasamos juntos. Como verá, aunque las cosas se ponían en chino, al final lo logramos.

A los compañeros del Posgrado, con los cuales compartí clases, trabajos, exámenes y buenas situaciones.

Mi tesis está dedicada a Alejandra y Roberto, mi modelo familiar a seguir, este trabajo es para ustedes, aunque no les sea útil y mucho menos, aplicable en su vida cotidiana.

Erika, te quiero y sin ti, no hubiera logrado esto; gracias, preciosa.

M. en C. Ezequiel H., Lic. J. Ricardo, Lic. Ricardo S. mis grandes amigos, hay vamos. Biol Raúl A. y Coach Salvador de FESZ, gracias, por seguir contando con ustedes.

CONTENIDO

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	10
LA CUENCA DE MÉXICO Y SUS LAGOS.....	10
La Cuenca de México.....	10
Los antiguos lagos	11
<i>Obras Hidráulicas en el sistema lacustre de la Cuenca de México durante distintas épocas</i>	<i>13</i>
Época Prehispánica	13
Época Virreinal	15
Época Independiente	16
<i>Evolución del paisaje de la Cuenca de México</i>	<i>18</i>
Remanentes de los cuerpos de agua.....	18
Lagos de Chalco y Xochimilco.....	19
<i>Xochimilco.....</i>	<i>21</i>
LA ZONA LACUSTRE DE XOCHIMILCO	23
<i>Problemas específicos dentro de la zona</i>	<i>24</i>
Crecimiento urbano	24
Explotación de agua potable	25
Procesos de subsidencia.....	25
Incorporación de aguas tratadas.....	25
<i>Estudios realizados en la zona</i>	<i>26</i>
Modelos de simulación	27
MARCO GEOLÓGICO	28
<i>Geología histórica</i>	<i>28</i>
<i>Unidades Geológicas.....</i>	<i>29</i>
Depósitos lacustres del Cuaternario (Qla).....	29
Depósitos aluviales del Cuaternario (Qal)	30
Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb)	30
Depósitos lacustres del Plioceno Inferior (Tpla).....	31
Secuencia volcánica piroclástica y clástica del Plioceno (Tppc).....	31
Rocas volcánicas basálticas-andesíticas del Plioceno Superior (Tpba)	32
<i>Geología superficial</i>	<i>34</i>
<i>Fisiografía</i>	<i>34</i>
<i>Geomorfología</i>	<i>34</i>
<i>Planicie lacustre</i>	<i>36</i>
MARCO HIDROGEOLÓGICO	37
<i>Lago de Xochimilco</i>	<i>37</i>
<i>Canales y lagunas de Xochimilco</i>	<i>38</i>
<i>Plantas de tratamiento de aguas negras.....</i>	<i>39</i>
<i>Características hidrogeológicas del acuífero</i>	<i>40</i>
Acuitardo superior	41
Acuífero principal	42
Acuífero profundo.....	43
<i>Zonas de recarga y sistema de flujo.....</i>	<i>43</i>
<i>Hidrografía.....</i>	<i>45</i>
Arroyos.....	45
Ríos.....	45
<i>Manantiales</i>	<i>46</i>
<i>Pozos de extracción.....</i>	<i>46</i>
<i>Piezometría</i>	<i>48</i>
DESCRIPCION DE LA ZONA	48
<i>Generalidades.....</i>	<i>48</i>

<i>Ubicación de la zona de estudio</i>	48
Clima	49
Suelos	49
Ríos.....	49
Cobertura vegetal.....	50
Área urbana.....	50
Agricultura.....	51
Red de canales	51
<i>Objetivos</i>	52
<i>Objetivo general</i>	52
<i>Objetivos particulares</i>	52
METODOLOGÍA	53
GENERALIDADES PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL.....	53
<i>Modelo de flujo de agua subterránea</i>	55
Método de diferencias finitas	56
<i>MODFLOW 2000</i>	56
MODELO CONCEPTUAL.....	58
<i>Área de estudio a modelar</i>	58
<i>Modelo hidrogeológico de capas</i>	60
<i>Zona de simulación</i>	61
<i>Parámetros hidrogeológicos</i>	62
Pozos de extracción.....	62
Recarga artificial.....	64
Recarga natural	64
Evapotranspiración	64
<i>Condiciones de frontera</i>	64
<i>Valores de carga hidráulica</i>	64
<i>Simulación de celdas activas e inactivas</i>	66
IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	67
Aportes al sistema.....	67
Salidas del sistema	67
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
MODELO ESTADO ESTACIONARIO (SS).....	68
<i>Planteamiento</i>	68
<i>Calibración</i>	69
MODELOS ESTADO TRANSITORIO (TR).....	70
<i>Planteamientos</i>	70
<i>Calibraciones</i>	72
Modelo 1 (1910-1985).....	72
Modelo 2 (1985-2003).....	75
SIMULACIÓN DE ESCENARIOS.....	79
<i>Escenarios propuestos</i>	80
<i>Análisis de los escenarios</i>	82
CONCLUSIONES	88
<i>Acciones recomendadas para estudios futuros en la región de Xochimilco</i>	90
LITERATURA CITADA	91
APÉNDICES.....	98
<i>Apéndice 1: Momentos históricos de las aguas de Xochimilco</i>	98
<i>Apéndice 2: Pozos de extracción en el área de estudio</i>	105

Relación de Figuras

Figura 1. Lugares que rodean a la Cuenca de México.....	11
Figura 2. Extensión de los antiguos lagos en la Cuenca de México.....	13
Figura 3. Mapa de ubicación de las obras hidráulicas realizadas en la época prehispánica.....	15
Figura 4. Evolución de los cuerpos de agua existentes en la Cuenca de México.....	18
Figura 5. Antiguamente los lagos de Chalco y Xochimilco se encontraban comunicados.....	20
Figura 6. El remanente del lago de Xochimilco y la extensión que ocupaba en su esplendor.....	22
Figura 7. Ubicación de los canales más importantes en la zona lacustre de Xochimilco.....	24
Figura 8. Localización de pozos y secciones geológicas, a partir de los cortes litológicos.....	32
Figura 9. Esquema que interpreta las secciones geológicas 1 y 2.....	33
Figura 10. Esquema que interpreta las secciones geológicas 3 y 4.....	33
Figura 11. Planicie lacustre al sur de la Cuenca de México, y la topografía.....	36
Figura 12. El mapa muestra el área que ocupaba el lago de Xochimilco en el año 1900.....	37
Figura 13. Esquema de la ubicación de las unidades hidrogeológicas del acuífero de estudio.....	41
Figura 14. Diagrama del flujo de agua en la zona de estudio.....	43
Figura 15. Localización de las Delegaciones del Distrito Federal, en la zona de estudio.....	49
Figura 16. Imagen que muestra la delimitación del área de estudio.....	50
Figura 17. Pasos a seguir para el desarrollo del modelo matemático computacional, de agua.....	53
Figura 18. Se representa el volumen, usado en la derivación de la ecuación del movimiento.....	55
Figura 19. Se muestra la interpretación espacial de un sistema acuífero.....	56
Figura 20. Celda i, j, k e índices utilizados para sus seis celdas vecinas.....	57
Figura 21. Se muestra el antiguo lago de Xochimilco para el año de 1900.....	59
Figura 22. Ubicación del área ocupada por el antiguo lago de Xochimilco y sus manantiales.....	60
Figura 23. Representación esquemática del modelo hidrogeológico.....	61
Figura 24. Ubicación de los canales, lagunas y pozos de extracción de agua potable.....	63
Figura 25. Curvas de elevación del nivel estático del agua en el área de simulación, 1900.....	65
Figura 26. Curvas de elevación del nivel estático del agua en el área de simulación, 1985.....	65
Figura 27. Representación grafica del modelo de las celdas activas en las cuatro capas.....	66
Figura 28. Calibración final, en estado estacionario para el periodo de 1900.....	69
Figura 29. Modelo en estado estacionario, con las cargas hidráulicas en el año 1900.....	70
Figura 30. Elevación de los niveles piezometricos en el área de estudio, para 1985 y 2003.....	72
Figura 31. Calibración final en estado transitorio para el modelo 1 (1910-1985).....	73
Figura 32. Elevación de los niveles piezometricos de la simulación modelo 1.....	74

Figura 33. Modelo al final de la simulación, para el periodo de 1910 a 1960 y 1985.....	75
Figura 34. Calibración final en estado transitorio para el modelo 2, de 1985 a 2003.....	76
Figura 35. Elevación de los niveles piezometricos de la simulación modelo 2.....	76
Figura 36. Elevaciones de los niveles estáticos en los pozos del modelo 2.....	77
Figura 37. Modelo 2 (1985-2003), con las cargas hidráulicas.....	79
Figura 38. Mapa de ubicación de los pozos en la simulación de escenarios futuros.....	82
Figura 39. Comparación de elevaciones de los niveles estáticos en una sección E-E'.....	83
Figura 40. Elevación de los niveles estáticos para la zona de estudio en el escenario 1.....	86
Figura 41. Elevación de los niveles estáticos para la zona de estudio en el escenario 2.....	86
Figura 42. Elevación de los niveles estáticos para la zona de estudio en el escenario 3.....	87
Figura 43. Elevación de los niveles estáticos para la zona de estudio en el escenario 4.....	87
Figura A1-1. Tubo de concreto utilizado para el acueducto, agua de manantiales.....	99
Figura A1-2. Mapa donde se observan los acueductos del sur del Valle de México.....	101

Relación de Tablas

Tabla 1. Principales obras Prehispánicas al sur de México.....	14
Tabla 2. Información recopilada en el área de Chalco para el año de 1782.....	20
Tabla 3. Información recopilada en el área de Xochimilco para el año de 1782.....	21
Tabla 4. Parámetros de los principales conos volcánicos, en la zona lacustre de Xochimilco.....	35
Tabla 5. Datos algunos de los canales y lagunas de Xochimilco.....	38
Tabla 6. Cantidad en agua ($\times 10^3 \text{m}^3$) vertida en los canales a lo largo de los años.....	40
Tabla 7. Manantiales que antiguamente existían, estudiados por Peñafiel.....	47
Tabla 8. Métodos utilizados por el paquete MODFLOW 2000.....	56
Tabla 9. Muestra las características de las capas que forman el esqueleto del modelo.....	60
Tabla 10. Los doce manantiales más importantes en Xochimilco.....	62
Tabla 11. Pozos de extracción de agua durante los tres periodos de simulación.....	63
Tabla 12. Parámetros designados en las entradas de agua del modelo.....	67
Tabla 13. Parámetros designados para las salidas de agua del modelo.....	67
Tabla A ₂ -1. Valores de extracción de los pozos localizados en el área de estudio.....	105

RESUMEN

En este trabajo se realiza un estudio en retrospectiva de las características geológicas e hidrogeológicas en la evolución del antiguo lago de Xochimilco, desde finales del siglo XIX, cuando el sistema natural se encontraba en equilibrio y sus manantiales, representaban una alternativa importante en el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México.

Se recopiló la información histórica disponible, de fenómenos ocurridos en la zona lacustre que han modificado, de manera acelerada, su funcionamiento hidrogeológico, en poco más de 100 años. Se modelará computacionalmente, el comportamiento y la evolución del paisaje del área de Xochimilco desde principios de siglo XX, para posteriormente desarrollar modelos del actual remanente del lago, que hoy en día es abastecido por agua tratada y establecer el deterioro ejercido sobre el acuífero, actualmente explotado por pozos de extracción de agua ubicados en la zona.

Los modelos hidrogeológicos realizados para distintas etapas, de la historia de Xochimilco, se desarrollan utilizando el paquete MODFLOW 2000. El modelo 1, simula el periodo de 1910 a 1985 donde ocurren el aprovechamiento de los manantiales hasta su agotamiento y el comienzo de la explotación del acuífero por pozos profundos. El modelo 2, para el periodo de 1985 a 2003, que son los años con datos más confiables y en los cuales se mantiene la explotación acelerada por más de 140 pozos profundos, la recarga artificial por las plantas de tratamiento de agua, el crecimiento de la zona urbana, entre otros fenómenos que marcaron el paisaje actual de la zona lacustre.

La simulación del modelo 2, indica la presencia de una zona vulnerable en el acuífero de estudio, en la porción noroeste, donde el abatimiento tiene un promedio de 20 m en un periodo de 18 años. A partir de este modelo, se plantearon cuatro escenarios a futuro para estudiar la evolución de la región.

El escenario 1 conserva la tendencia actual de explotación, el escenario 2 incrementa el régimen de extracción en los pozos un 23 %, el escenario 3 incrementa el régimen de extracción y el número de pozos y para el escenario 4, con la finalidad de recuperar el nivel estático en la zona vulnerable, se reduce un 20% el régimen de extracción de los pozos en la zona. Estos escenarios a futuro, muestran aspectos negativos para la región y son simulaciones que quedan a revisión, discusión y utilización de las dependencias encargadas del manejo recurso del agua, en nuestro País.

INTRODUCCIÓN

La zona lacustre de Xochimilco, representa uno de los últimos remanentes de los antiguos lagos someros, que se localizaban en la Cuenca de México. Después de la Conquista se inician una serie de acciones y obras hidráulicas que han ido cambiando, el antiguo paisaje de esta zona. Hay que recordar, que esta región contaba con potentes manantiales de agua dulce, que durante poco más de 50 años, sirvieron de abastecimiento a la Ciudad de México (Palerm, 1973).

A partir de 1961, el excesivo régimen de explotación y el crecimiento urbano de la región agotó los manantiales, ocasionando una catástrofe ambiental en esta zona, tan querida por los mexicanos. En la década de los setentas, tuvo que recibir agua tratada, primeramente de la planta del cerro de la Estrella, y en posteriores años las de San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo, para evitar la desecación prácticamente total de sus canales y chinampas. Finalmente, este proceso se ha detenido y el abasto a las poblaciones cercanas se realiza por medio de pozos profundos (Terrones, 2004).

En 1987 la UNESCO reconoció a Xochimilco como Patrimonio Cultural de la Humanidad. A partir de entonces se han desarrollado estudios y acciones orientadas al rescate ecológico del área. Principalmente los estudios se enfocan en señalar la contaminación de sus aguas someras y mantener el paisaje que va perdiendo terreno frente al crecimiento urbano.

El aspecto subterráneo del estudio de las aguas en Xochimilco, ha sido poco examinado por las autoridades. Es importante que se reconozca el paulatino descenso de los niveles estáticos, en la región y conocer el comportamiento que tendrá en pocos años. Actualmente, estos efectos se pueden observar en el terreno del área lacustre; se ha modificado el gradiente topográfico, hay hundimientos, fracturas en el terreno y reducción de la zona lacustre.

El desarrollo de un modelo matemático computacional permite entender el funcionamiento de las aguas subterráneas y conocer los fenómenos que ocurren en el medio físico, y que afectan las condiciones naturales de un sistema (Anderson and Woessner, 1992).

Un modelo es cualquier concepción, que represente una aproximación a un fenómeno natural o situación de campo. Para establecer un modelo es necesario primeramente tener bien definido el propósito y su aplicación. Existen diferentes tipos de modelos: los analíticos, los analógicos y los matemáticos (Fitts, 2002).

La modelación matemática aplicada a los sistemas de agua subterránea puede ser utilizada para diferentes propósitos, entre ellos: conocer más acerca del funcionamiento de un sistema hidrológico simulando diversas condiciones, ya sean naturales como el caso de las sequías, inundaciones y/o las asociadas a las actividades antropogénicas que permiten llevar a cabo la determinación y la posterior regionalización, de los parámetros que los caracterizan. También se logran aplicar con el objeto de contar con elementos para definir las políticas del manejo del recurso agua (Escolero, 2004).

Los modelos matemáticos pueden ser resueltos numéricamente o analíticamente. En algunos casos, al utilizar una solución analítica, que resulte inapropiada para el problema planteado, se puede recurrir a un modelo numérico (Anderson and Woessner, 1992).

La característica más importante en la modelación matemática aplicada en el área de aguas subterráneas, es la predicción de consecuencias en una acción propuesta. Se utiliza para predecir el comportamiento del sistema a futuro. Además requiere realizar una calibración con información existente (Hsieh *et al.*, 2001).

La mayoría de la información sobre acuíferos existente en el país está encaminada a evaluar los parámetros físicos, químicos y algunas veces biológicos dentro de un determinado periodo de tiempo. Los estudios realizados, generalmente son presentados por empresas particulares a petición de las Dependencias de Gobierno encargadas del agua en México. Particularmente los estudios sobre modelos de simulación, habitualmente no se realizan por grupos multidisciplinarios para conocer la relación del medio físico y el fenómeno a estudiar (DGCOH, 1987).

En este trabajo, pretende reproducir el comportamiento hidrogeológico de una zona de características muy particulares como lo es la zona lacustre de Xochimilco. Determinando las acciones necesarias para establecer la interacción del agua, con el medio físico que lo contiene y posteriormente evaluar la sensibilidad del sistema acuífero y sus zonas vulnerables.

El trabajo realizado en esta tesis, se divide en tres secciones. En la primera, se presenta una búsqueda exhaustiva de información que permitió establecer etapas importantes de la evolución del área lacustre. Para la segunda, se describe la metodología necesaria en el desarrollo de los modelos computacionales, y en la tercera, se discuten los resultados.

ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

LA CUENCA DE MÉXICO Y SUS LAGOS

La presencia del agua ha propiciado el desarrollo de diversas comunidades. Cuando se habla de la Cuenca de México, se piensa en las metrópolis prehispánicas rodeadas de agua y de sus antiguos pobladores que habitaban una gran zona lacustre, formada por lagos someros comunicados, donde se encontraba ubicada la región política y económica más importante de nuestro País y donde su desarrollo urbano fue deteriorando el equilibrio ecológico existente (DDF, 1975).

La Cuenca de México

Ocupa una posición central en la Faja Volcánica Transmexicana (**FVT**) y se encuentra entre los 98° 12' – 99° 30' longitud oeste y 19° 00' – 20° 15' latitud norte, abarcando un área de aproximadamente 9600 km² (Figura 1). Se caracteriza por ser una cuenca endorreica, de carácter lacustre, rodeada por montañas y sus altitudes en la planicie central oscilan entre los 2240 y 2390 msnm. Las fases volcánicas cuaternarias, que modifican su relieve dieron lugar a una barrera montañosa (la Sierra de Chichinautzin), culminando con el cierre de la Cuenca y desarrollando un sistema de grandes lagos que propició su relleno, con materiales aluviales. Las montañas que lo circundan alcanzan los 3000 m y el pico más alto es el Popocatepetl a 5500 m. La Cuenca incluye al Distrito Federal y partes de los Estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. La interpretación de las formaciones volcánicas ha permitido inferir que la Cuenca de México originalmente drenaba hacia el Océano Pacífico y que importantes fases eruptivas la cerraron, aproximadamente hace 600 000 años (Santoyo *et al.*, 2005).

Es posible dividir la Cuenca de México, desde el punto de vista fisiográfico en tres partes: la zona meridional, limitada al este por las Sierras Nevada y de Río Frío; al oeste por las Sierras de las Cruces; al Sur por la Sierra de Chichinautzin; y al norte aunque incompletamente, por las elevaciones de la Sierra de Guadalupe, el Cerro de Chiconautla y la Sierra Patlachique. La zona septentrional, está ligada a la meridional por un “cuello de botella”, el Estrecho de San Cristóbal, situado entre el Cerro de Chiconautla y la Sierra de Guadalupe y se extiende, hacia el norte, hasta las estribaciones de la Sierra de Pachuca, hacia el oeste y noroeste cuenta con elevaciones como las Sierras de Monte Alto y Tepoztlán (DDF, 1975).

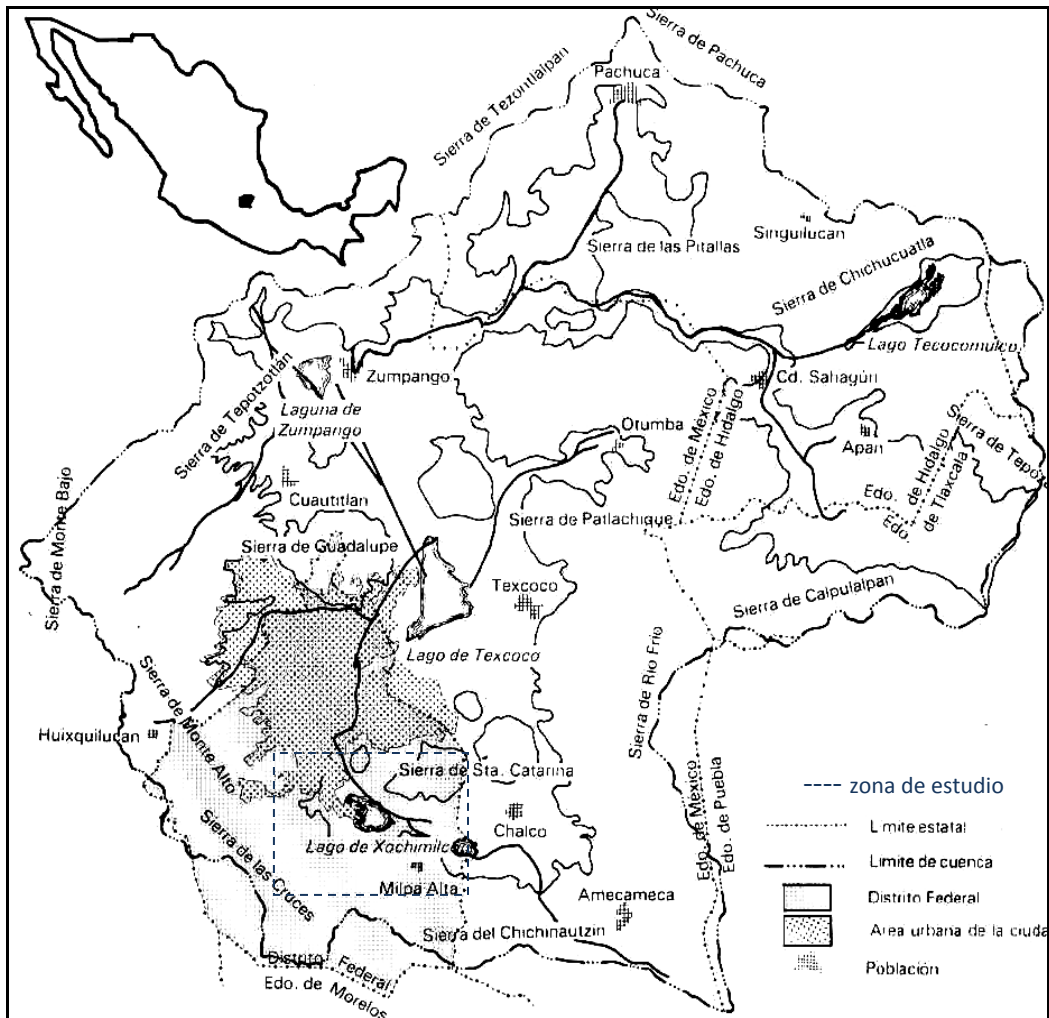


Figura 1. Lugares que rodean a la Cuenca de México (Modificado de Guerrero *et al.*, 1982).

La zona nororiental representa un área compleja en la que una multitud de elevaciones volcánicas menores y aparentemente sin orden, domina el paisaje. El subsuelo de la Cuenca de México está constituido por un complejo cúmulo de sucesivas formaciones volcánicas, que alcanzan más de 200 m de espesor, descansando sobre un basamento de rocas sedimentarias marinas (DDF, 1975).

Los antiguos lagos

La Cuenca meridional se caracterizaba por recibir flujos de agua, procedentes de ríos perennes y múltiples manantiales, que permitían verter sus excedentes en la Cuenca central, un nivel más bajo, formando un lago de unos 200 km² con 2240 msnm, enmarcado por la Sierra del Ajusco al sur y al oeste; la Sierra de Santa Catarina o península de Iztapalapa al norte; la Sierra Nevada al oriente, y el Pedregal de San Ángel y Coyoacán al poniente (Santoyo *et al.*, 2005).

Este lago, de agua dulce, estaba unido con el lago salobre de México- Texcoco por un estrecho lacustre formado, entre el cerro de la Estrella y el Pedregal. Es posible que ambos lagos estuvieran unidos también por el estrecho entre la sierra de Santa Catarina y el cerro de la Estrella o que se estableciera allí un área pantanosa (Santoyo *et al.*, 2005).

Posteriormente la Cuenca de México fue dividida artificialmente en dos partes por un dique norte – sur, con niveles relativamente someros, que propiciaron la explotación de agua dulce, producto de la evolución del equilibrio en el sistema lacustre. La existencia de agua de buena calidad propició el establecimiento de pueblos a orillas de los cuerpos de agua, como Chalco, Mixquic, Tlapacoya, Xochimilco y Xico entre otros (Rojas *et al.*, 1974).

La parte más plana de la Cuenca se le denomina el Valle de México y en el pasado existió un enorme lago que al secarse se dividió en varios cuerpos lacustres. La identificación de las antiguas playas del enorme lago ha permitido inferir que en los periodos geológicos de mayor precipitación llegó a tener unos 80 km en dirección norte – sur y unos 45 km de oriente a poniente (Palerm, 1973).

La evolución del paisaje de la Cuenca permite evaluar el impacto que sobre el medio ambiente ha tenido el manejo del agua. Anteriormente la Cuenca se encontraba ocupada por vastas extensiones de lagos y pantanos que formaban tres embalses naturales ó subcuencas (Figura 2): la septentrional (Zumpango-Xaltocan), la central (México-Texcoco) y la meridional (Chalco-Xochimilco). Con un marcado contraste de salinidad entre el lago central y los lagos meridionales de agua dulce y el de Zumpango al norte. La parte más profunda de la Cuenca, es lo que ahora conocemos como el lago de Texcoco, la cual presentaba un marcado contraste de salinidad, en comparación con los lagos de agua dulce al norte: Zumpango y Xaltocan; y los del sur: Chalco y Xochimilco (Niederberg, 1987).

Orozco y Berra (1864) establece las alturas relativas de las tres subcuencas con relación al lago de Texcoco (2230 m de altura), al cual se le asignó la cota 0.0 m. El lago de Zumpango, vecino al de San Cristóbal, tenían 6.06 m de elevación relativa; drenaba al Xaltocan que se elevaba 3.0 m sobre el nivel del lago de Texcoco, el cual era el más bajo de todos. El nivel del lago de Chalco estaba al extremo sureste de la Cuenca de México y se unía al de Xochimilco cuya elevación era de 3.14 m y ambos drenaban al de Texcoco.



Figura 2. Extensión de los antiguos lagos en la Cuenca de México (Modificada de Vela, 2004).

Obras Hidráulicas en el sistema lacustre de la Cuenca de México durante distintas épocas

A continuación, se hace mención de las obras hidráulicas más importantes realizadas en la Cuenca de México, con un panorama general en el sistema lacustre, desde antes de la Conquista, conociendo las antiguas técnicas, hasta las obras realizadas en el siglo XIX, y que de alguna manera han sido determinantes en el deterioro paulatino de esta región.

Época Prehispánica

Los historiadores ubican hacia el año de 1267 aproximadamente, la llegada de los Mexicas a la Cuenca de México. Al intentar establecerse en la zona lacustre, recibieron de los pueblos que ahí se encontraban, rechazos y ataques (MODVM, 1902).

Con carrizos, barro y hierba levantaron un templo y construyeron sus primeras chozas. Ese fue el origen de la gran Tenochtitlán. Con inigualable tenacidad construyeron un islote acumulando lodo y piedras sobre balsas de junco, hundiéndolas. Una vez que la isla artificial sobresalió del espejo de agua formaron canales al hacer bordos paralelos dentro del lago; terraplenaron las orillas de la isla, y construyeron puentes y calzadas, de las dispersas chozas. Así entre tulares, desarrollaron tiempo después la gran Tenochtitlán (MODVM, 1902).

Conforme aumentó la población, el abasto de agua, se tuvo que realizar de manantiales más lejanos. Desde la tierra firme en chalupas o canoas, se utilizó este sistema que siguió hasta la época Virreinal. Moctezuma, mandó construir un acueducto, encargado al señor de Texcoco, Netzahualcóyotl. Esta vía, funcionó a partir de 1466 para conducir agua potable hasta el templo Mayor. Hubo otros acueductos prehispánicos, como el de Churubusco y el de Azcapotzalco a Tlatelolco. Otra obra colosal para su tiempo, fue conocida como el albarrón de Netzahualcóyotl, un dique de 16 km que arrancaba en el cerro de Atzacolco en la Sierra de Guadalupe y terminaba en el cerro de la Estrella en Iztapalapa, su finalidad era controlar las inundaciones en la Ciudad (DGCOH, 1994).

Otras obras hidráulicas en la época prehispánica (Figura 3) que sucedieron en la parte central y hacia el sur de la Cuenca de México se muestran en la Tabla 1 (Palerm, 1973):

Número	Nombre	Obra
<i>En los lagos meridionales de agua dulce, Chalco – Xochimilco:</i>		
1	Ayotzingo	Puerto de canoas.
2	Xochimilco	Puerto de canoas.
3	Xochimilco	Acequias hondas para navegar.
4	Tlahuác	Calzada desde volcán Teutli a la Sierra de Santa Catarina.
5	Xochimilco	Calzada a tierra firme.
<i>En los lagos centrales de agua salobre, Texcoco – México:</i>		
6	Iztapalapa – México	Calzada.
7	Iztapalapa	Chinampas.
8	Coyoacán	Calzada Iztapalapa – México.
9	Tacuba – México	Calzada.
10	Tepeyac – México	Calzada.
11	Chapultepec – México	Acueducto sobre calzada.
12	Iztapalapa	Calzada – dique.
13	Texcoco	Canal subterráneo de un palacio al lago.
14	Tenochtitlán	Red de canales para agua potable.
15	Iztapalapa- México	Canales para navegar.
16	Albarradón de Netzahualcóyotl	Calzada atajando la laguna

Tabla 1. Principales obras Prehispánicas al sur de México (Palerm, 1973).



Figura 3. Mapa de ubicación de las obras hidráulicas realizadas en la época prehispánica (Modificado de Palerm, 1973).

Época Virreinal

Con la caída de la Gran Tenochtitlán el 13 de agosto de 1521, se erigió una nueva ciudad. En 1576 se adquirieron los manantiales de Santa Fe, después entre 1605 y 1607 se inició el acueducto de la Tlaxpana, con más de 900 arcos, con una longitud de 6 km, concluyéndose en 1620, tenía dos conductos, uno hacia Chapultepec y otro a Santa Fe. Tanto las obras hidráulicas indígenas como las virreinales intentan controlar la situación que se presentaba. Las calzadas-dique y los albardones cortan el libre acceso, entre los vasos y permiten controlar dentro de ciertos límites las avenidas de agua (Palerm, 1973).

Chalco, con sus ríos perennes, se delimita con la calzada-dique de Tlahuác. Xochimilco con sus manantiales permanentes, se delimita con las calzadas-dique de Coyoacán-Culhuacán, de Coyoacán a Iztapalapa-México y del cerro de la Estrella a Santa Catarina (Palerm, 1973).

Enrico Martínez en 1607, planeó llevar a cabo el desagüe de los lagos desviando el río Cuautitlán, que por ser el más caudaloso significaba el mayor peligro por el aumento de nivel de los lagos, su obra consistió en un socavón entre Huehuetoca y Nochistongo, lugar ya fuera de la Cuenca de México. Entre 1702 y 1711 el deterioro del acueducto de Santa Fe, da lugar a reparaciones por cuenta de los usuarios de agua, para riego y molinos, con lo cual se inició en la Ciudad de México el cobro del servicio para obras colectivas (DGCOH, 1994).

En 1714, se amplía la captación de los manantiales de Chapultepec para combatir la escasez del suministro. Se construyeron de 1740 a 1770, acueductos especiales para abastecer poblaciones cercanas a la capital: Tlalpan (San Agustín de las Cuevas), San Ángel y Guadalupe (del río Tlalnepantla). Años más tarde, en 1738, dio principio la construcción del acueducto de Belem, para cubrir poblaciones del sur y surponiente de la Ciudad de México (DGCOH, 1994).

El sentido de todas estas piezas de ingeniería hidráulica, como descubrieron las autoridades virreinales, no solo era evitar inundaciones y particularmente las de agua salobre, sino también regular los niveles de los lagos, controlando el drenaje natural. Para ello, el sistema de calzadas-dique y albardones se complementaba con un sistema igualmente complejo de ríos canalizados, canales y acequias profundas, que se utilizaban para el regadío, el desagüe, la navegación, el comercio y el transporte (Rojas *et al.*, 1974).

Época Independiente

Durante los primeros años de vida Independiente, el control contra las inundaciones se apoyaba en las obras del tajo de Nochistongo que desaguaban en el río Cuautitlán y los de Zumpango y San Cristóbal, así como en las calzadas y los diques realizados que entre otras funciones, protegían a la urbe, por derrames de los lagos Texcoco, Xochimilco y Chalco. Aunque esta salida de la Cuenca comenzó a alterar la ecología del Valle (DGCOH, 1994).

Puede citarse de esta época, la construcción de la llamada zanja cuadrada para proteger el lago de Texcoco. Con la inundación de 1819 a causa de una lluvia extraordinaria, tan abundante que la Ciudad de México se convirtió en un lago y el Tepeyac en una isla (DGCOH, 1994).

De inmediato se reforzaron bordos, diques y calzadas, y se desazolvaron los canales. Se aplicó en 1856 con la construcción del Canal de Garay y una compuerta en Mexicaltzingo para recuperar los volúmenes del agua hacia el canal de la Viga (DGCOH, 1994).

El cambio de la fisonomía de los lagos del sur de la Cuenca de México empezó en el año de 1856, ya que se terminó el Canal de Santa Martha que servía para hacer el desagüe del lago de Xochimilco, con esta obra se trataba de verter las aguas del lago de Xochimilco, más amplia y formal al lago de Texcoco. Posteriormente, para continuar el vaciado de las aguas de Xochimilco a Texcoco, se construyó el Canal de Garay, como en ese tiempo el Canal Nacional que llegaba directamente a la Ciudad de Xochimilco, las aguas se vertieron rápidamente hacia Texcoco (Lugo de la F., 1984).

La situación de evacuación de aguas citadinas se hacía cada vez más crítica. Se encargó al Ing. Gayol, establecer un sistema de alcantarillado funcional, formado por colectores que seguían la pendiente del terreno, dirigidas de oriente a poniente. Hacia 1856, las inundaciones eran cada vez más alarmantes, y en algunas zonas su nivel alcanzaba hasta tres metros de altura. Se decidió emprender nuevas obras de desagüe, consistentes en el Gran Canal del Desagüe y en el Túnel de Tequisquiac, el cual construyó la segunda salida artificial de la Cuenca de México; ambas obras se inauguraron en 1900 (Guerrero *et al.*, 1982).

El abastecimiento de agua proporcionado por los manantiales de la Cuenca de México resultó insuficiente, por lo que se empezaron a perforar pozos someros; en 1847 existían casi 500 pozos, el número siguió creciendo y para 1886 había más de 1000 pozos. Posiblemente el hundimiento de la Ciudad de México haya empezado en esas fechas a juzgar por las nivelaciones realizadas de 1891 a 1895, las cuales registraron un descenso de 5 cm por año. Además la presión en el acuífero disminuyó a causa de la extracción, y en consecuencia, también se redujo el caudal de los manantiales de Chapultepec (Guerrero *et al.*, 1982).

De esta forma al final del siglo XIX, la Ciudad de México enfrenta una problemática en el abastecimiento de agua potable. Comienzan a presentarse fenómenos como el crecimiento acelerado de la población, se intensifican la explotación de los acuíferos, hundimientos y deterioro del drenaje urbano y finalmente, se inician las transferencias de agua potable desde otras regiones, para abastecer a la Ciudad de México (DGCOH, 1994).

Evolución del paisaje de la Cuenca de México

Remanentes de los cuerpos de agua

Antiguamente el funcionamiento hidrológico de la Cuenca de México había producido una serie de lagos y lagunas comunicados entre sí, y de gran extensión. Los depósitos subterráneos, llenos a su capacidad, mantenían el flujo con numerosos manantiales. Los lagos importantes a señalar eran los de Texcoco, México, Chalco, Xochimilco, Zumpango, San Cristóbal, Xaltocan, Apan, Tóchac y Tecomulco, de los cuales, el más bajo y amplio era el de Texcoco (DDF, 1975).

A pesar de lo indicado, los lagos se hallaban en un proceso natural de obliteración y senectud, lo cual los hacía extensos y de poca profundidad, proceso que con la intervención del hombre se aceleró notablemente, en la Figura 4, se muestra la evolución de los lagos en la Cuenca (Shilling, 1939).

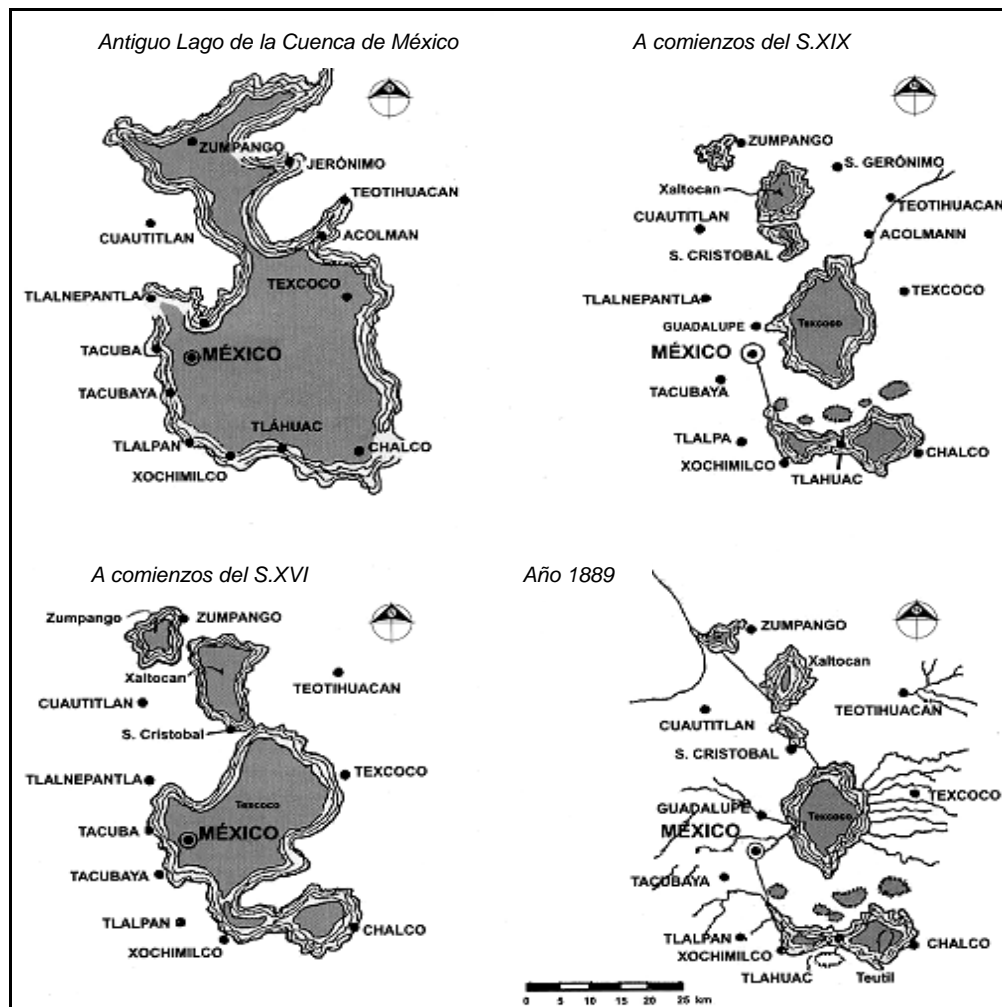


Figura 4. Evolución de los cuerpos de agua existentes en la Cuenca de México (Modificado de Shilling, 1939).

La tala inmoderada de los bosques, la extracción de agua del subsuelo y el envío de grandes volúmenes de agua hacia fuera de la Cuenca de México, por mencionar algunos hechos, contribuyeron al deterioro del funcionamiento y paisaje de la región. Las obras hidráulicas, que tenían el objetivo de desaguar la Ciudad, solucionando el inconveniente de las inundaciones, y de controlar los niveles del lago de Texcoco, disminuyeron la extensión de los lagos (algunos hasta se desecaron artificialmente) y se abatió las elevaciones del nivel freático, con el consiguiente hundimiento del suelo (DDF, 1975).

Actualmente el área lacustre no rebasa los 50 km² y comprende remanentes de los lagos de Texcoco, Zumpango, Xochimilco y Chalco. A pesar del desecamiento de la antigua cuenca hidrológica del Valle de México, se conservan en el sur de la ciudad vestigios lacustres prehispánicos integrados en aproximadamente 25 hectáreas de chinampas y 140 kilómetros de canales (Arcos *et al.*, 1995).

Hoy en día, Texcoco y Xochimilco son considerados como los últimos bastiones del sistema lacustre de la Cuenca de México. Existe gran interés en estos lagos y particularmente Xochimilco, por ser considerado como un símbolo de la ciudad de México (Pérez-Fons, 1993).

Xochimilco es un lugar de historia, de tradición y agua, como tal, es una región que ha estado sujeta a las condiciones, por las que atraviesan las cuencas hidrológicas del país, especialmente la escasez, la sobreexplotación y la transferencia de agua, de una región a otra (Pérez-Fons, 1993).

Lagos de Chalco y Xochimilco

En las fuentes históricas aparecen claramente dos lagos, uno de agua dulce (Chalco-Xochimilco) y otro de agua salada o salobre (Texcoco-México), separados de manera natural por la sierra de Santa Catarina y el Cerro de la Estrella (Figura 5). Las aguas de los lagos Chalco-Xochimilco y Texcoco-México estaban comunicadas entre sí por un estrecho natural entre el Cerro de la Estrella y Coyoacán (Rojas *et al.*, 1974).

También se comunicaban por una zona baja, entre el cerro de la Estrella y la sierra de Santa Catarina, susceptible de ser inundada. La comunicación entre los vasos estaba regida, en primer lugar, por la topografía. El lago de Texcoco era el de menor altura, convirtiéndose así, en el depositario de los excedentes de los demás vasos. Más alto que éste estaba el lago de Xochimilco y, a escasa altura, el de Chalco (DDF, 1996).

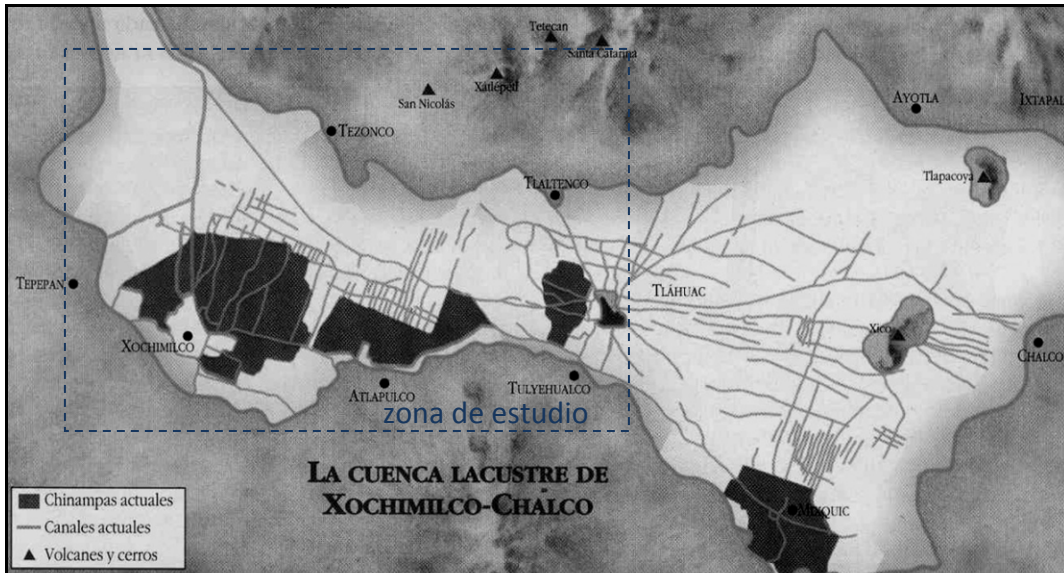


Figura 5. Antiguamente los lagos de Chalco y Xochimilco se encontraban comunicados (Rojas, 2004).

En segundo lugar, la comunicación estaba determinada por el régimen cíclico de lluvias y secas. En el periodo lluvioso se acentuaba la tendencia del sistema natural de drenaje a descargar los excedentes posibles sobre el vaso de Texcoco (DDF, 1996).

El gran lago de Chalco-Xochimilco ofreció condiciones naturales particularmente para el desarrollo de la agricultura hidráulica, especialmente para las chinampas, por tener fuentes de aguas dulces abundantes y permanentes, de poca profundidad y tener una elevación mayor, dándole un desagüe natural de sus excedentes en agua dulce hacia la laguna de México. El lago de Xochimilco recibía en forma intermitente excedentes del lago de Chalco y contaba con numerosos y potentes manantiales (Rojas *et al.*, 1974).

Las características hidrológicas que tenían antiguamente los dos lagos se muestran en las tablas 2 y 3.

Laguna de Chalco	
I. Ojos de agua (manantiales):	Tlapacoya, Ayotzingo, Tezompa, Tecomitl, Tetelco, Istayopan
II. Ríos permanentes:	Tenango, Tlalmanalco
III. Vertientes temporales en los cerros :	Santa Catarina y San Isidro, Tetelco, Tecomitl, Ayotzingo, Tlalmanalco, Río Frío, Cuauhtepac

Tabla 2. Información recopilada en el área de Chalco para el año de 1782. (Modificada de AGN, 1782).

Laguna de Xochimilco	
I. Ojos de agua (manantiales):	Xochimilco, Nativitas, San Gregorio, Santa Cruz, Acuesconal, Paraje Estrella, Tepepan, Noria
II. Ríos permanentes:	La Magdalena, San Ángel, Río Mixcoac, San Agustín
III. Vertientes temporales:	Topilejo, Nativitas, Amilpa Alta

Tabla 3. Información recopilada en el área de Xochimilco para el año de 1782. (Modificada de AGN, 1782).

Xochimilco

La región de Xochimilco, representaba el papel comercial de abastecer de diversos productos agrícolas a la Ciudad de México. Durante siglos en el aspecto hidrológico la zona de Xochimilco, contaba con poderosos ojos de agua que formaban una acequia. También se vertían sobre el lago los escurrimientos de Topilejo, Nativitas y Milpa Alta (Lugo de la F., 1984).

Posteriormente, el crecimiento de las áreas urbanas, se extendió hasta las zonas inundables y reguladoras de los ríos que las cruzaban, para proteger estas zonas urbanas se hizo necesario rectificar los cauces y levantar bordos, terminando por azolvar y desaparecer las zonas inundables. Xochimilco, tópic de estudio de este trabajo, sufrió un cambio en su lago para dar lugar a una vasta región de canales, chinampas, zonas arqueológicas, parques, mercados, barrios, esplendorosos edificios y ancestrales tradiciones que han logrado perdurar durante siglos gracias a sus orgullosos habitantes (Balanzario, 1976).

Desde el siglo XIX y durante la mayor parte del XX, la zona de Xochimilco fue vista por la Ciudad de México como una promesa a futuro, no solo por su vocación agrícola sino, sobre todo por su abundancia de agua. A finales del siglo XIX, se plantearon una serie de factores que impulsaron y ocasionaron la explotación, planificada y consistente de los manantiales y el agua subterránea de la zona lacustre de Xochimilco (Apéndice 1) (Terrones, 2004).

Para el año de 1884 el Doctor Antonio Peñafiel comenzó a realizar estudios en los manantiales de Xochimilco, comprobando que estos no solo eran muy abundantes, sino que el agua brotada de su seno era potable sin necesidad de someterla a ningún tratamiento previo. El sistema de distribución de agua potable, en la Ciudad de México para estas fechas, era insuficiente, había fugas y pérdidas en su presión (Peñafiel, 1884).

La única alternativa viable era traer el agua de los manantiales de Xochimilco, así, comenzaba la expropiación de las aguas en la zona lacustre de Xochimilco (Peñañiel, 1884).

Actualmente, Xochimilco cuenta con 12 barrios y 15 pueblos, cada uno con su capilla. Se utiliza el agua tratada para mantener los niveles en los canales de la zona chinampera, el riego de sus áreas verdes, para el desarrollo de los productos agrícolas, establecimientos industriales y comerciales, en parques y jardines. Las condiciones vigentes del remanente del lago son lamentables; se reconocen 10 canales principales y 7 lagunas, el proceso de secado de estos canales y lagunas, así como los altos índices de contaminación debidos a las descargas de aguas residuales, muestran un deterioro acelerado del paisaje en Xochimilco (Figura 6) (DGCOH, 2005).

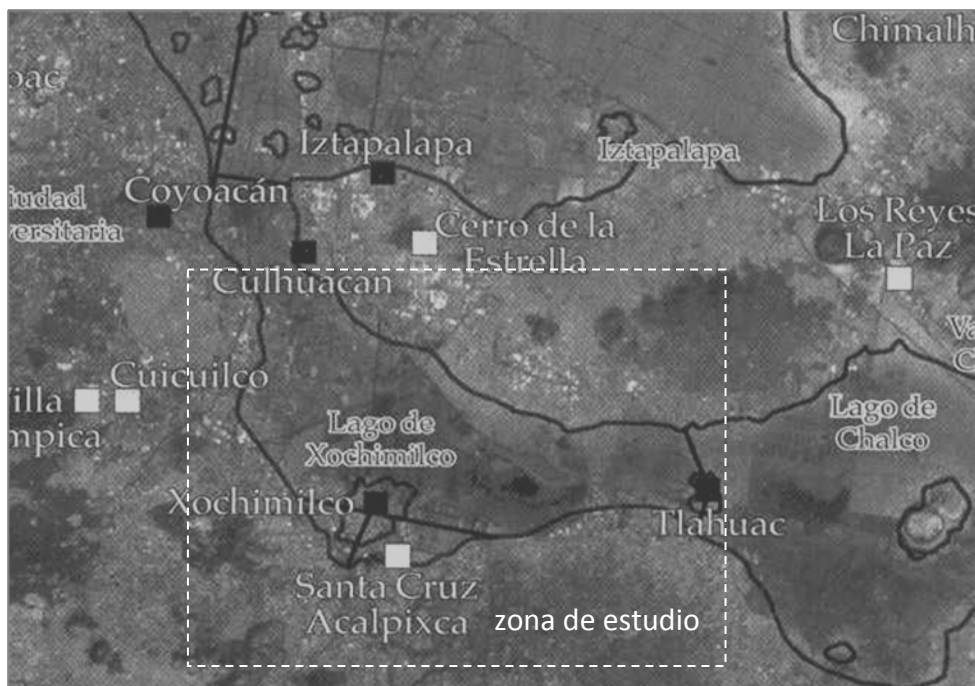


Figura 6. El remanente del lago de Xochimilco y la extensión que ocupaba en su esplendor (Modificada de García, 2007).

Principalmente debido a las actividades humanas desarrolladas alrededor de donde existía el antiguo lago y en las partes altas de su cuenca, en donde la deforestación ha provocado arrastre de sólidos al lago, los asentamientos en el terreno que ha modificado la configuración topográfica del fondo y por lo tanto la distribución del agua. La combinación, de todo lo anterior, ha modificado la zona lacustre de Xochimilco dejándola azolvada, contaminada, en constante reconfiguración de sus límites y profundidades y con cambio de usos de suelo (Altamirano, 1988).

LA ZONA LACUSTRE DE XOCHIMILCO

Dentro de la zona lacustre se encuentra el sistema chinampero. Es característico de la parte sur de la Cuenca de México y sigue siendo empleado, de forma cotidiana. El conocimiento de la técnica se tiene desde la época prehispánica y probablemente la zona más extensa y típica de chinampas se extendía a lo largo de las orillas meridionales de los antiguos lagos de Chalco y Xochimilco (Trejo, 1984).

La chinampa, es una porción de tierra fértil construida al agregarse vegetación acuática y lodo proveniente del mismo cuerpo de agua en el que se construye, y fijada por ahuejotes (*Salix bonplandiana*) con varas, para evitar su desmoronamiento. Se encuentra rodeada por canales de agua que se intercomunican entre sí (Lugo de la F., 1984).

En la actualidad a lo largo del antiguo lago existen algunos pueblos chinamperos que perduran, estos son: Xochimilco, Nativitas, Acalpixca, Atlapulco, Tlaxialtemanco, Tulyehualco, Tlahuác, Tetelco, Tezompa y Mixquic (Fernández, 1986).

La zona del antiguo lago de Xochimilco, en la actualidad, presenta una serie de canales de agua, con aproximadamente 184 km, entre los principales están: el de Chalco, Cuemanco, Nacional, Apatlaco, Tlicuilli, Ampampilco, Japón, La Noria, Amelalco y Texhuilo (Figura 7). Estos conductos de agua a cielo abierto, rodean innumerables zanjas y canales intermitentes que bordean a las chinampas, además de servir de comunicación entre sí (INEGI, 2001).

El aporte de agua proveniente de plantas de tratamiento, como las del cerro de la Estrella y San Luis Tlaxialtemalco, de las zonas urbanas y de la actividad agrícola representan contaminación directa al lago, resultando en el deterioro del sistema acuático (Ortiz y Ruvalcaba 2005).

En la zona se ha observado, que la relación, tan estrecha, que guardan el agua de los canales y suelo saturado, ha provocado cambios irreversibles para la calidad del sitio. El sistema acuático por ser un sistema cerrado y de poco movimiento, ha propiciado la acumulación de contaminantes, principalmente metales pesados, concentraciones elevadas de plomo, cromo y zinc (Díaz y Domínguez, 2004).



Figura 7. Ubicación de los canales más importantes en la zona lacustre de Xochimilco. 1 Chalco, 2 Cuemanco, 3 Nacional, 4 Apatlaco, 5 Tlicuilli, 6 Ampampilco, 7 Japón, 8 La Noria, 9 Amelalco y 10 Texhuilo (Modificado de Terrones, 2004).

Algunos parámetros físico-químicos (pH, temperatura, DBO, DQO, conductividad, NO_3 , PO_4) muestran la mala calidad de las aguas de este sistema e indican que su contaminación tiende a aumentar hasta el deterioro irreversible del lago. El estado del lago resulta hipereutrófico y la calidad del agua, de acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996, rebasando los límites máximos permisibles para embalses naturales y artificiales de uso en riego agrícola (Ortiz y Ruvalcaba 2005).

Problemas específicos dentro de la zona

Dentro del área de estudio se presentan varios fenómenos, que han contribuido de manera importante en el deterioro de esta zona, tan importante y querida de nuestro País.

Crecimiento urbano

El crecimiento desmedido de la Ciudad de México ha comenzado a afectar en recientes décadas a la Cuenca de México. No solo porque han disminuido las superficies agrícolas y forestales, sino también, porque no ha sido acompañado de la dotación de servicios como el agua y drenaje para los habitantes (Terrones, 2004).

Específicamente en Xochimilco, la edificación de casas que se construyen a la orilla de los canales tanto en la zona turística como en la chinampera. La parte más densamente poblada en la zona lacustre se observa en los barrios de Xochimilco como la Santísima, San Lorenzo y Asunción (Ramírez, 1987).

Explotación de agua potable

Un fenómeno no resuelto y referido en muchos trabajos es la extracción intensiva de agua en la zona lacustre en Xochimilco. Un gran volumen contribuye al abastecimiento del Valle de México. La proporción entre recarga y extracción es de 1 a 3, por cada 1 m³/s que entra al acuífero, se extraen de él 3 m³/s. La explotación continua y desmedida de los mantos acuíferos en Xochimilco ha ocasionado un proceso de hundimiento acelerado del suelo, tanto en las regiones urbanizadas de los pueblos y los barrios asentados en la antigua ribera del lago, como en la región donde subsisten las chinampas (Rebolledo y López, 1987).

Procesos de subsidencia

Mazarí y Alberro (1990), sostienen que el hundimiento promedio del suelo ha superado los 20 cm anuales, en la Delegación Xochimilco. Además ha existido una pérdida de la pendiente de los canales y áreas de inundación, provocada por los asentamientos constantes de determinadas áreas de la zona lacustre de Xochimilco, estos han provocado la pérdida de pendiente de los escurrimientos naturales.

Otro grave problema causado por el proceso de subsidencia radica en que las arcillas impermeables, que protegían los mantos acuíferos tienden a compactarse y agrietarse. Este efecto genera la posibilidad de que los acuíferos se contaminen con aguas residuales o sustancias peligrosas de generados en los rellenos sanitarios de la Delegación Xochimilco (Santoyo *et al.*, 2005).

Incorporación de aguas tratadas

La incorporación de aguas tratadas, para mantener los niveles en los canales y lagunas de Xochimilco, no solo son de las plantas del cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo, sino también de los drenajes de las casas en la región. Los asentamientos urbanos en la zona chinampera no cuentan con un sistema de drenaje, por lo que sus aguas negras son arrojadas directamente a los canales (Arcos *et al.*, 2006).

En la zona el deterioro ambiental es alarmante. Existen establos clandestinos en algunos barrios de Xochimilco y descargas de aguas negras por ductos verticales que salen de los hogares. La misma agua contaminada de los canales es utilizada para el riego de hortalizas que se cultivan en Xochimilco, los árboles presentan manchas como efecto del contacto con las aguas negras y la fauna silvestre de la zona ha disminuido, solo se observan especies que se adaptan al deterioro del paisaje (Ortiz y Ruvalcaba 2005).

Estudios realizados en la zona

Los estudios en la zona lacustre de Xochimilco se han diversificado a lo largo del tiempo para volverse más puntuales, en su mayoría se inclinan hacia el estudio de los suelos y el agua de la zona chinampera, siendo pocos los reportados para el comportamiento hidrológico en Xochimilco. A continuación se presentan algunos trabajos, con relación a nuestro tema, realizados en la zona lacustre de Xochimilco.

Una parte de estudios realizados en este sistema complejo lo integran los suelos, Mendoza (1961), menciona que sus suelos presentan alto contenido de materia orgánica, los suelos que corresponden a la llanura, están constituidos por procesos de depositación desde las partes altas, constituyendo así una laguna lacustre en la que predomina el material arcilloso.

Acevedo (1972), menciona que los suelos de Xochimilco se formaron por intemperización de la roca madre, compuesta principalmente por materiales de origen volcánico. Indica que los suelos de las partes altas son arenosos y arcillosos, debido, a la tala inmoderada de sus bosques y a la erosión de los suelos.

Alfaro y Orozco (1980), presentan el trabajo más completo que se tiene sobre los suelos del Ejido de Xochimilco. En su investigación, citan tres tipos de horizontes de diagnóstico: hístico, mólico y cámbico. En sus conclusiones, señalan el alto contenido de materia orgánica y humedad, en suelos de la zona, aunque con sales solubles que afectan a las plantas.

Cisneros (2005), presenta un trabajo para caracterizar algunos factores del ambiente físico y urbano que intervienen en el deterioro de la calidad del agua de la zona de Xochimilco, dentro y fuera de los límites de la Delegación del mismo nombre.

El suelo en Xochimilco es de origen antrópico, formado por diferentes factores naturales como el vulcanismo y el clima entre otros. Los perfiles explorados para el estudio de los suelos en la zona lacustre, llegan en general hasta los 2 m de profundidad, con secciones en promedio de 30 a 50 cm donde las propiedades del material van cambiando, siendo constante la característica de un suelo gris oscuro de migajón arcilloso-limoso (Moreno, 2005).

Arcos *et al.* (2006), en su estudio en el sistema de canales establecen que los sólidos tanto disueltos y totales así como la poca profundidad del mismo indican altos niveles de eutrofización. Análisis de series de tiempo indican que no se esperan cambios importantes en el comportamiento del sistema.

En los trabajos para estudiar la zona lacustre de Xochimilco, la mayoría solo han tratado problemas puntuales, en lugares específicos de la Delegación. La mayoría de los trabajos relacionados con el comportamiento hidrogeológico de la zona lacustre de Xochimilco, han sido desarrollados por empresas particulares a petición de la DGCOH. De tal manera se mencionarán los trabajos más importantes encontrados, en cuanto al tema que se va a tratar.

Modelos de simulación

Para desarrollar el modelo propuesto en esta tesis, será necesario simular el comportamiento hidrogeológico de la zona lacustre, incorporando información de las dependencias encargadas del manejo del agua en la Ciudad de México, como son: Sistema de Aguas de la Ciudad de México y la Comisión Nacional del Agua.

Con el fin de mantener los niveles de agua en canales y lagunas y apoyados en la información histórica de los balances hidrológicos, se han desarrollan modelos de flujo en la zona (Ramírez, 1987).

El Proyecto Ejecutivo para la Construcción y Rectificación de los Canales de Xochimilco, realizado en 1990, por la DGCOH. Establece un mapa de ubicación y niveles de canales de la zona chinampera. Desarrolla un programa computacional llamado CANAL, elaborado en lenguaje FORTRAN (DGCOH, 1987).

El DDF (1994), desarrolla un modelo matemático hidrogeológico de la Cuenca de México en su porción meridional, para condiciones presentes. Dentro del modelo se realizan predicciones de la evolución de niveles piezométricos y hundimiento para el 2010, con la ayuda del paquete MODFLOW.

TASA (1997), realiza un diagnóstico del sistema hidráulico en la Delegación Xochimilco. Menciona generalidades de la zona y su ubicación geográfica con respecto a las otras Delegaciones, así como tablas del manejo del agua en Xochimilco.

CIBERHIDROGEOFISICA (1999) presenta un trabajo para conocer el hundimiento de los canales de la zona lacustre, empleando un modelo de simulación. Presenta cortes litológicos, de 68 pozos de extracción, operados por la DGCOH, y realiza la modelación tentativa, con gráficos que representan secciones transversales de la zona lacustre de Xochimilco.

El grupo CACIGAS (2003) desarrolla un modelo a partir de los parámetros que intervienen en el balance hidrológico de la zona lacustre. Incorpora aporte de lluvia, la evaporación en la zona y volúmenes de agua en el lago. Generan un modelo cíclico, donde puntualizan las entradas por agua tratada, respecto a las salidas como la infiltración al lago, el agua de riego y otras. Los estudios realizados en la zona, contemplan por separado los fenómenos superficiales y subterráneos de sus aguas.

En este trabajo de tesis, se desarrolla un modelo matemático computacional, donde se simulan la evolución de las condiciones superficiales del cuerpo de agua, y su relación en el comportamiento del acuífero de Xochimilco. Los modelos de simulación nos permitirán establecer, como se ha modificado el área en general, principalmente por la excesiva extracción de las aguas subterráneas en la región.

MARCO GEOLÓGICO

Geología histórica

La Cuenca de México está localizada en la parte central de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (**FVT**), es endorreica del tipo tectónico-volcánico que albergó un sistema lacustre en el centro y sur. Está limitada al sur por la sierra de Chichinautzin, al norte por la sierra de Pachuca que la separa de la cuenca de Tula, al este por la sierra Nevada y al oeste por la sierra de las Cruces que también define a la cuenca de Toluca (Vázquez y Jaimes, 1989).

La geología de la cuenca está compuesta básicamente de rocas volcánicas (que define el contenedor) y sedimentos de origen lacustre. Las primeras fueron originadas por varios aparatos volcánicos en diferentes periodos de actividad (Rodríguez y Ochoa, 1989).

Encontramos rocas del Mioceno-Pleistoceno (andesitas, dacitas, riolacitas) en las sierras de Las Cruces y Nevada y en el cerro Ajusco; del Plioceno-Pleistoceno (basaltos, andesitas) en el núcleo de la sierra de Santa Catarina; del Cuaternario (basaltos, andesitas) en la sierra de Chichinautzin. En el entorno de las sierras, existen alternancias de derrames lávicos, piroclastos y cenizas. Los sedimentos presentes en la Cuenca de México son de origen volcánico y lacustre, encontrándose en los márgenes de la Cuenca, sedimentos de ambos tipos interdigitados, disminuyendo los primeros y aumentando los segundos hacia las partes centrales de la Cuenca. El paquete granular más antiguo y profundo corresponde a piroclastos del Plioceno que se encuentran a 100 – 200 m de profundidad en la mayor parte de la Cuenca (Rodríguez y Ochoa, 1989).

En el caso de la Gran Tenochtitlán, los derrames y aparatos volcánicos que formaban las serranías de Amecameca, y Chichinautzin, debieron causar el cierre del drenaje de la cuenca hidrológica, formando un gran lago que se extendía hasta Xochimilco y Chalco (Viniegra, 1992).

Unidades Geológicas

A continuación se presentarán las unidades litoestratigráficas presentes en la zona lacustre de Xochimilco. Las características estratigráficas-estructurales y espesor de las unidades hidrogeológicas de interés, se definieron considerando los estudios realizados por la DDF (1994), Zúñiga (2003) y las clasificaciones de Vázquez y Jaimes (1989), Mooser (1990) y Mooser y Molina (1993). La información geológica se basa en los cortes litológicos, en la ubicados en el área de estudio y descritos en los trabajos de CAVM (1975), EXYCO (1993), CIBERHIDROGEOFISICA (1999), Lesser (2003), Zúñiga (2003), CHU (2004).

Con esto, se constituyeron secciones horizontales y verticales de la zona de estudio para establecer las unidades litoestratigráficas, que se incorporarán en el modelo. A continuación se presentara información detallada de las capas seleccionadas, del reciente a lo más antiguo.

Depósitos lacustres del Cuaternario (Q1a)

Estos depósitos forman una planicie lacustre con una altitud promedio en toda la cuenca de 2200 m. Constituida por depósitos arcillosos, principalmente arcillas con gran cantidad de materia orgánica, originados a partir de los sedimentos acumulados en los extensos lagos someros, que se extendían desde Chalco en el sur hasta Zumpango, en el norte de la Cuenca de México.

Las arcillas, en algunos sitios hacia las sierras, presentan intercalaciones con material granular y volcánico, son capas de aproximadamente 20 m de espesor y se incrementa su espesor hacia el centro de la planicie lacustre de Xochimilco, con ordenes máximos de 96 m donde antiguamente se encontraba su lago.

Los depósitos lacustres encuentran interdigitados con la Formación Chichinautzin y con los depósitos aluviales, el rango de edades (4800 a 46000 años), implica un tiempo de formación durante el Pleistoceno Tardío al Holoceno.

La sedimentación lacustre del Cuaternario, se inició paulatinamente con el bloqueo del escurrimiento superficial, al sur por la actividad volcánica de la Sierra Chichinautzin. Estos depósitos tienen una conductividad hidráulica (k) de 0.000864 - 0.0864 m/d.

Depósitos aluviales del Cuaternario (Qal)

Por debajo de los depósitos lacustres, se encuentra una secuencia de materiales clásticos de origen fluvial provenientes de numerosos arroyos que bajaban, hacia el centro de la zona lacustre de Xochimilco, desde las elevaciones volcánicas circundantes. Acarrearon sedimentos compuestos principalmente por gravas y arenas de composición basáltica, limos, arcillas y tobas. Con frecuencia estos depósitos quedaron interestratificados con lentes lacustres, tobáceos y hasta algunos horizontes de lava. Estos depósitos tienen una conductividad hidráulica (k) de 0.3542 – 30.24 m/d.

Afloran alrededor de la planicie lacustre en forma de abanicos y planicies fluviales que cubren discordantemente a la secuencia estratificada. También se observan intercalaciones de las rocas volcánicas basálticas del Cuaternario. Tienen espesores máximos de 200 a 400 m. en el subsuelo descansan ampliamente, con discordancia, encima de los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno (Tppc), debido a su edad Cuaternaria se interdigita con las formaciones volcánicas de la misma edad, siendo su contacto concordante u interdigitado con los sedimentos lacustres (Qla). Se le propone una edad del Pleistoceno al Holoceno.

Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb)

Están localizadas al norte y sur de la zona de estudio. Afloran en las sierras del Chichinautzin y Santa Catarina. Son derrames lávicos vesiculares, cavernosos, fracturados y autobrechados que presentan importante en la permeabilidad total y que por su estructura, favorecen una mayor conductividad hidráulica, en la dirección regional de los derrames. Estas rocas volcánicas tienen una conductividad hidráulica (k) de 1.4688 – 2505.6 m/d.

Por otra parte, se presentan intercalaciones de cenizas, lapilli, tobas y brechas volcánicas, menos permeables que los derrames lávicos. En general, corresponden a emisiones de basaltos y andesitas, que sobreyacen discordantemente a la secuencia estratificada y a otras unidades volcánicas, más antiguas. Sus espesores son variables, aunque pueden desarrollar importantes espesores como es el caso de la sierra del Chichinautzin.

Depósitos lacustres del Plioceno Inferior (Tpla)

En la zona lacustre de Xochimilco se encuentran una serie de depósitos lacustres, en forma de potentes lentes arcillosos con espesores de 200 a 300 m. Estos depósitos tienen una conductividad hidráulica (k) de .000864 - .0864 m/d.

Se localiza bajo la secuencia aluvial moderna (Qal), producto del arrastre de numerosas corrientes fluviales, generalmente de tipo intermitente, las cuales en lluvias torrenciales depositaron gravas, arenas, limos, arcillas hacia el centro de la zona de Xochimilco.

Al perder energía se depositaron formando capas, lenguas, corrientes, horizontes, etc. La característica que la diferencia de la secuencia moderna, es el hecho de encontrarse bajo las rocas volcánicas provenientes del Cerro de la Estrella, consideradas del Cuaternario Inferior y anteriores a la formación de la Sierra del Chichinautzin.

Secuencia volcánica piroclástica y clástica del Plioceno (Tppc)

Representa la capa más profunda del modelo y se relaciona con la actividad piroclástica y fluvial, de todo el Plioceno. El espesor máximo es de 400 m y está constituido por gravas, arenas, limos y arcillas de constitución volcánica, además de tobas, conglomerados, brechas y aglomerados volcánicos, bastante compactos, fracturados y claramente estratificados. Esta secuencia volcánica tiene una conductividad hidráulica (k) de 0.1036 – 31.104 m/d.

Estos materiales, se fueron acumulando fluvialmente en amplios valles socavados en rocas preexistentes e interdigitados con otras rocas volcánicas. Localmente se intercalan con tobas de grano fino y lapílicas pumíticas. Se relaciona, con la Formación Tepozteco, que aflora en la sierra del mismo nombre, al sur de la Cuenca de México.

Rocas volcánicas basálticas-andesíticas del Plioceno Superior (Tpb)

Afloran, dentro de la zona lacustre de Xochimilco, en la zona del Cerro de la Estrella. Presenta cuerpos dómicos, al sureste de la Sierra Guadalupe, con un drenaje mejor desarrollado, y cubiertos por capas importantes de suelos, abanicos aluviales y hasta tobas, provenientes de aparatos volcánicos más jóvenes. Constituyen coladas de lava, tobas y brechas fracturadas. Estas rocas volcánicas tienen una conductividad hidráulica (k) de 1.1232 – 596.16 m/d.

A partir de la información sobre las unidades geológicas, se realizaron cuatro secciones geológicas (Figura 8). Las secciones se presentan en las Figuras 9 y 10.

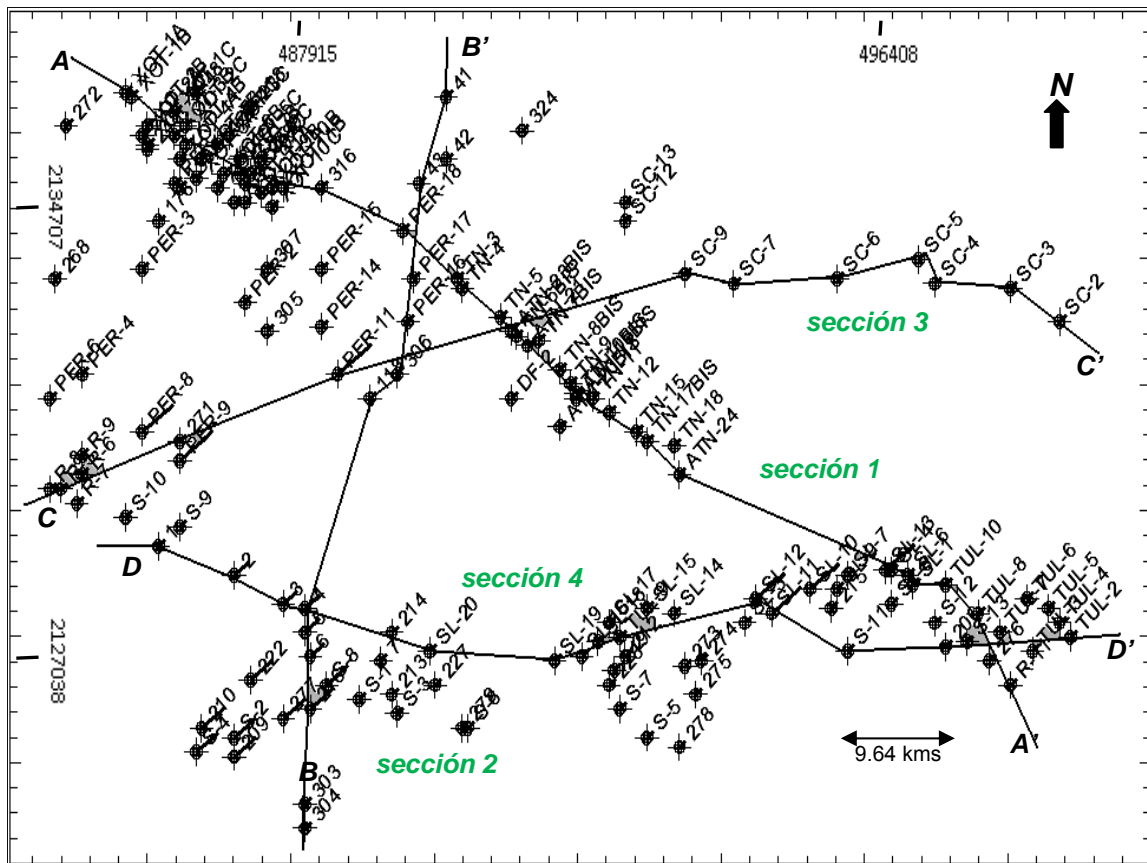


Figura 8. Localización de pozos y secciones geológicas realizadas a partir de los cortes litológicos (Referenciados en Rock Works, 2006).

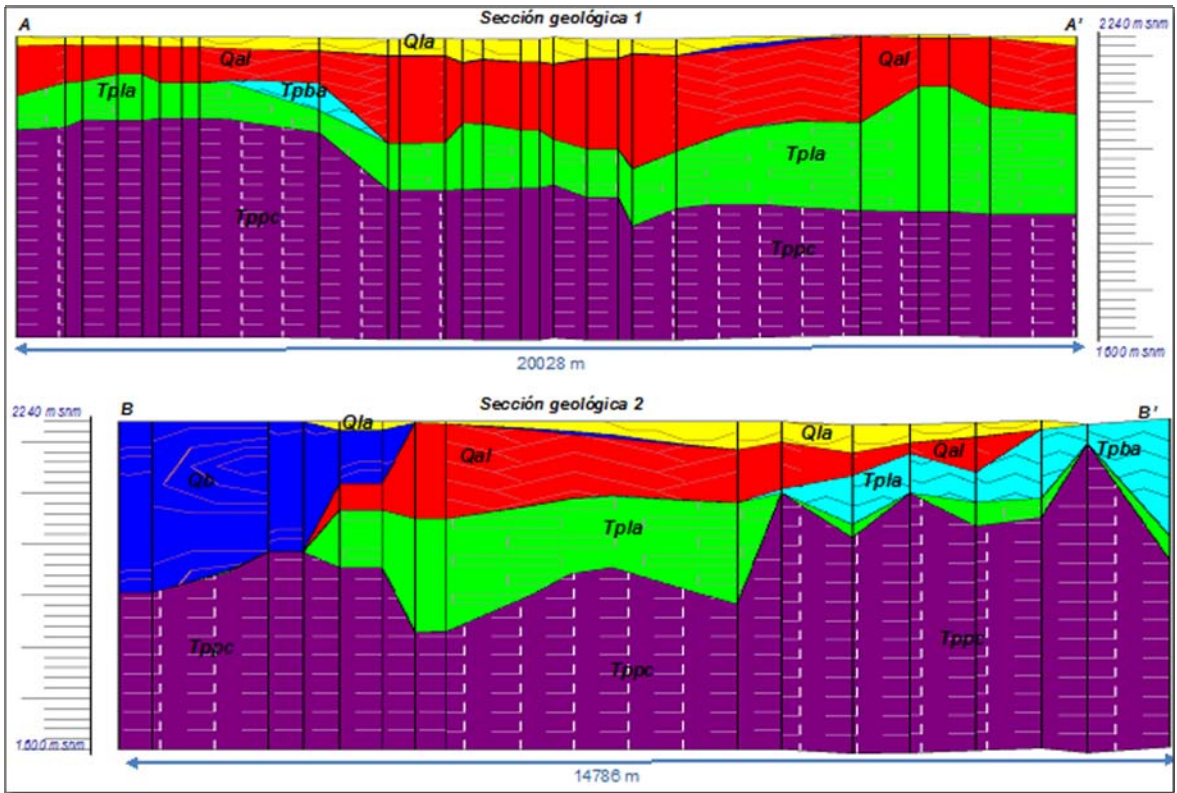


Figura 9. Esquema que interpreta las secciones geológicas 1 y 2.

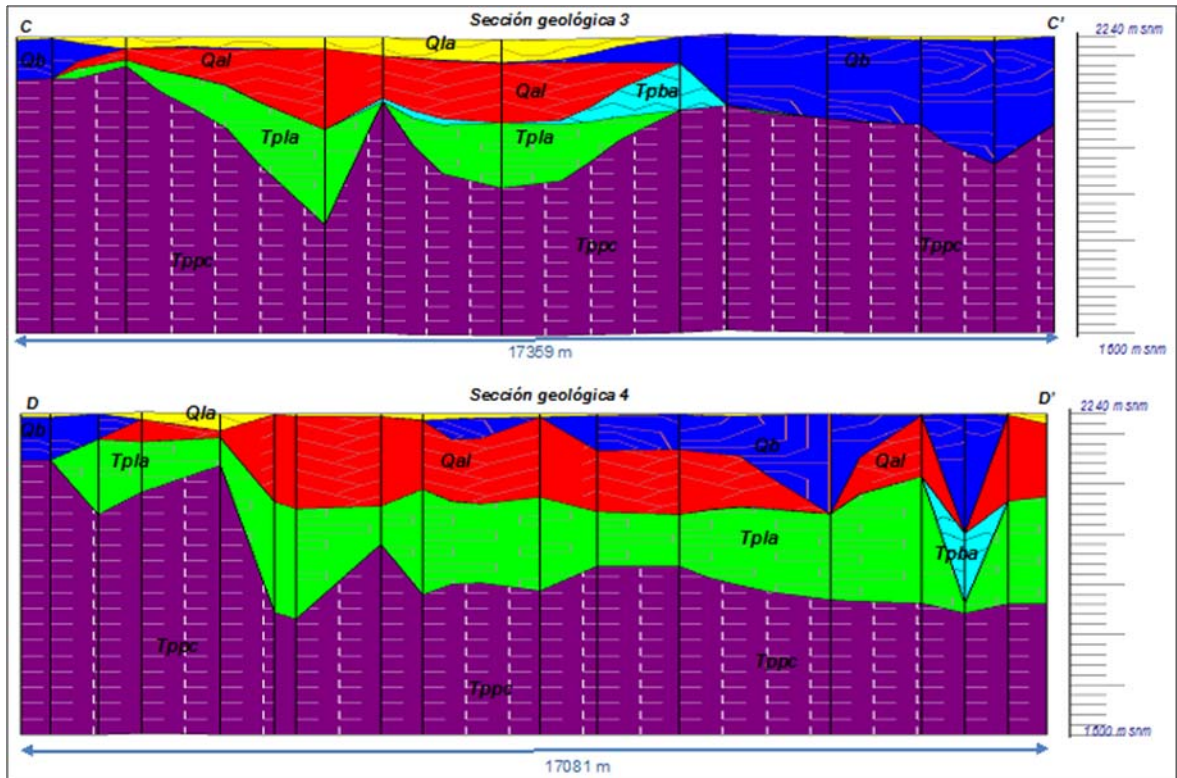


Figura 10. Esquema que interpreta las secciones geológicas 3 y 4.

Geología superficial

Las características geológicas más importantes de la zona de estudio pueden ser divididas en tres (TASA, 1997):

- La zona plana o lacustre: Predominan sedimentos de tipo arcilloso intercalados con arenas de grano fino. En esta zona está ubicado el sistema de canales de la zona chinampera en Xochimilco, principalmente en la parte norte de la Delegación, donde se presentan basaltos fracturados, de gran permeabilidad.
- La zona de transición: Está localizada entre las partes altas y bajas de las partes de las sierras. Se compone de gravas y arenas gruesas, intercaladas con arcillas y pequeñas coladas de basaltos.
- La zona de lomas: Presenta intercalaciones de basaltos, tobas y cenizas volcánicas.

Fisiografía

Resultado de los esfuerzos tectónicos de la FVT, dio lugar a volcanes y domos, que al derramar coladas de lávicas y cenizas, inundaron valles y sepultaron planicies, causando de este modo, la obstrucción del antiguo drenaje y la formación simultánea de cuencas cerradas y lagos someros (SRH, 1964).

El remanente actual del antiguo lago de Xochimilco, es ahora una zona llena de canales y chinampas, limitada por elevaciones topográficas de origen volcánico. Donde el mayor aparato volcánico, es la Sierra de Chichinautzin, al norte se tiene la formación de la Sierra de Santa Catarina y enseguida, al oeste de manera aislada, el Cerro de la Estrella (Figura 13) (Lesser, 2003).

Geomorfología

La planicie lacustre de la Cuenca de México, sobre todo en su parte sur, se convierte en receptora de las corrientes provenientes de las montañas circundantes que en el pasado originaron, mantos freáticos acumulativos. Actualmente, este proceso se ha alterado artificialmente, especialmente, hacia el occidente de la Ciudad de México por el proceso de crecimiento urbano (Lugo, 1984).

También, el sur de la Cuenca de México, es una de las porciones del país, con mayor concentración de volcanes jóvenes. De esta gran cantidad de formas volcánicas se mencionan los que rodean a la zona lacustre de Xochimilco (Lugo, 1984).

Hacia la vertiente sur, se extiende la Sierra de Chichinautzin, cubriendo parcialmente las rocas más antiguas de la Formación Tepoztlán. Forman pendientes fuertes, resultado, aparente del relieve preexistente que cubren. La red fluvial no ha alcanzado un desarrollo que defina cuencas fluviales amplias. Predominan las corrientes de órdenes menores, poca longitud y profundidad. Solo en pequeñas localidades, se concentran porque son favorecidas por factores litológicos, como la presencia de material volcánico no consolidado, en pendientes fuertes (Lugo, 1984).

La Tabla 4, presenta una lista con algunos parámetros, de conos volcánicos importantes, que rodean la zona lacustre hacia el sur.

<i>NOMBRE del volcán</i>	<i>ALTURA en metros</i>	<i>PENDIENTE en grados</i>
La Estrella	2440	15
Yhuallixqui	2410	30
Xaltepec	2450	30
Tetecón	2470	30
Tecuatzí	2610	30
Guadalupe	2750	20
La Magdalena	2940	15
Yololica	3020	30
Zompole	2610	30
Tioca	2650	30
Teuhtli	2710	30
Ocuscayo	3180	30
Cuautzín	3430	15
Toxtepec	2910	30
Oyameyo	3320	30
Chichinautzin	3480	15

Tabla 4. Parámetros de los principales conos volcánicos ubicados en la zona lacustre de Xochimilco (Lugo, 1984).

Las formas de acumulación de material piroclástico, que se extiende al pie de los volcanes jóvenes, como los de la Sierra de Santa Catarina y algunos de la Sierra de Chichinautzin, se presentan como franjas estrechas, desde unas centenas de metros hasta 2 km. También a manera de lenguas, rellenando una depresión anterior del relieve (Lugo, 1984).

Planicie lacustre

La altitud de la planicie es de aproximadamente 2 240 msnm. Las características de humedad y frío del Pleistoceno condicionó el desarrollo de un gran lago mayor. Los sedimentos lacustres provienen en gran parte, de explosiones de los piroclásticas en los volcanes jóvenes de la Cuenca de México; aunque también, de los acarrees producidos por las corrientes montañosas de las sierras de las Cruces y de Río Frío. La pendiente del terreno en la planicie es menor de 0.5° (Lugo, 1984).

Actualmente, la planicie lacustre ocupada por la Zona Metropolitana, prácticamente se encuentra cubierta por una plancha de asfalto, con áreas verdes en pequeñas superficies aisladas. El hundimiento de la Ciudad, se produce en forma diferencial, por lo que la superficie original se encuentra deformada, con diferencias de altura de pocos centímetros, a más de 20 m. En Xochimilco la planicie lacustre se utiliza principalmente como áreas de cultivo (Guerrero et al., 1982).

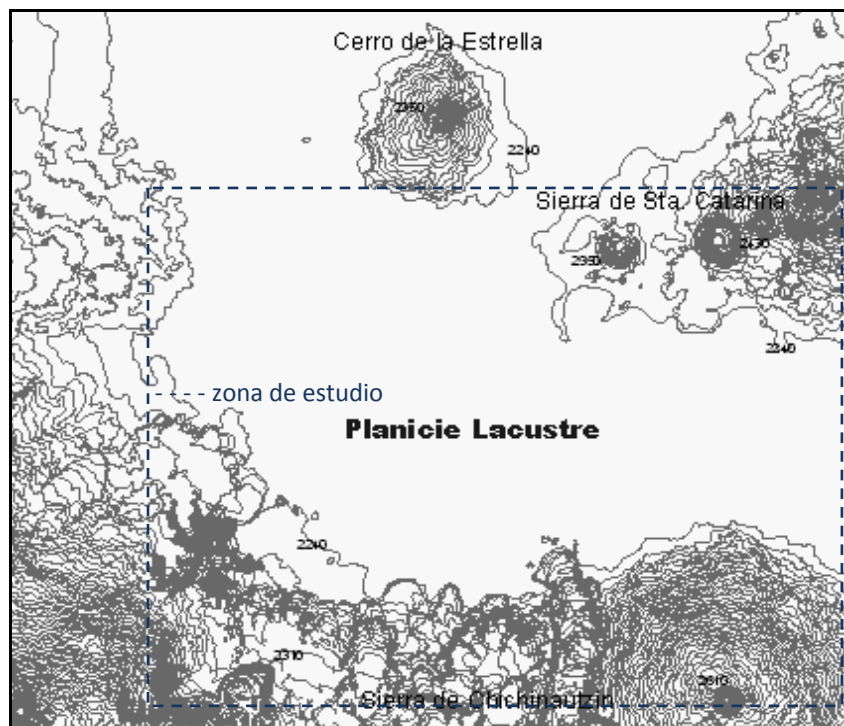


Figura 11. Planicie lacustre al sur de la Cuenca de México, y la topografía que la rodea con las formaciones volcánicas (Modificada de Imagen DXF, de la Ciudad de México, 2000).

Antiguamente, la planicie lacustre, se caracterizaba por albergar a los grandes lagos que fueron parte esencial, del paisaje en la Cuenca de México. En los últimos milenios, el ambiente lacustre se encontraba ya, en un proceso natural de reducción (Lugo, 1984).

Los abastecimientos de agua potable en la zona lacustre de Xochimilco, en esta época, eran explotados solo por la gente de la región. Sus principales actividades eran el desarrollo de cosechas y plantas de ornato. Había 483 pozos artesianos, cuyas aguas eran utilizadas tanto, para el consumo humano, como animal. Existían potentes ojos de agua en el pie de las sierras, al sur del lago y en algunos poblados de la región (MODVM, 1902).

Xochimilco, denominado “el lugar de las flores”, era un lugar de extraordinaria belleza natural y de conocimiento a cerca de los últimos vestigios de un paisaje que durante siglos, caracterizó a la Cuenca de México (Pérez-Fons, 1993).

Canales y lagunas de Xochimilco

En la actualidad, la importancia hidrológica de Xochimilco radica en sus canales y lagunas. Cabe mencionar que no se tienen datos concretos a cerca de sus dimensiones, ya que ha sido un sistema en constante cambio, debido a la intervención de los lugareños (Arcos *et al.*, 1995).

Existen una gran cantidad de canales de agua que rodean a las chinampas. La superficie aproximada de la zona lacustre es de 24 km² y su profundidad máxima de 10 m, en algunos lugares, y 2 m en promedio (Terrones, 2004).

En la Tabla 5, se muestran algunas características de los canales y lagunas de la zona lacustre de Xochimilco. Los canales más importantes son: Cuemanco, Apatlaco, Nacional, Tezhuilo, Apampilco, Japón, La Noria, Amelaco, Atlitic y Tlicuilli y siete grandes lagunas: El Toro, La Virgen, Tlilac, Tlicuilli, Tezhuízotl, Caltongo y Xaltocan (Rebolledo y López, 1987).

	<i>Ancho (m)</i>	<i>Longitud (m)</i>	<i>Color del agua</i>	<i>Profundidad (m)</i>
L. del Toro	500	550	obscura	2.10
L. Tlilac	500	600	café	2
L. Asunción	100	150	obscura	2.25
C. Nacional	30	1500	muy obscura	2
C. Bordo	10	1500	obscura	1.50
C. Tezhuilo	10	1200	café	2
C. Apatlaco	40	1700	café	1.5
C. Cuemanco	75	1500	muy obscura	3.5
C. Caltongo	12	750	muy obscura	3

Tabla 5. Datos algunos de los canales y lagunas de Xochimilco (Modificado de Rebolledo y López, 1987).

Con el propósito de mantener los niveles de agua en la zona lacustre, continuar la actividad productiva de la comunidad y conservar su flora y fauna, el Departamento del Distrito Federal, decide incorporar aguas negras tratadas de la Ciudad de México (González, 1990).

Desde 1959, la primera planta tratadora de agua se ha encargado de proporcionar agua, de mala calidad al sistema alterando el ecosistema, lo que se ha visto reflejado en el paisaje de Xochimilco, con el pasar de los años (Romero, 1993).

Para el riego de hortalizas, se utiliza agua tratada. Se tienen reportes de análisis del agua, de los canales de Xochimilco, de la DGOH, y se observa que estas aguas presentan bacterias patógenas; concretamente hay 10 000 coliformes en cada 100 ml (Olabode, 2000).

Las principales fuentes contaminantes de los canales de Xochimilco, son de clínicas, hospitales y laboratorios, ubicados dentro de la jurisdicción de la Delegación, desechos producto de establos y porquerizas, desechos agrícolas producidos por los mercados de plantas, flores y hortalizas, alimentos, y desechos domésticos, producidos por los productores, comerciantes y habitantes (Vargas, 2003).

Plantas de tratamiento de aguas negras

Las aguas tratadas de las plantas de tratamiento (cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo) vertidas en los canales, cumplen el objetivo principal de mantener los niveles en la zona lacustre de Xochimilco. Sin embargo presentan contenidos de metales pesados, así como otros compuestos tóxicos inorgánicos además de bacterias y virus (Sandoval, 2003).

Contaminan el agua al mezclarse con las descargas domésticas, desechos de ganado de traspatio y de las actividades turísticas. Los diferentes niveles del lecho lacustre hacen que el agua negra fluya rápidamente hacia las partes más bajas, inundándolas (Aguilera, 1987).

La estabilidad que existía anteriormente en el sistema lacustre se ha modificado rápidamente por el contenido de las aguas de los canales y lagunas en Xochimilco, esto se observa principalmente en la desaparición de la mayoría de las especies de flora y fauna, que existían en la zona de Xochimilco. (Sandoval, 2003).

A continuación se presentan en la Tabla 6, los gastos registrados por las plantas de tratamiento en función y el estimado de aguas negras de descargas domiciliarias, a lo largo del tiempo.

Año	Plantas de tratamiento			Hogares
	Cerro de la Estrella	San Luis Tlaxialtemalco	San Lorenzo	Aguas negras
1985	10861.98	-	-	1720.29
1986	10861.98	-	-	1731.33
1987	10861.98	-	-	1742.36
1988	10861.98	-	-	1753.4
1989	10861.98	3468.96	-	1746.44
1990	19720.09	1611.16	-	1775.48
1991	22032.63	1612.83	-	1786.51
1992	23909.1	1404.79	-	1797.55
1993	27372.87	2312.77	-	1808.59
1994	32374.84	3283.11	-	1819.63
1995	27938.74	2116.35	-	1830.66
1996	28962.27	2220.84	-	1841.7
1997	29227.8	2275.12	-	1852.74
1998	26947.61	1880.15	-	1863.78
1999	25255.8	1662	632.45	1874.82
2000	26646.45	1075.47	632.45	1885.85
2001	27137.29	1485.04	632.45	1896.89
2002	25124.06	851.13	632.45	1907.93
2003	23668.88	1046.5	623.45	1918.97

Tabla 6. Cantidad en agua ($\times 10^3 \text{m}^3$) vertida en los canales a lo largo de los años (Tomada de CAGIGAS, 2003).

Características hidrogeológicas del acuífero

Basado en la información geológica e hidrogeológica, el acuífero de la zona lacustre de Xochimilco, propuesto para este trabajo, está formado por tres estratos (Figura 13):

- Acuitardo superior: Constituido principalmente por materiales arcillosos, con un espesor en promedio de 20 m. Desde una altura aproximada de 2240 msnm.
- Acuífero principal: Constituido por materiales granulares y arcillosos, con un espesor en promedio de 400 m. Esta unidad, se encuentra actualmente en explotación.

- Acuífero profundo: Compuesto por rocas volcánicas fracturadas y con espesores en promedio de 200 m. Cuya base esta propuesta hasta los 1600 msnm.

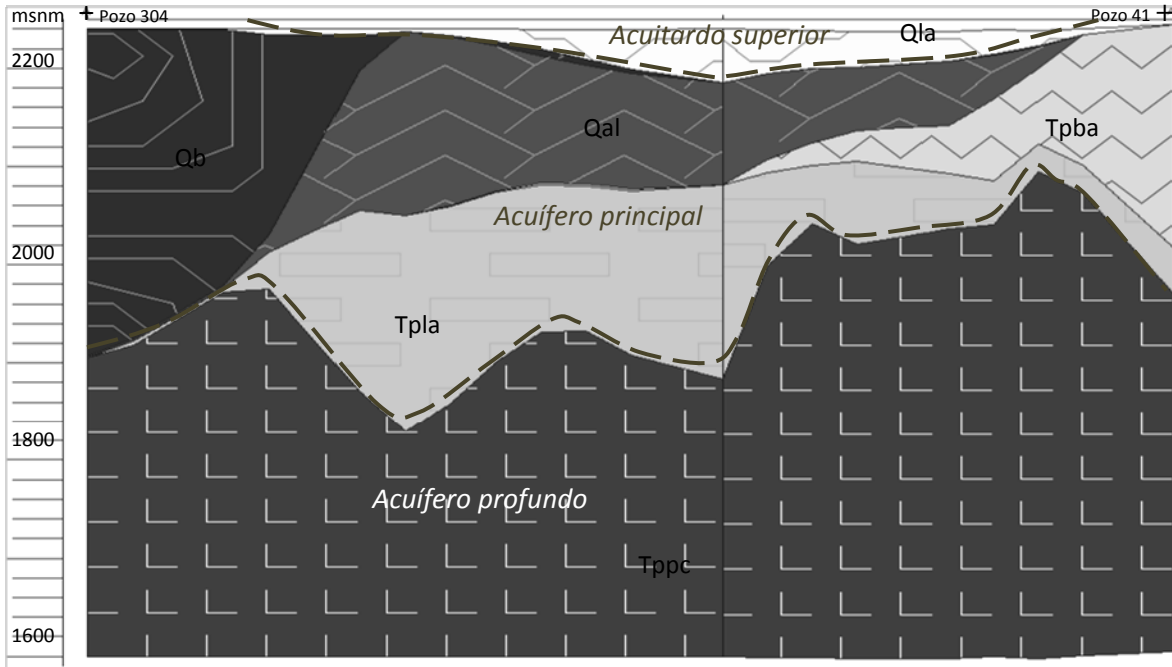


Figura 13. Esquema de la ubicación de las unidades hidrogeológicas del acuífero de estudio.

Acuitardo superior

Los depósitos lacustres del Cuaternario (Qla), funcionan como un acuitardo, debido a la presencia de arcillas, altamente compresibles, con una gran cantidad de agua. Las arcillas, semiconfinan al acuífero principal subyacente bombeado, transmitiéndole agua muy lentamente. La subsecuente pérdida de presión de agua y la alta compresibilidad de las arcillas, son los factores que han provocado la subsidencia del terreno en la región (Marzal y Mazarí, 1959).

En el pasado, esta capa se explotaba para el abastecimiento de agua potable hacia la Ciudad de México. Los espesores del acuitardo superior, comprenden desde la superficie del terreno, hasta la base de las arcillas lacustres del Cuaternario teniendo en promedio un valor de 20 m. El espesor máximo del acuitardo, se presenta al centro de la planicie, con un promedio de 60 m, y disminuye hacia las zonas montañosas con espesores de 2 m (Zúñiga, 2003).

La conductividad hidráulica (k), para el acuitardo superior varía de 8.64 E^{-2} y 8.64 E^{-4} m/d. El coeficiente de almacenamiento (S) tiene un valor de 0.012 (Marzal y Mazarí, 1959).

Acuífero principal

Actualmente se encuentra en explotación intensiva, es la zona principal donde los pozos profundos extraen el agua. Está compuesto por las siguientes unidades hidrogeológicas (DDF, 1994):

- Depósitos aluviales del Cuaternario (Qal)
- Depósitos lacustres del Plioceno Inferior (Tpla)

En las partes someras de las estructuras volcánicas de las Sierras de Chichinautzin, Santa Catarina y el cerro de la Estrella, también el acuífero principal incluye las siguientes unidades hidrogeológicas (Zúñiga, 2003):

- Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb)
- Rocas volcánicas basálticas-andesíticas del Plioceno Superior (Tpba)

El acuífero principal, se extiende en toda la planicie lacustre de Xochimilco, hasta las zonas montañosas al norte y sur. Es de tipo confinado por las zonas montañosas y semiconfinado hacia la parte central de la planicie por el acuitardo superior (DDF, 1987).

Para efectos del proceso de modelación, el comportamiento del acuífero se considerará libre y semiconfinado, debido al efecto del bombeo que ha provocado que el nivel piezométrico descienda por debajo de la base del acuitardo superior. La morfología y granulometría en el acuífero actualmente explotado, es de sedimentos gruesos y aluviales finos. Tiene un espesor aproximado de 400 m, a partir de los depósitos lacustres del Cuaternario (Qla) y su frontera inferior corresponde a la cima de la secuencia estratificada (acuífero profundo) (DDF, 1987).

La conductividad hidráulica (k), para el acuífero principal varía de 1.296 E^{-4} y 30.24 m/d. El coeficiente de almacenamiento (S) tiene un valor de 0.20 (DDF, 1994).

Acuífero profundo

Se encuentra representado por la secuencia volcánica estratificada (Tppc). Sin embargo, a pesar de estar fracturada esta capa, tiene baja permeabilidad, de acuerdo con los pozos perforados en esta secuencia (DRNIGF, 1992).

En la zona de estudio, solo tenemos un pozo que extrae agua, de la capa Tppc, el PER-16. Es un pozo profundo de más de 1000 m de profundidad (DDF, 1994).

Los registros geofísicos indican que la permeabilidad en la secuencia estratificada se reduce, por el efecto de compresión litostática. Tiene un espesor en promedio de 200 m, contiene materiales volcánicos permeables. La conductividad hidráulica (k), para el acuífero profundo es de 31.97 m/d. El coeficiente de almacenamiento (S) tiene un valor de 0.05 (DDF, 1994).

Zonas de recarga y sistema de flujo

La región de Xochimilco se distinguió antiguamente, por contar con múltiples aportes de agua. El particular funcionamiento de la Cuenca de México, permitió que el líquido infiltrado durante años de precipitación se fuera almacenando en el manto acuífero, teniendo así, un cuerpo de agua subterráneo que conforme se fue saturando, derramó las aguas de sus profundidades y dio paso a la formación de numerosos ojos de agua o manantiales (Cisneros, 2005).

Gracias a ellos el lago de Xochimilco no se vio afectado, hasta la desecación registrada en el resto de los lagos de la Cuenca de México. Los rasgos edáficos de las serranías meridionales en que predominan formaciones basálticas y andesíticas, explican la alta permeabilidad del terreno, con lo cual las aguas de siglos de precipitación pluvial se fueron infiltrando hasta la base de la serranía, donde desde hace varios años se encuentra un aporte de agua donde se colocaron pozos de extracción de agua (Loehnberg, 1959).

Zonas de recarga

El carácter, de alta permeabilidad de las sierras en la zona de estudio, propicia una recarga descendente a través de estas estructuras. La más importante zona de recarga en la zona lacustre de Xochimilco, es la Sierra de Chichinautzin (Figura 14). La mayor parte del flujo de recarga se desplaza en forma lateral descendente a través de basaltos fracturados, y hacia el sur de la Cuenca de México. De esta forma es posible que una parte de la recarga se transmita a niveles más profundos, especialmente en zonas de mayor carga hidráulica (DDF, 1994).

En el área lacustre, por las plantas tratadoras de aguas residuales, en los distintos puntos al sur de los canales, incorpora un volumen a los canales y lagunas de Xochimilco. Se aprovecha el mayor gradiente en altura en la parte sur. De esta forma, el agua fluye por los canales hacia el norte, teniendo en algunas ocasiones (en los meses de lluvias), derrames en los vertedores de San Sebastián y Japón (CAGIGAS, 2003).



Figura 14. Diagrama del flujo de agua en la zona de estudio (Imagen Satelital, LANDSAT 7B, Ciudad de México 2000).

Sistema de flujo

Las características del sistema de flujo de las aguas subterráneas, se definieron considerando los siguientes aspectos (DGCOH, 1987):

- a) La antigua comunicación topográfica (diferencia de alturas) en los lagos.
- b) Geología del subsuelo.
- c) Distribución e importancia de las zonas de recarga.
- d) Distribución de los niveles estáticos, afectados por el bombeo.

Hidrografía

La mayor parte de las corrientes en Xochimilco, son de escurrimiento intermitente, ya que sólo tienen caudales importantes después de fuertes precipitaciones. En los días comprendidos entre éstas, dichos caudales disminuyen notablemente, llegando en muchas ocasiones a reducirse a cero (SRH, 1964).

Las serranías de la región de Xochimilco, Tlahuác y Chalco, presentan gran permeabilidad, están constituidas por formaciones basálticas esponjosas y fracturadas, y presentan precipitaciones abundantes. Aunque el grupo de ríos que baja de la sierra de Chichinautzin, tiene como característica sobresaliente la escasez de escurrimiento superficial, observándose la ausencia casi total de drenaje superficial (Berbeyer, 1961).

En la región de Xochimilco se localizan los siguientes arroyos y ríos:

Arroyos

San Gregorio: Surge en las laderas del cerro Cuatzin. Está limitado al oriente por la cuenca del río Milpa Alta y al poniente, por la cuenca del río San Lucas. Sus escurrimientos superficiales son prácticamente nulos; no así los subterráneos, pues en la parte baja y ya en la planicie de Xochimilco emergían manantiales importantes, como el de San Gregorio (SRH, 1964).

Santiago: Inicia en las laderas del cerro Hauptépetl. Está limitado al oriente por la cuenca del río San Lucas y al poniente por la cuenca del río San Buenaventura (Rebolledo y López, 1987).

Debido a que los escurrimientos superficiales que provienen de los cerros andesíticos se pierden al entrar en la zona basáltica, los escurrimientos de este río son escasos y de poca importancia (Rebolledo y López, 1987).

Ríos

San Lucas: Nace en la sierra de Chichinautzin. Está limitado al oriente por la cuenca del arroyo San Gregorio y al poniente por las cuencas del arroyo Santiago y San Buenaventura. Su escurrimiento superficial es muy escaso, en cambio el potencial subterráneo es grande y en la parte baja afloraban varios manantiales que fueron captados por el acueducto de Xochimilco para abastecer a la Ciudad de México (SRH, 1964).

San Buenaventura: Se origina en las laderas del Ajusco, limitado al oriente por las cuencas de los ríos San Lucas y Santiago y al poniente por la cuenca del río Eslava. Corre en un cauce artificial hasta desaguar al Canal Nacional, alimentador de la zona lacustre de Xochimilco (González, 1990).

Manantiales

Los manantiales representan puntos de descarga natural de los acuíferos. A lo largo del tiempo, los caudales de los manantiales de la zona de estudio reflejan el efecto de recarga del acuífero, aunque amortiguado como consecuencia del gran efecto regulador de los embalses subterráneos (Bryan, 1919).

La persona que estudio más detalladamente los ojos de agua en la antigua región de Xochimilco, fue el Dr. Antonio Peñafiel. Durante meses realizó estudios en su laboratorio, y visitas a los manantiales del sur de la Cuenca de México (Tabla 7).

Sus trabajos reportaron datos, que a la Ciudad de México le servirían para entubar los manantiales de Xochimilco, y así, satisfacer su creciente demanda de agua potable a principios del siglo XX (Peñafiel, 1884).

En 1902, se inicia la captación de manantiales regionales y la construcción del acueducto de Xochimilco, la extracción de agua, fue de 2100 l/s. Gradualmente el gasto fue incrementando, hasta que en 1931, el volumen de agua bombeado hacia la Ciudad de México era de 3100 l/s. Este gasto de extracción se mantuvo en este promedio, hasta que finalmente en 1961 los manantiales de Xochimilco se secaron (Terrones, 2004).

Pozos de extracción

Los pozos perforados en la zona de estudio tienen profundidades de 63 a 440 m, a excepción de los localizados en periférico, donde su profundidad es mayor, alcanzando los 1000 m. La calidad del agua extraída, es excelente en la mayoría de los pozos localizados al pie de la Sierra de Chichinautzin. En algunas regiones de la zona, la calidad del agua es deficiente, debido principalmente desechos sólidos arrojados en la superficie (TASA, 1997).

Los datos de extracción de agua potable fueron tomados de la DGCOH (2005) y de CNA (2008), los nombres y ubicaciones de cada uno de los abastecimientos se utilizaron en la simulación (Anexo 2).

Nombre del manantial	Medidas	Canal o Acolote	Características del agua
Ojo de agua El Niño, en Tlalpan	1.5 m ²	De corto caudal, carecía de fuerza ascendente suficiente para derramarse fuera de la alcantarilla que lo contenía	Transparente, limpia, sabor fresco y agradable.
Ototenco en Tepepan	s.d.	s.d.	Transparente, limpia, sabor agradable. Empleada como agua potable y el lavado.
Ojo de agua de San Diego en Tepepan	s.d.	s.d.	Transparente, limpia, sabor agradable. Empleada como agua potable y el lavado.
Manantial de San Juan en Tepepan	Brocal rectangular de mampostería de 6 m ²	s.d.	s.d.
Alberca de la Noria	Construcción circular de mampostería de 15 m de diámetro. Dentro de ésta, una vertiente de 10 m de diámetro y 1.5 de profundidad.	Los derrames se dirigen hacia la laguna de Xochimilco en un canal de 5 m de ancho y 1 m de profundidad con la velocidad de 1 m ³ por 5 seg.	s.d.
Ojo de agua Quetzalapa, barrio de Xaltocan, Xochimilco	Cuenca circular de 20 m diámetro y 4.04 m de profundidad	El caudal corre hacia los pantanos insalubres del sur de Xochimilco por un Acolote de 6 m de ancho por 1 m de profundidad a velocidad de de 1 m ³ por 4 seg.	Transparencia perfecta, sabor agradable.
Manantial de Nativitas	Formato de dos vertientes enormes y caudalosas: la 1ª con 30 m de ancho y 7.73 m de profundidad; la 2ª con 25 m de diámetro y 7.87 m de profundidad	El caudal se dirige hacia la laguna por un acolote de 8m de ancho por 2 m de profundidad	Transparencia perfecta, sabor agradable.
Manantial de Santa Cruz Acapulco	Cuenca de 30 m de diámetro 4.91 m de fondo	Su caudal corre por un Acolote de 10 m de ancho por 1 m de profundidad	Transparencia perfecta sabor agradable.
Manantial de San Gregorio Atlapulco	Cuenca de 15 m de ancho y 9.14 m de profundidad	Derrama por un caudal de 6 m de ancho por 2 m de profundidad	Transparencia perfecta sabor agradable.
Manantial de San Luis Tlaxialtemalco	Ojo de agua de 20 m de ancho y 11.75 m de profundidad	Derrama por un canal de 10 m de ancho por 2 m de profundidad	Transparencia perfecta sabor agradable.
Manantial de Tuyahualco	10 m de ancho por 5.74 de profundidad	No pudo apreciarse su derrame porque el manantial estaba dentro del mismo lago	Transparencia perfecta sabor agradable.

Tabla 7. Manantiales que antiguamente existían y que fueron estudiados por Peñafiel, determinando algunas características y calidad de su agua (Modificado de Aréchiga, 2004).

Piezometría

Como es conocido, el acuífero que subyace a la Ciudad de México es la principal fuente abastecimiento de agua potable para esta urbe. La extracción de agua subterránea se realiza por medio de pozos profundos. La profundidad de los niveles del agua muestra, entre otras cosas, las constantes modificaciones o fluctuaciones que se generan por su explotación (Berbeyer, 1961).

Para el año de 1985 en la parte sur alrededor de Xochimilco, el nivel de profundidad del agua fluctuaba entre 30 y 40 m, y para 1990 a entre 30 y 50 m de profundidad. En el año de 2003, se contempla un funcionamiento similar con 40 a 60 m de profundidad, al pie de la Sierra de Chichinautzin. De acuerdo con su posición topográfica algunos pozos ubicados en cotas altas, llegaban a registrar profundidades al nivel del agua de hasta 140 m (Lesser, 2003).

DESCRIPCION DE LA ZONA

Generalidades

El propósito de este trabajo, es reconstruir el comportamiento hidrogeológico que prevalecía en la zona del antiguo lago de Xochimilco. En la actualidad, el remanente del lago de Xochimilco abarca no sólo el perímetro de la Delegación del mismo nombre, sino otros poblados del Distrito Federal, en México (Figura 15). Dentro de la zona de estudio, se comprenden lugares con pozos de extracción, zonas de escurrimiento entre otras características de las Delegaciones de Coyoacán, Tlalpan, Tláhuac e Iztapalapa.

Ubicación de la zona de estudio

Se encuentra localizada al sur de la Cuenca de México, en las coordenadas latitud UTM = 2123648 y 2140648, y en longitud UTM = 483680 y 498130, con un área de 245.65 km². Tiene una altura promedio en la planicie lacustre de 2240 msnm. Se encuentra rodeada por formaciones volcánicas, al sur se localiza la Sierra de Chichinautzin, al noreste la Sierra de Santa Catarina y al norte abarca una pequeña parte del Cerro de la Estrella (Figura 16) (INEGI, 2001).



Figura 16. Imagen que muestra la delimitación del área de estudio y los lugares que rodean a la zona lacustre de Xochimilco (Imagen Satelital, LANDSAT 7B, Ciudad de México 2000).

Cobertura vegetal

Existen áreas verdes con una superficie aproximada de 101.08 km² prácticamente un 50% del área total repartidas con extensas zonas de chinampas, parques, jardines y camellones. Destacando por su importancia los viveros de San Luis Tlaxialtemalco y Netzahualcóyotl; el Bosque de Nativitas; el Deportivo Xochimilco; así como los camellones centrales de las vialidades prolongación División del Norte y Anillo Periférico (Salas, 1998).

Área urbana

El desarrollo urbano crece aceleradamente, ocupando una extensión aproximada de 145 km², lo que representa el 59% del área de estudio. Además, en distintas Colonias de Xochimilco, un aproximado de 24400 habitantes no cuentan con agua potable y 14500 habitantes carecen de drenaje en sus hogares (DGCOH, 2005).

Agricultura

Se divide en dos grupos. Uno son los cultivos cíclicos, donde se tienen productos como el maíz, avena, amaranto, frijol, espinaca, entre otros, con una superficie de siembra de 4134 ha. Y los cultivos perennes de noche buena, higo, peral, flores, manzano, ciruelo, entre otros, con una superficie de siembra de 44 ha (DGCOH, 2005).

Red de canales

El volumen total de las aguas tratadas de las plantas de cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo solo se infiltra el 2 %. Los lugares donde se vierten las aguas para mantener los niveles en canales, están localizados prácticamente al sur de la zona chinampera (algunos lugares son: Caltongo Corena, México 70, La Fabrica San Luis, San Lorenzo, Canal 55, Nuevo León, Zacapa, Josefa Ortiz, Zelada, Apatlaco, entre otros), esta estrategia aprovecha la mayor altura del terreno al sur de la zona lacustre, y por gravedad se distribuyen las aguas en toda el área, teniendo un 17.4% en perdidas por inundaciones y escurrimientos (CGTP, 1999).

Objetivos

Objetivo general

- Caracterizar geológica e hidrogeológicamente la zona lacustre de Xochimilco y establecer un modelo matemático computacional, para simular el comportamiento del sistema acuífero a lo largo de diferentes periodos y escenarios de explotación.

Objetivos particulares

- Realizar simulaciones para diferentes etapas, de la evolución de la zona lacustre de Xochimilco:
 - Establecer la reconstrucción de la zona del antiguo lago de Xochimilco en 1900 y su funcionamiento hidrogeológico.
 - Reproducir el funcionamiento hidrogeológico de la zona lacustre de Xochimilco para diferentes épocas, desde el año de 1910 hasta 2003. Estableciendo la comparación, con la elevación de niveles estáticos reportados.
 - Establecer escenarios a futuro para predecir el funcionamiento hidrogeológico, y conocer el desarrollo del paisaje en la zona lacustre de Xochimilco, bajo distintos regímenes de explotación.

METODOLOGÍA

GENERALIDADES PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

Para el desarrollo de los modelos se requiere la participación de grupos multidisciplinarios, donde se consideren diferentes aspectos del medio físico, la interacción con el medio ambiente y la influencia de las actividades del hombre; siendo necesario conocer las limitaciones computacionales de los programas y equipos utilizados (Escolero, 2004).

Para construir un modelo computacional, es necesario seguir cierta metodología (Figura 17). La nuestra es la siguiente:

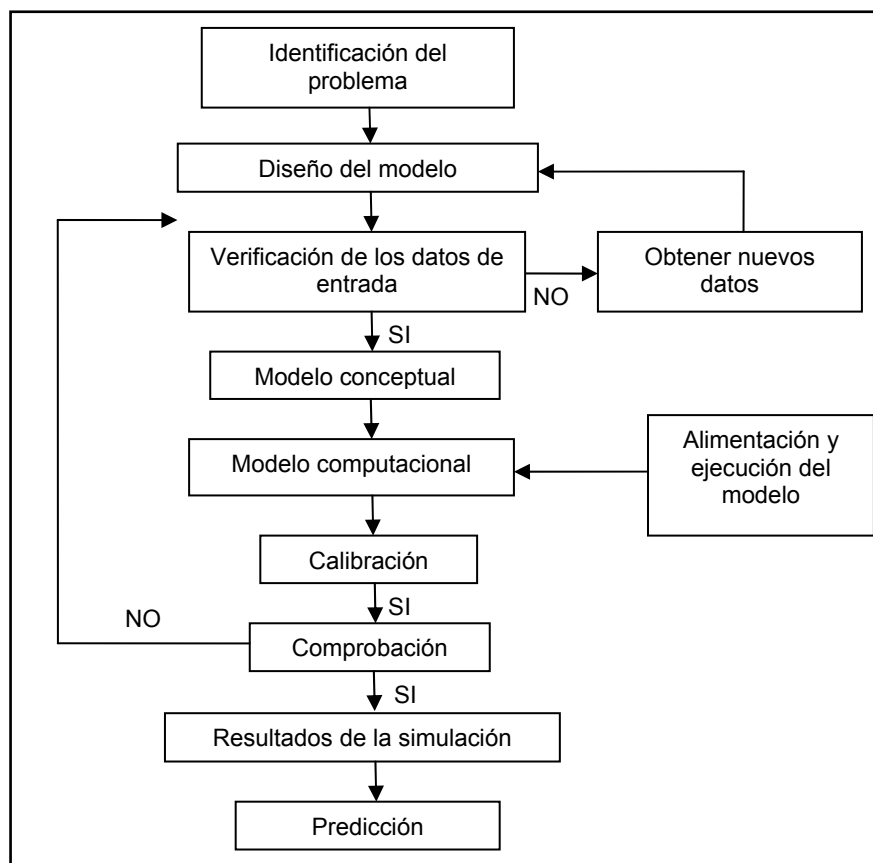


Figura 17. Pasos a seguir para el desarrollo del modelo matemático computacional, de agua subterránea (Modificado de Anderson and Woessner, 1992).

- Identificación del problema: Se establecen los objetivos que se desea cumplir, delimitar el área de interés y el marco en el que se desarrollará el estudio (área a modelar), junto con los alcances y expectativas del modelo (Schwartz and Zhang, 2003).

- Diseño del modelo: Establecer el nivel de detalle deseado de acuerdo a la información recopilada, la escala de discretización (tamaño de las celdas), los periodos de tiempo a simular, se determinan las fronteras y condiciones iniciales, la selección de valores para el acuífero y los periodos hidrológicos (USGS, 2007).
- Verificación de los datos de entrada: Selecciona la información de acuerdo a los distintos aspectos físicos involucrados en el funcionamiento del sistema (hidrología, geología, topografía, hidrogeología, explotación por pozos, etc.), además de observaciones de flujo (carga hidráulica, gradiente hidráulico, flujo) y transporte en el tiempo (Anderson and Woessner, 1992).
- Modelo conceptual: A partir de los datos recopilados, se desarrolla un modelo simplificado de la realidad que sea capaz de representar las relaciones entre los distintos procesos involucrados en el funcionamiento del acuífero. Se definen los aspectos físicos relevantes a considerar en la implementación del modelo. Se idealiza y simplifica el fenómeno observado, se analizan las condiciones y procesos más importantes que ocurren en el lugar de interés (Hsieh *et al.*, 2001).
- Modelo computacional: Consiste en la representación matemática del problema de flujo de agua subterránea, define el problema por medio de ecuaciones diferenciales a resolver (Anderson and Woessner, 1992).
- Calibración: Esta etapa de la modelación, consiste en asignar los valores de parámetros que permitirán ajustar los calculados a los observados. En este apartado se incluye al análisis de sensibilidad. Entre los parámetros a calibrar se consideran la carga hidráulica, la conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, condiciones de frontera (Woessner and Anderson, 1990).
- Comprobación: Confirmación de datos del modelo obtenido con los reales. En caso de no estar de acuerdo, se debe regresar al diseño del modelo y repetir el procedimiento. La validación de los datos observados, con valores predichos con el modelo se harán para un período diferente al usado en la etapa de calibración (Woessner and Anderson, 1990).
- Resultados de la simulación: Una vez aceptado el modelo, se presentan los datos (Anderson and Woessner, 1992).

- Predicción: Es la etapa predictiva del modelo, puede ser usado para simular las situaciones a las que podría estar expuesto el sistema (máximo bombeo permisible, disminución de la recarga, etc.). Cuantifica las respuestas del sistema en diferentes eventos futuros (Schwartz and Zhang, 2003).

Modelo de flujo de agua subterránea

El modelo propuesto resuelve el movimiento tridimensional de agua subterránea, de densidad constante a través un material de medio poroso, mediante la ecuación diferencial parcial de flujo (Rushton, 2003):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}\right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

Donde K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} pueden ser funciones del espacio y W puede ser función del tiempo y del espacio. La ecuación (1) deriva de una combinación matemática entre el balance de agua y la Ley de Darcy.

La derivación tradicionalmente es referida a un cubo de material poroso (celda en el modelo), siendo lo bastante grande para representar las propiedades del medio poroso y lo suficientemente pequeño para mostrar los cambios de carga, cuando el volumen es relativamente chico (Figura 18) (Fitts, 2002).

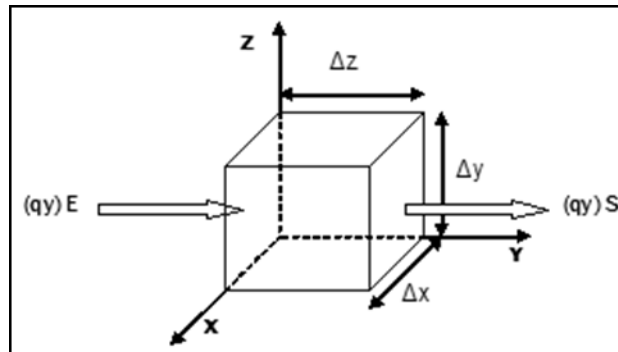


Figura 18. Se representa el volumen, usado en la derivación de la ecuación del movimiento tridimensional de agua subterránea, en un medio poroso (Modificada de Fitts, 2002).

El sistema acuífero real es representado por medio de un arreglo de bloques llamados celdas, cuyas ubicaciones se describen en términos de filas, columnas y capas (Figura 19). Dentro de cada celda hay un punto llamado nodo en el cual se calcula la carga. El modelo computacional utilizado emplea el sistema de bloque centrado (USGS, 2007).

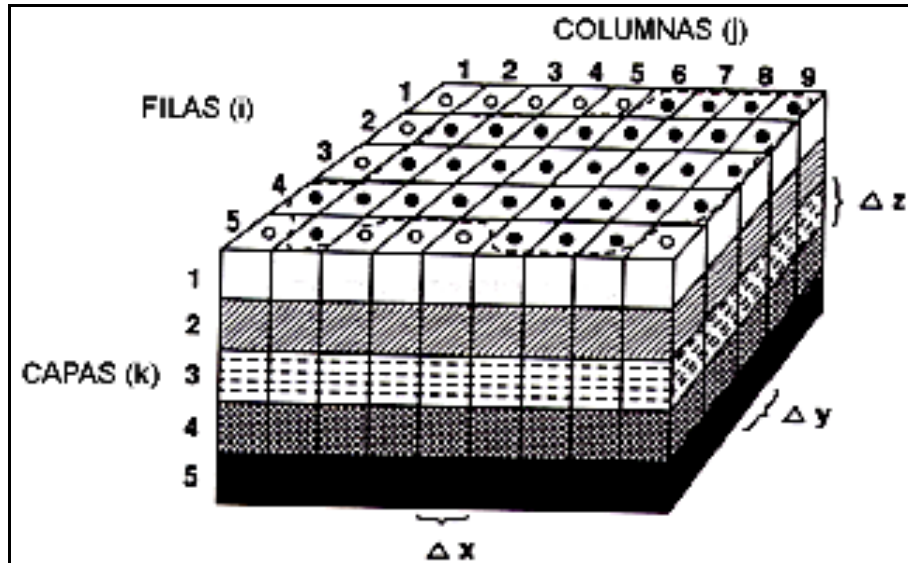


Figura 19. Se muestra la interpretación espacial de un sistema acuífero (Tomada de USGS, 2007).

Método de diferencias finitas

La ecuación utilizada en este modelo de simulación, es resuelta por el método numérico de diferencias finitas. Conocidas las condiciones de frontera, la distribución de cargas iniciales, los parámetros hidráulicos y las cargas externas sobre el acuífero, es posible predecir las distribuciones de carga en tiempos sucesivos. Una ecuación así, puede ser definida para cada celda activa, en cada paso de tiempo de la simulación. Los flujos de entrada o salida de la celda debido a procesos externos, tales como la acción de ríos, drenes, áreas de recarga, evapotranspiración o pozos de bombeo o inyección, requieren de términos adicionales. Estos flujos pueden ser dependientes o independientes de la carga en la celda que recibe el flujo (Pinder, 2002).

MODFLOW 2000

En este trabajo se utilizó el paquete MODFLOW 2000 (*versión 1. 18. 01*). Este es un modelo de flujo de aguas subterráneas en tres dimensiones, elaborado por la U.S. Geological Survey (USGS), resuelve la ecuación general de flujo por diferencias finitas (Harbaugh y McDonald, 1996).

Nombre	Tipo	Técnica de solución
MODFLOW 2000	3D diferencias finitas	SIP (strongly implicit procedure)
		SSOR (slice successive over-relaxation)

Tabla 8. Métodos utilizados por el paquete MODFLOW 2000 (USGS, 2007).

Al emplear el MODFLOW 2000, se realizan pequeñas discretizaciones a distintos volúmenes y el modelo calcula la cantidad de agua que pasa a través de estos cuerpos, que son llamadas celdas de diferencias finitas y cada una cuenta con seis caras (Figura 20). El paquete MODFLOW 2000 genera una solución en tres dimensiones del sistema a modelar, con una secuencia ordenada de sus capas. En el modelo planteado la malla está formada por renglones y columnas. Los valores en la malla en la dirección horizontal deben ser los mismos en cada capa (Harbaugh y McDonald, 1996).

Los datos de entrada en el modelo no requieren establecer un arreglo para Δz , en cada posición Δz es indirectamente especificada. Una característica de este paquete computacional, es la capacidad de poder calcular la transmisividad de las capas (Anderson and Woessner, 1992).

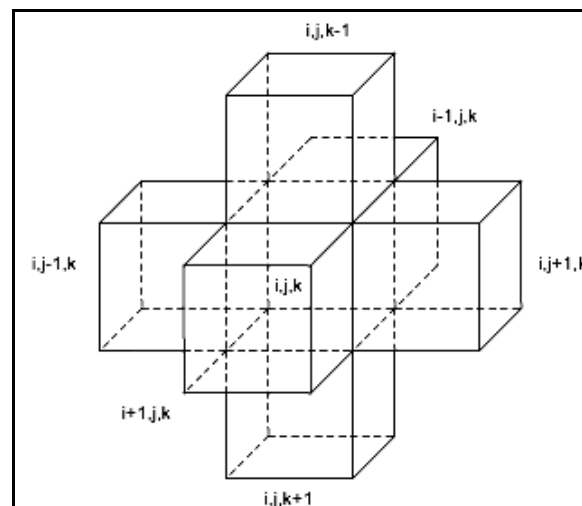


Figura 20. Celda i, j, k e índices utilizados para sus seis celdas vecinas (USGS, 2007).

El paquete utiliza un preprocesador de fácil manejo (MFI2K) para la entrada de datos. Ahí se plantean todas las variables a modelar, y que van desde el número de renglones y columnas, los valores de conductividad hidráulica, gasto y ubicación de pozos entre varios otros parámetros, según lo que se intente simular. Para su utilización el usuario debe tener conocimientos básicos en la modelación del comportamiento de las aguas subterráneas (Harbaugh y McDonald, 1996).

La interfase gráfica para la visualización de los datos terminados del MODFLOW 2000, es proporcionada por el Model Viewer 1.2. Es un programa computacional que permite interpretar en tres dimensiones los resultados de un modelo en aguas subterráneas (Model Viewer, 2002).

La escala de datos (como pueden ser carga hidráulica o concentración de solutos) se muestran en una superficie sólida como un bloque, usando colores de rojo a azul espectral para representar la escala de valores. Model Viewer puede mostrar las celdas de la malla, cortes del acuífero o modelos de recarga, pozos, ríos entre otras características activadas en la opción *model features* (Model Viewer, 2002).

MODELO CONCEPTUAL

El propósito de establecer el modelo conceptual, es proponer una simplificación de la realidad, y organizar, de una manera adecuada, la relación con los datos de campo. Entonces el sistema que será analizado resulta más fácil de entender ya que una reconstrucción completa del sistema en la realidad, no es sencilla. El proceso para la formulación de las fronteras del modelo conceptual se inicia con la definición del área de interés (Banks, 1993).

Un modelo conceptual en estudios de aguas subterráneas usualmente involucra (Schwartz and Zhang, 2003):

- Un área de simulación, definida y sus capas geológicas.
- La división del área de estudio en zonas, (en este caso serán distintas épocas a lo largo del tiempo), las cuales tendrán propiedades hidráulicas particulares.
- Incluir valores hidrogeológicos confiables, en la región de estudio, de cada componente del sistema. Como son ríos, pozos, recarga, y demás.
- Señalar las condiciones de frontera, para el área de simulación.
- Determinar los valores de carga hidráulica, en el área de estudio.
- Habilitar o inhabilitar las zonas a simular dentro del área de estudio. Por medio de las celdas activas e inactivas del modelo.

Área de estudio a modelar

Como se ha comentado anteriormente, la zona a modelar, es la lacustre de Xochimilco. Se encuentra en la región sur de la Cuenca de México, y tiene una gran importancia hidrogeológica. El área a simular tiene unas dimensiones de norte a sur de 17 km por 14.45 km de este a oeste.



Figura 22. Ubicación del área ocupada por el antiguo lago de Xochimilco y sus principales manantiales, en el área de estudio (Imagen Satelital, LANDSAT 7B, Ciudad de México 2000).

Modelo hidrogeológico de capas

A partir del conocimiento geológico e hidrogeológico de la zona, el modelo propuesto constará de cuatro capas (Figura 23), cuyas características se muestran en la Tabla 9. En las capas los valores geológicos de conductividad hidráulica no tienen un solo valor, este va cambiando de acuerdo a los depósitos y rocas que la constituyen y también de acuerdo a su distribución.

No. de capa	Unidades geológicas	Materiales	Altura prom. (msnm)	Espesor prom. (m)	Acuífero
1	Qla, Qal, Tpba, Qb	Arcillosos, granulares y volcánicos	2240	19	Acuitardo superior
2	Qal, Tpba, Qb	Granulares y volcánicos	2220	118	Acuífero principal
3	Qal, Tpla, Tpba, Qb	Granulares, arcillosos y volcánicos	2101	138	Acuífero principal
4	Tppc	Volcánicos	1963	363	Acuífero profundo

Tabla 9. Muestra las características de las capas que forman el esqueleto del modelo.

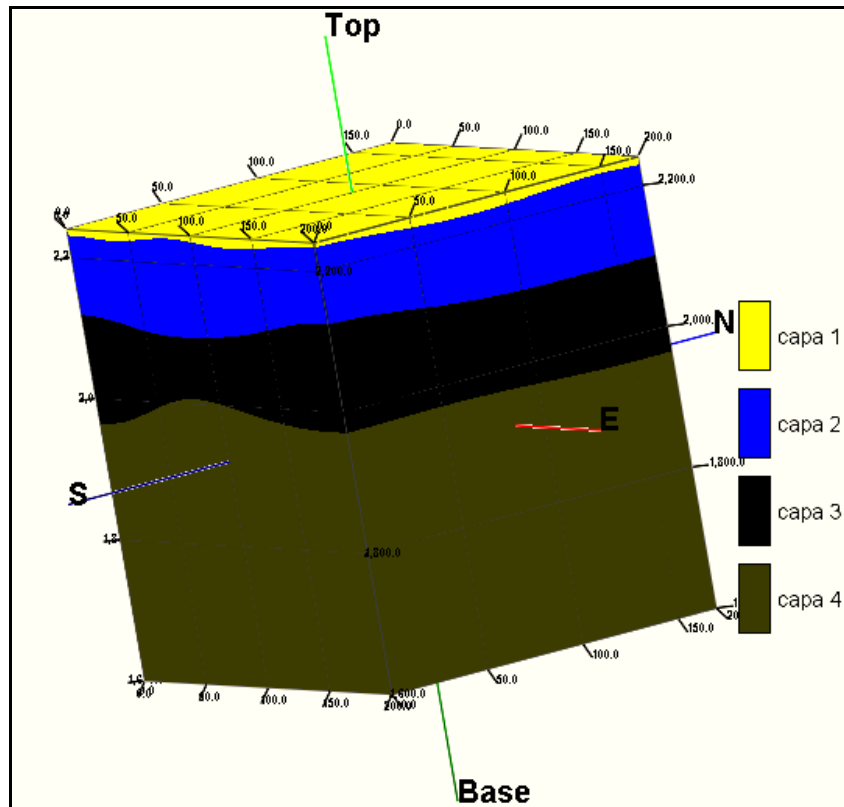


Figura 23. Representación esquemática del modelo hidrogeológico.

A partir del modelo propuesto, se incorporaron las fronteras del modelo. Formadas por entradas de materiales lávicos provenientes de las sierras al norte y al sur en el área de estudio. Por esta razón se incluyeron las capas de materiales terciarios de la unidad Tpba, que representa las características geológicas de las formaciones del cerro de la Estrella y materiales cuaternarios de la unidad Qb, presentes en las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin.

Zona de simulación

En 1900 el antiguo lago era alimentado por potentes manantiales, que se encontraban a sus orillas, y al pie de la serranía circundante. Para nuestro estudio, se utilizó una imagen satelital georeferenciando para ubicar los antiguos manantiales, referidos en trabajos antiguos y recientes de Xochimilco (Figura 22). El número de manantiales varía considerablemente en los documentos, y en algunos casos, se mencionan los manantiales sin hacer referencia al lugar de ubicación. Se seleccionaron las características de doce manantiales para la simulación (Tabla 10) (Peñañiel, 1884; SRH, 1964, Rebolledo, 1987; y Terrones, 2004).

Numero en el Modelo	Nombre del Manantial	Coordenadas	
		X (UTM)	Y (UTM)
1	Tepepan	485633	2131066
2	La Noria 2	487192	2129663
3	La Noria 1	486761	2130035
4	Xaltocan	488880	2127247
5	Quetzalapa	489308	2127373
6	San Juan	489702	2127200
7	Nativitas	490125	2127479
8	Santa Cruz	492161	2127676
9	Tetitla	492739	2127618
10	San Gregorio	493318	2128777
11	San Luis	496997	2129329
12	Tulyahualco	497585	2129175

Tabla 10. Los doce manantiales más importantes en Xochimilco, el número que ocupan para la modelación y la ubicación donde se encontraban.

Actualmente, la zona lacustre de Xochimilco está formada por un sistema cerrado de canales y pequeñas lagunas que se comunican entre sí; recibe una recarga superficial que se distribuye en toda la zona. Debido a que, no se tienen los datos de las dimensiones de estos cuerpos de agua, se tomaron mapas, con las dimensiones y nombres de cada canal y laguna, proporcionados en la biblioteca de la Delegación Xochimilco. Se realizó el mismo tratamiento, que en la reconstrucción del antiguo lago de Xochimilco. Los datos de canales y lagunas se manejaron en Arc Gis 9.2, para ubicar las dimensiones en la imagen satelital (Figura 19).

Parámetros hidrogeológicos

Pozos de extracción

Se realizó una búsqueda bibliográfica para obtener las coordenadas de los pozos y poderlos ubicar en el modelo (CIBERHIDROGEOFISICA (1999), BENTON (2003), EXYCO (2003), Lesser (2003), Zúñiga (2003), y CHU (2004).

En la actualidad, existen aproximadamente 160 pozos en total dentro del área de estudio. Para el modelo de simulación, se utilizaron solo aquellos de los que se obtuvo información y se encuentran funcionando (Figura 24).

Por su fecha de perforación, en la Tabla 11 los pozos de extracción se dividieron en tres periodos, a lo largo del estudio (DGCOH, 2005; CNA, 2008):

- De 1910 a 1960, simulan la extracción del agua de los manantiales, desde que se entubaron hasta su agotamiento (Tabla 11).

- De 1960 a 1985, todos los pozos que se crearon en este periodo, para extraer el agua del acuífero granular (Tabla 11).
- De 1985 a 2003, simulan la explotación actual del acuífero granular y alguno del volcánico en la zona lacustre de Xochimilco (Tabla 11).

<i>Periodo</i>	<i>Fecha de simulación</i>	<i>Cantidad de pozos</i>	<i>Régimen de extracción total (m³ / año)</i>
1	1910-1960	12	267840
2	1960-1985	121	466473.6
3	1985-2003	147	572832

Tabla 11. Pozos de extracción de agua durante los tres periodos de simulación (Terrones, 2004; DGCOH, 2005; CNA, 2008).

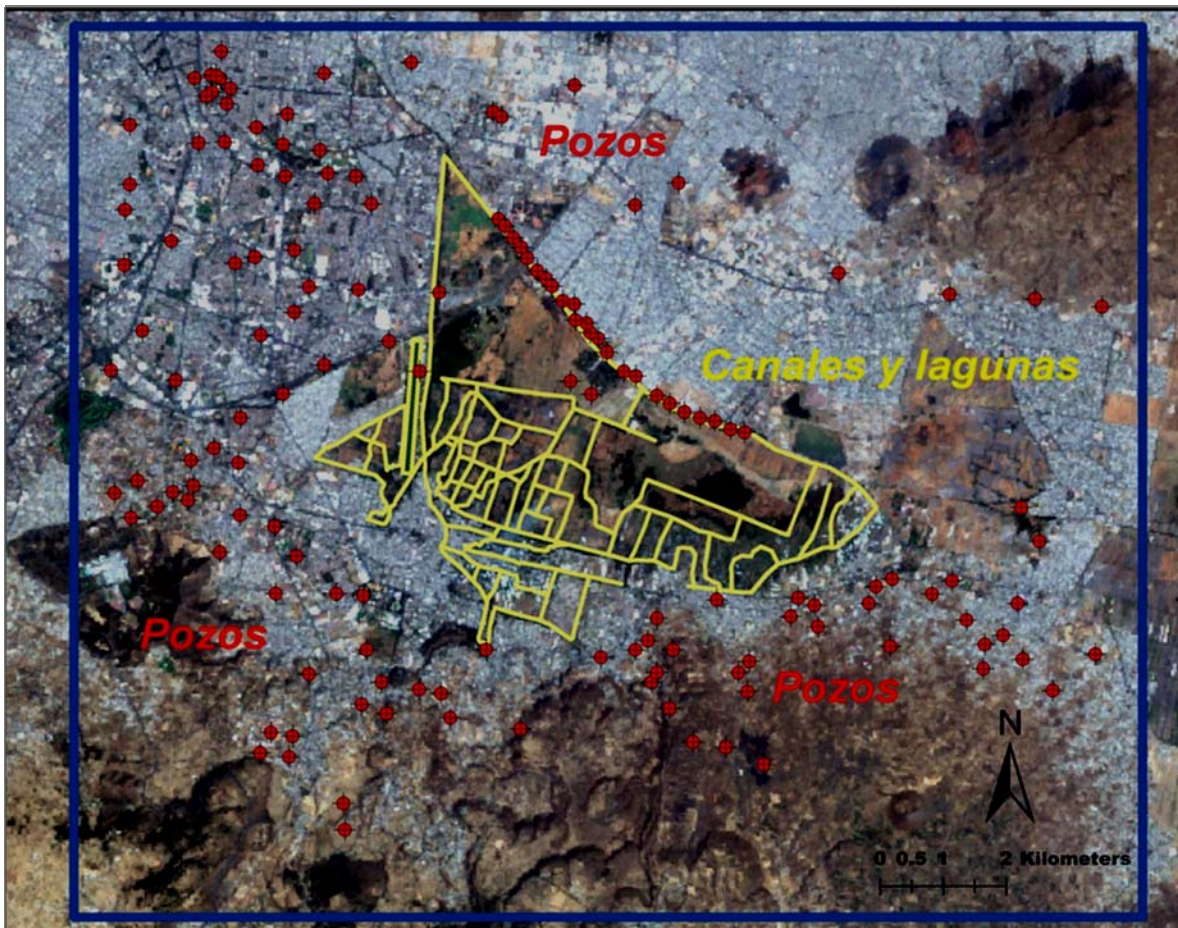


Figura 24. Ubicación de los canales, lagunas y pozos de extracción de agua potable en la zona de estudio (Imagen Satelital, LANDSAT 7B, Ciudad de México 2000).

Recarga artificial

Para la zona total de estudio, la recarga reportada fue de 0.000432 m³/d. El valor abarca el periodo de 1985 hasta el 2003, en que se tienen las lecturas mensuales de las tres plantas de tratamiento en Xochimilco, esta aportación de agua tratada, mantiene los niveles de agua en el sistema de canales (CAGIGAS, 2003).

Recarga natural

Los datos de lluvias, escurrimientos, infiltraciones y cuerpos de agua intermitentes, fueron clasificados en este grupo. Por lo tanto, el aporte de agua subterránea que reciba el acuífero, dependerá la cantidad de láminas propuestas, en el modelo.

Evapotranspiración

CAGIGAS (2003), considera un valor de 0.000169 m³/d. Se tomaron en consideración los distintos elementos que intervienen en el proceso de evapotranspiración (espejos de agua, chinampas, áreas verdes), así como el área de terreno, en la zona de estudio.

Condiciones de frontera

El modelo abarca desde la planicie del antiguo lago de Xochimilco, que tiene una altura promedio de 2240 m, hasta el pie de las Sierras de Chichinautzin, Santa Catarina y el Cerro de la Estrella. En cuanto a la profundidad para el modelo se determinó en la cota de 1600 m, considerándola en la base de la unidad volcánica terciaria Tppc (DDF, 1994).

Valores de carga hidráulica

La carga hidráulica varía a lo largo de los periodos de simulación, para esto se utilizaron las elevaciones en los niveles estáticos que hay reportados.

Debido a que no se tienen datos de los niveles estáticos que se tenían a principios de siglo XX, se asumió que la carga hidráulica para el año de 1900, era igual a la altura del terreno de la zona lacustre de Xochimilco.

Así, se utilizó la topografía del terreno como carga hidráulica inicial (Figura 25), mientras que para el año 1985, se tomaron los niveles reportados por Lesser (2003), de acuerdo con la información de los pozos que se encuentran dentro de la zona de estudio (Figura 26).

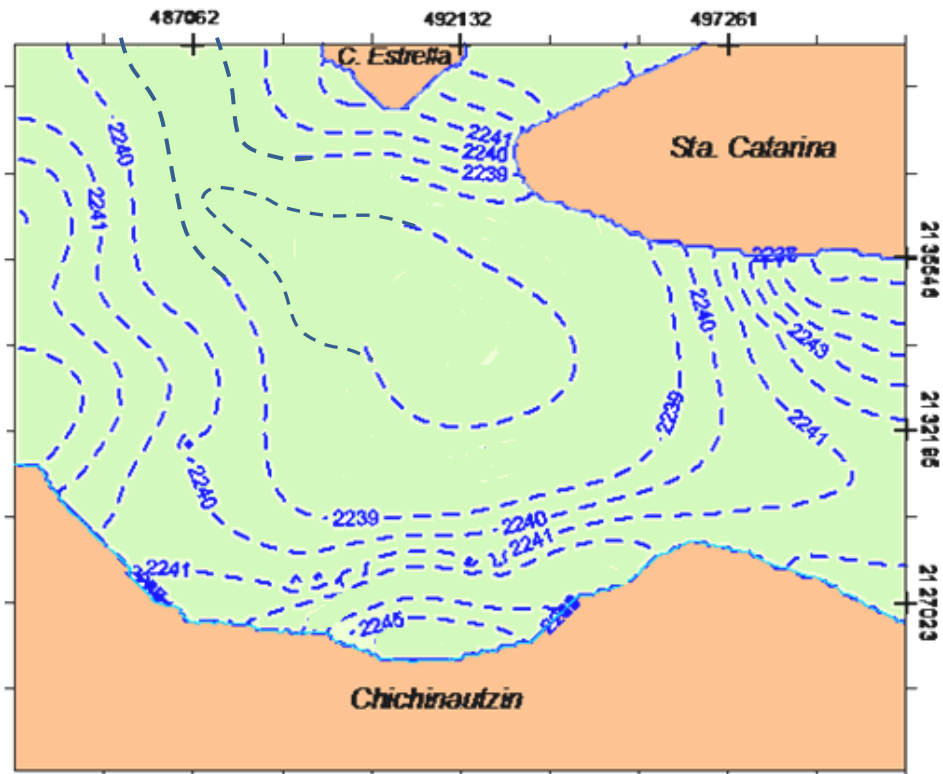


Figura 25. Curvas de elevación del nivel estático del agua en el área de simulación, para el año 1900 (coordenadas UTM).

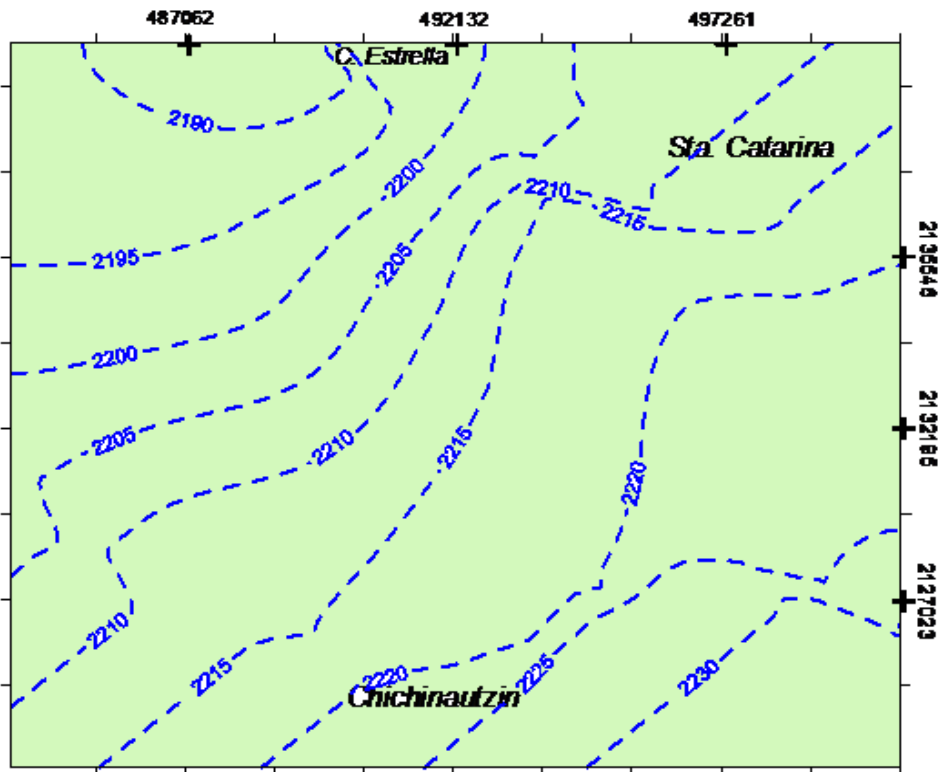


Figura 26. Curvas de elevación del nivel estático del agua en el área de simulación, para el año 1985 (coordenadas UTM).

Simulación de celdas activas e inactivas

De acuerdo a las características hidrogeológicas y la selección de condiciones de frontera realizadas. Se inhabilitaron del área de estudio las celdas correspondientes a las Sierras de Chichinautzin al sur, la de Santa Catarina al noreste, además de una parte del Cerro de la Estrella al norte.

Básicamente estas áreas funcionan como zonas de escurrimiento hacia el acuífero y no tienen gran almacenamiento (CGTP, 1999). Las celdas activas (Figura 27) corresponden a la zona planicie lacustre representada por las cuatro capas en el modelo (ver Figura 10 y Tabla 8).

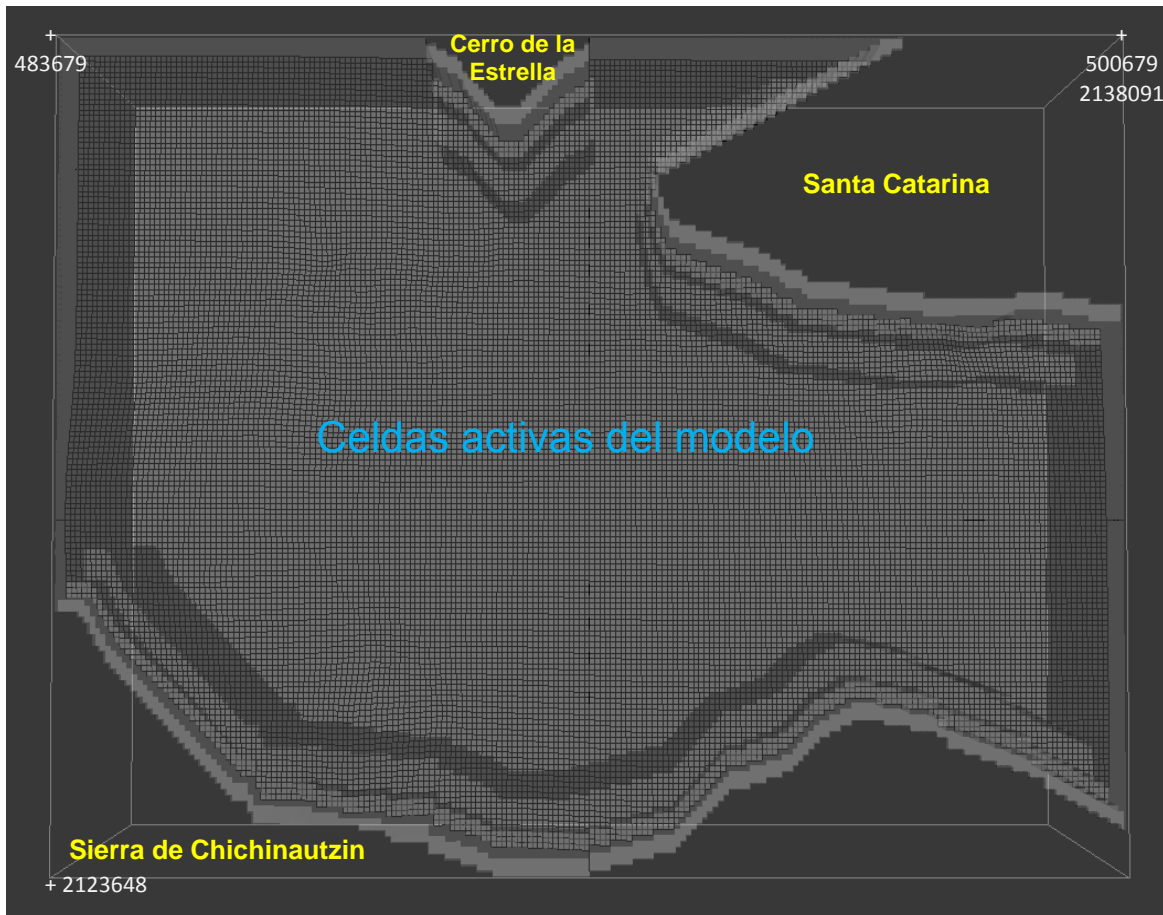


Figura 27. Representación grafica del modelo (vista en planta), de las celdas activas en las cuatro capas, que corresponden a la planicie lacustre en Xochimilco.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El modelo matemático utilizado para simular la zona lacustre de Xochimilco, es el modelo de flujo de aguas subterráneas, MODFLOW-2000 versión 1.18.01, de tres dimensiones con solución de diferencias finitas, desarrollado por la U. S. GEOLOGICAL SURVEY (McDonald and Harbaugh, 1984).

La entrada de datos se ha generalizado de tal manera que cada tipo, se puede almacenar y ser leído en archivos separados, el formato permite leer arreglos de los datos sin modificaciones al programa. La información de salida, puede ser de varias opciones según las necesidades particulares, además, se tiene una interfase que da una interpretación espacial de los datos numéricos, el paquete es el Model View 1.2 (USGS, 2007).

Las entradas y salidas de agua que se modelaran para el sistema, pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

Aportes al sistema

Sistema	Características
Agua tratada y residual	Tres plantas de tratamiento: cerro de la Estrella (1985), San Luis Tlaxialtemalco (1989) y San Lorenzo (1999), además de agua residual arrojada directamente a los canales.
Lluvia e infiltración	Infiltración en la zona lacustre de Xochimilco.
Aporte de agua subterránea	Contribución regional por los escurrimientos e infiltraciones de las sierras circundantes en la zona de estudio.
Manantiales	Se seleccionaron doce ojos de agua.

Tabla 12. Parámetros designados para alimentar las entradas de agua del modelo.

Salidas del sistema

Sistema	Características
Evapotranspiración	La vegetación en la zona está representada por plantas acuáticas y silvestres, junto con las especies nativas de árboles.
Riego	Agua que circula por la zona de canales y lagunas que es utilizada para el riego de cultivos.
Pozos de extracción	Existen una gran cantidad de pozos de extracción, la ubicación y gastos son manejados en el modelo individualmente.
Derrames	Pérdida por los desbordamientos de algunas zonas, al sur del área.

Tabla 13. Parámetros designados como las salidas de agua del modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MODELO ESTADO ESTACIONARIO (SS)

Planteamiento

Se simularán las condiciones naturales para el año 1900, antes que el sistema fuera perturbado. Así, el modelo deberá cumplir condiciones de funcionamiento previo a la explotación:

- En esta etapa, se considera al sistema un acuífero confinado.
- El sistema está conformado por cuatro capas hidrogeológicas, en un área de 200 columnas y 170 renglones de 85 m x 85 m para cada celda.
- Tenemos un solo periodo de esfuerzo de 365 días.
- No hay almacenamiento de agua en las montañas, estas zonas serán celdas inactivas, y no formarán parte del acuífero a simular.
- Tenemos como carga inicial, para las cuatro capas, la elevación del terreno, proponiendo el nivel de agua en el acuífero a esta altura.
- Cada capa tiene una conductividad hidráulica en horizontal y en vertical. Los valores van de acuerdo con cada material geológico que integran a las unidades hidrogeológicas del acuífero de estudio.
- La alimentación del modelo, para las rutinas de MODFLOW 2000 y el parámetro que simularán son:
 - RIV: Ubicación del área ocupada por el antiguo lago, con valor de conductancia para cada celda de .0049 m/d.
 - DRN: Hay uno para cada manantial de la región, con un valor total de 267840 m³/d.
 - RCH: Es la recarga total al sistema, incluye parte de la lluvia y las infiltraciones, su valor es de 0.000432 m³/d.
 - GHB: Son entradas de agua provenientes de las sierras, sus valores de conductancia en las celdas van de .00492 m/d hasta 18400 m/d, variando en cada capa.
 - EVT: Es la evapotranspiración en el área, el valor es de 0 .000169 m³/d.

- Cada rutina de entrada y salida del modelo, es un parámetro de calibración.

Calibración

Para el análisis de sensibilidad en el periodo estacionario, se inició con series de corridas modificando los datos de entradas y salidas, hasta que el balance hidráulico calculado por el modelo es alrededor de cero. Así, cuando los gastos de ingreso al acuífero son iguales a los que salen, y la variación en el nivel piezométrico es nulo, la calibración es aceptada (Watts, 1989).

Los valores de calibración para el estado estacionario, arrojados por la simulación del modelo matemático computacional se muestran en la Figura 28. Los valores funcionarán como el esqueleto base para las siguientes simulaciones.

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD 1					
CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:			IN:		
STORAGE =		0.0000	STORAGE =		0.0000
CONSTANT HEAD =		0.0000	CONSTANT HEAD =		0.0000
DRAINS =		0.0000	DRAINS =		0.0000
RIVER LEAKAGE =		0.0000	RIVER LEAKAGE =		0.0000
ET =		0.0000	ET =		0.0000
HEAD DEP BOUNDS =		85592160.0000	HEAD DEP BOUNDS =		235165.2969
RECHARGE =		26423940.0000	RECHARGE =		72386.8750
TOTAL IN =		112016096.0000	TOTAL IN =		307552.1875
OUT:			OUT:		
STORAGE =		0.0000	STORAGE =		0.0000
CONSTANT HEAD =		0.0000	CONSTANT HEAD =		0.0000
DRAINS =		62304788.0000	DRAINS =		169495.0156
RIVER LEAKAGE =		17350412.0000	RIVER LEAKAGE =		47847.8945
ET =		9292912.0000	ET =		25358.0723
HEAD DEP BOUNDS =		22887832.0000	HEAD DEP BOUNDS =		62471.0898
RECHARGE =		0.0000	RECHARGE =		0.0000
TOTAL OUT =		111835944.0000	TOTAL OUT =		305172.0625
IN - OUT =		180152.0000	IN - OUT =		2380.1250
PERCENT DISCREPANCY =		0.16	PERCENT DISCREPANCY =		0.78
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD 1					
	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	3.15360E+06	52560.	876.00	36.500	9.99316E-02
STRESS PERIOD TIME	3.15360E+07	5.25600E+05	8760.0	365.00	0.99932
TOTAL TIME	3.15360E+07	5.25600E+05	8760.0	365.00	0.99932

Figura 28. Calibración final, en estado estacionario para el periodo de 1900.

Los datos arrojados por el modelo reproducen adecuadamente el fenómeno, simulando de manera aceptable el periodo de 1900. La comprobación hecha entre los datos calculados y los modelados, si bien no son idénticos, su aproximación se ajusta favorablemente para desarrollar la simulación de los siguientes modelos a lo largo de distintos periodo.

En la simulación, en el gasto de los manantiales, se tiene un valor calculado de 66 225 600 m³/d, y el valor del modelo es 62 304 788 m³/d (Figura 29), lo cual resulta una simulación aceptada en el ajuste de los demás parámetros y sus valores.

La simulación del área de estudio resultante para el periodo estacionario, se muestra en la Figura 29:

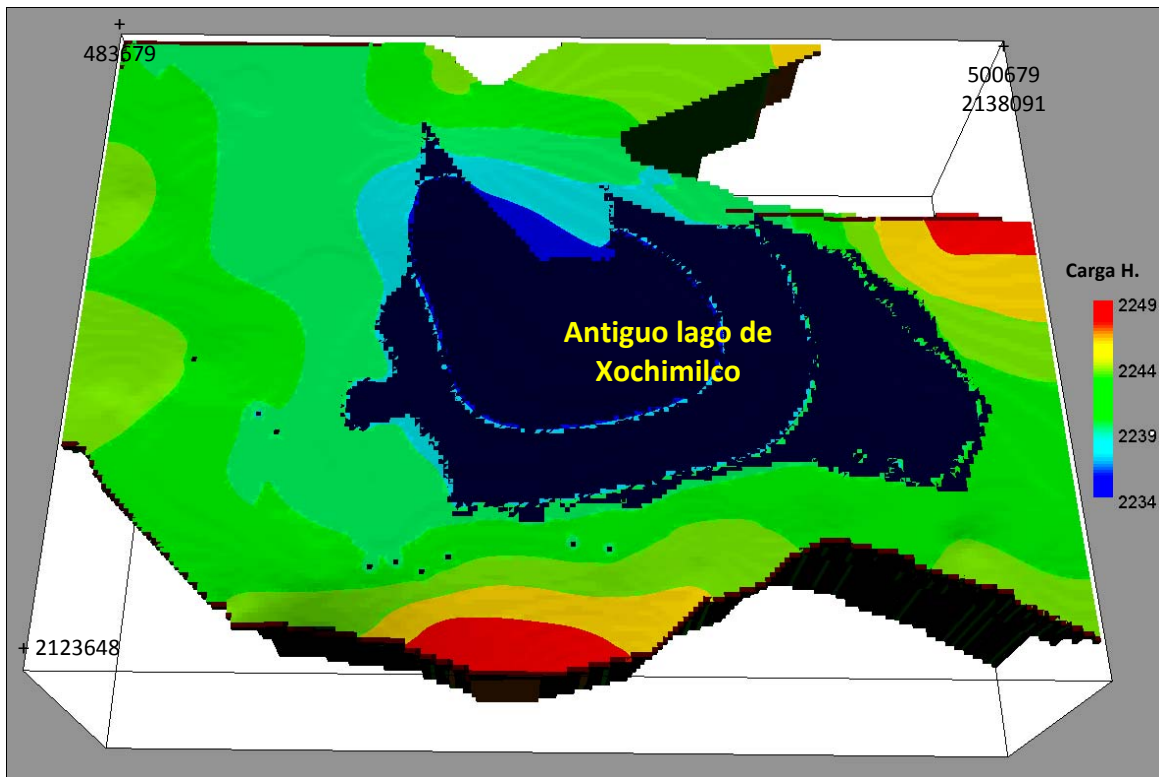


Figura 29. Modelo en estado estacionario, con las cargas hidráulicas para el área de estudio en el año 1900, se muestran la zona del antiguo lago de Xochimilco (* Manantiales).

MODELOS ESTADO TRANSITORIO (TR)

Planteamientos

Se plantearon dos modelos transitorios, para distintos periodos de extracción del sistema:

- Modelo 1: Representado en dos periodos, de los tiempos de 1910 a 1960 (Periodo de esfuerzo de 18250 días (d)) y de 1960 a 1985 (Periodo de esfuerzo de 9125 d).
- Modelo 2: Representado en un solo periodo, para los años de 1985 a 2003 (Periodo de esfuerzo de 6570 d).

Para cada periodo y modelo en estado transitorio, cambiará la rutina de los pozos de extracción (WEL en el MODFLOW 2000), junto a los parámetros para su calibración. El modelo en estado transitorio, simulará las funciones de abatimientos de agua en el sistema. Sus características serán:

- Todos los parámetros planteados en el estado estacionario, en cuanto a la estructura del modelo, se mantienen constantes.
- La configuración piezométrica, de las elevaciones de niveles estáticos obtenida de la simulación en estado estacionario, se utiliza como carga inicial para el modelo 1.
- Al comenzar el bombeo, se activa la rutina WEL en el MODFLOW 2000.
- El coeficiente de almacenamiento se introduce como un valor. Cada capa tendrá el valor mencionado de las unidades hidrogeológicas del acuífero en estudio.
- Al desaparecer los manantiales, ya no se utiliza la rutina DRN.
- Por condiciones hidrogeológicas, el sistema acuífero puede convertirse de confinado, a libre.
- Con los estudios realizados en la zona (Lesser, 2003), se obtuvo información que nos permitió establecer dos configuraciones de niveles piezométricos para la zona de estudio. Una, para 1985 y la otra, para 2003 (Figura 30). Como se puede observar la representación de los niveles se modifica sustancialmente. La representación de las elevaciones para 1985 esta reconstruida con muy poca información y nos presenta un panorama muy regional. Sin embargo, la del 2003 presenta mayor detalle; incluye mucha más información, ya que incorpora el efecto de los pozos de las baterías Tlahuác-Netzahualcóyotl, la de Coyoacán y los ubicados en la interfase de la parte lacustre y volcánica, en la zona de Chichinautzin. Estas representaciones serán utilizadas como parámetros de calibración según el modelo.
- Para el estado transitorio, la conductividad hidráulica (k) y el coeficiente de almacenamiento (S) son parámetros de calibración.
- El modelo 2, será la base para establecer escenarios futuros en el sistema.

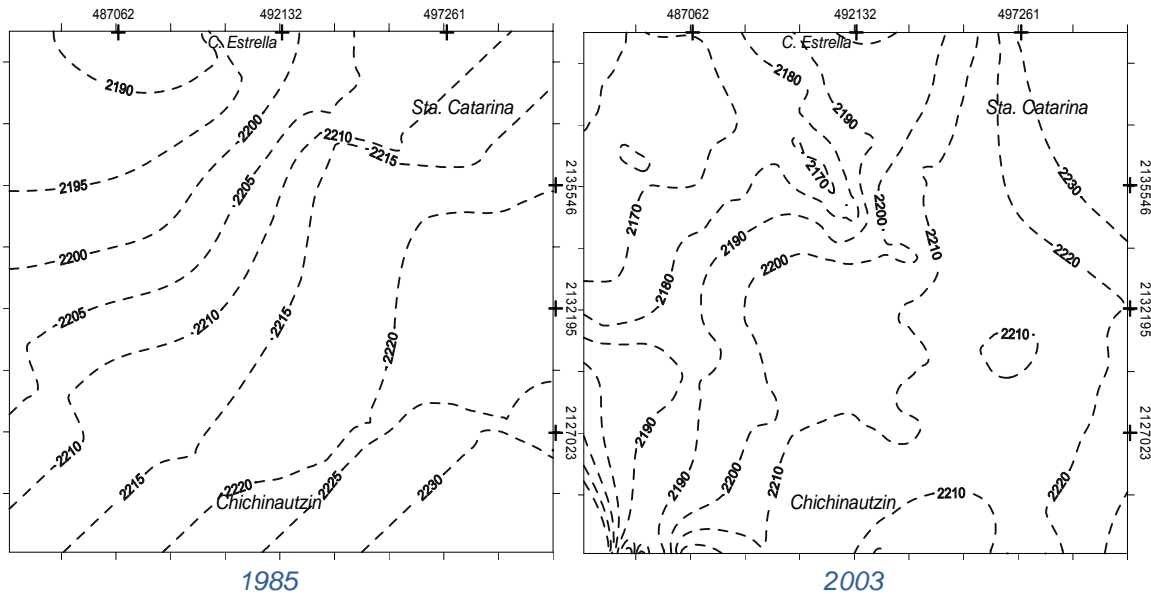


Figura 30. Elevación de los niveles piezometricos en el área de estudio, para 1985 y 2003 (Lesser, 2003).

Calibraciones

Cuando un modelo numérico ha sido desarrollado, a partir de la recopilación de información confiable, es necesario analizar la sensibilidad de los valores, para cuantificar la incertidumbre de estos. En el modelo desarrollado se ejecutaron estimaciones, para modificar sus mecanismos y parámetros, obteniendo así un modelo más representativo del sistema estudiado. La recarga, conductancia, fronteras del modelo, coeficiente de almacenamiento y la conductividad hidráulica de los materiales que representan las condiciones geológicas. Son parámetros que permiten conocer la sensibilidad del modelo (Rushton, 2003).

El análisis de sensibilidad, en estado transitorio para los dos modelos, modifica los valores de coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica, además de los gastos de extracción por los pozos. A continuación se presentan los resultados y discusiones, en la calibración de los dos modelos.

Modelo 1 (1910-1985)

A lo largo del tiempo los niveles estáticos reportados por Lesser (2003), permiten establecer una disminución acelerada de los niveles en el acuífero de Xochimilco para 1985, particularmente en la zona noroeste. La simulación final, de los dos periodos en el modelo 1, indica que los niveles estáticos descienden hasta la capa dos.

Los valores de calibración para el modelo 1 con dos periodos, arrojados por la simulación del modelo matemático computacional se muestran en la siguiente Figura 31:

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD 2					
CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:			IN:		
STORAGE =	1396919040.0000		STORAGE =	152976.1562	
CONSTANT HEAD =	0.0000		CONSTANT HEAD =	0.0000	
WELLS =	0.0000		WELLS =	0.0000	
DRAINS =	0.0000		DRAINS =	0.0000	
RIVER LEAKAGE =	1641423.2500		RIVER LEAKAGE =	683.1763	
ET =	0.0000		ET =	0.0000	
HEAD DEP BOUNDS =	895473536.0000		HEAD DEP BOUNDS =	86832.3594	
RECHARGE =	1983632384.0000		RECHARGE =	72458.6562	
TOTAL IN =	4277666304.0000		TOTAL IN =	312952.3438	
OUT:			OUT:		
STORAGE =	120326664.0000		STORAGE =	900.2242	
CONSTANT HEAD =	0.0000		CONSTANT HEAD =	0.0000	
WELLS =	3359391488.0000		WELLS =	339240.0000	
DRAINS =	0.0000		DRAINS =	0.0000	
RIVER LEAKAGE =	362399424.0000		RIVER LEAKAGE =	170.0606	
ET =	613624448.0000		ET =	14889.2734	
HEAD DEP BOUNDS =	109136288.0000		HEAD DEP BOUNDS =	4.2616E-03	
RECHARGE =	0.0000		RECHARGE =	0.0000	
TOTAL OUT =	4564878336.0000		TOTAL OUT =	355199.5625	
IN - OUT =	-287212032.0000		IN - OUT =	-42247.2188	
PERCENT DISCREPANCY =	-6.50		PERCENT DISCREPANCY =	-12.65	
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD 2					
	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	7.88400E+07	1.31400E+06	21900.	912.50	2.4983
STRESS PERIOD TIME	7.88400E+08	1.31400E+07	2.19000E+05	9125.0	24.983
TOTAL TIME	2.36520E+09	3.94200E+07	6.57000E+05	27375.	74.949

Figura 31. Calibración final en estado transitorio para el modelo 1 (1910-1985), en los dos periodos de esfuerzo, de 1910 a 1960 y de 1960 a 1985.

Al comparar los valores de carga hidráulica, reportados frente a los calculados para el modelo, no se tiene un comportamiento semejante, ya que como se había mencionado esta configuración consta de muy pocos puntos de observación y no incluye el efecto de las grandes baterías de pozos que se hicieron posteriormente (Figura 32). Si bien, la calibración del modelo 1 mediante cargas hidráulicas no se ajusta, el balance hidráulico del modelo, es adecuado; ya que las diferencias calculadas entre los parámetros simulados nos arrojan un error de una cifra.

El modelo asume, que el nivel freático abarcaba las cuatro capas litoestratigráficas, en su totalidad y los poderosos manantiales; eran puntos de descarga natural del acuífero de Xochimilco. Una de las razones por la que los valores reportados y calculados no se ajustan, podría ser la carga inicial de la cual se partió. Para el año 1910, no se tenían reportes de las elevaciones del nivel estáticos en esa zona, y se partió de los valores de la carga hidráulica final del modelo estacionario, la cual es semejante a la elevación del terreno.

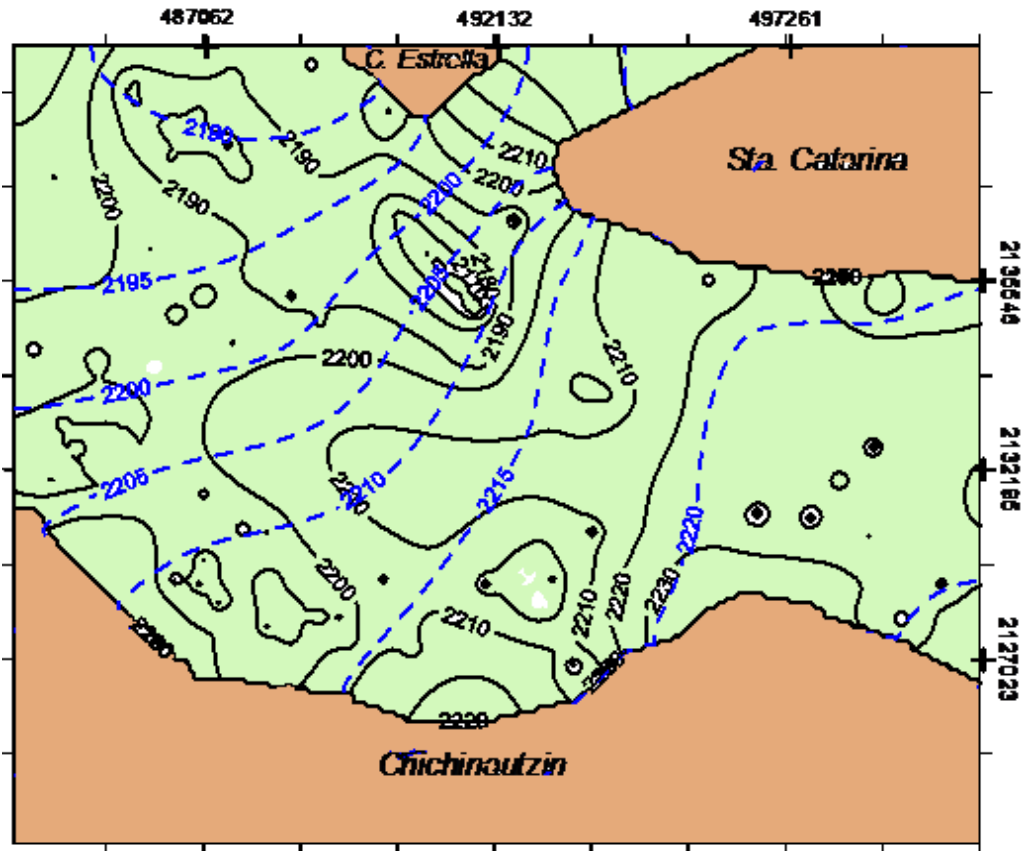


Figura 32. Elevación de los niveles piezométricos medidos para el año de 1985 (---) (Lesser, 2003), y los valores al final de la simulación modelo 1 (—).

En 1985 eran escasos los datos recopilados sobre niveles estáticos; para la zona de Xochimilco solo se tenían valores confiables en alrededor de 12 pozos (Lesser, 2003). Como se ha comentado, esta situación podría ser la otra variable que modifica el resultado en la comparación de los valores reportados y los simulados. Con pocos valores medidos de niveles estáticos en la zona, se tiene una configuración regional de poco detalle, y por lo tanto será diferente a la simulada (el modelo cuenta con información de más de 100 pozos de extracción).

Debido a la diferencia de datos en la calibración, no se pudo ejecutar en este modelo un siguiente periodo. Para solucionarlo, se planteo el modelo 2, con configuraciones conocidas de cargas hidráulicas en la zona.

La simulación de los 75 años, que incluye el aprovechamiento de los manantiales y la explotación con pozos profundos en la zona lacustre de Xochimilco, mantiene variaciones de las elevaciones de los niveles estáticos, alrededor de los 2200 m. En general ya no existe el tirante de agua, en la capa 1 (Figura 33).

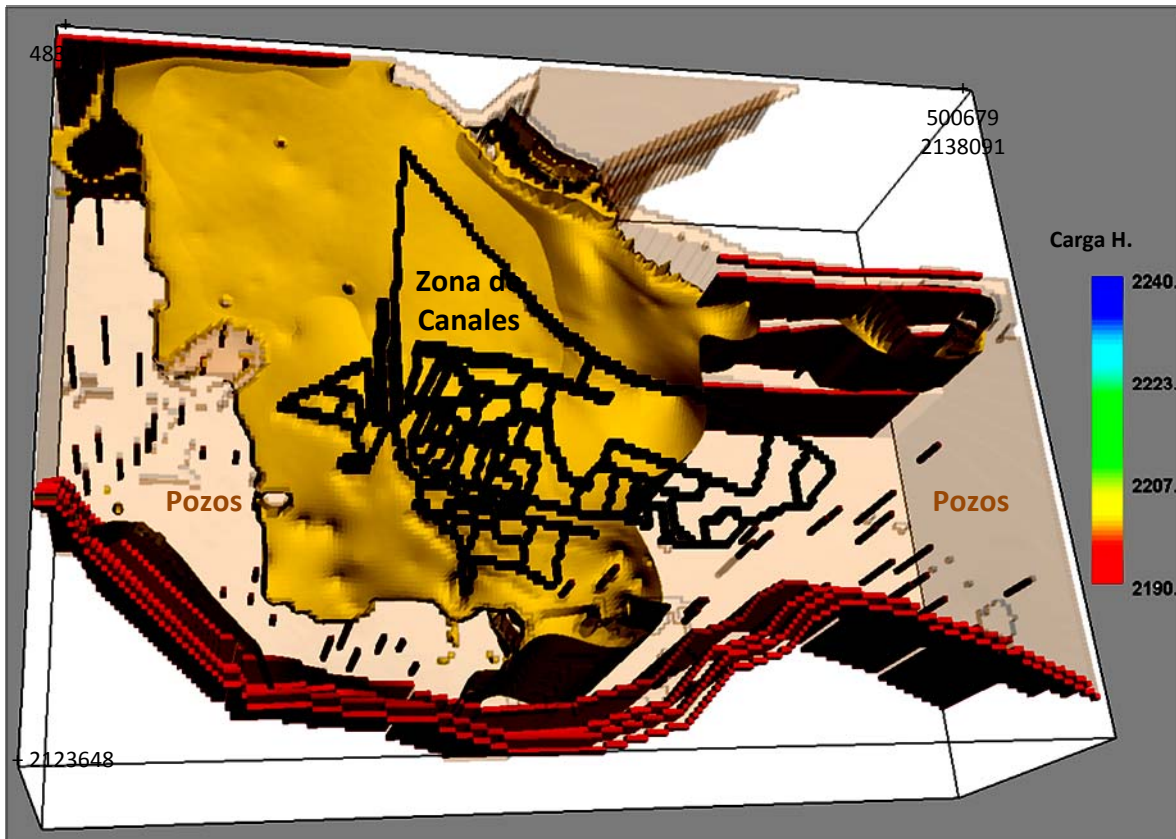


Figura 33. Modelo al final de la simulación, con las cargas hidráulicas. Se muestra la zona de canales y lagunas de Xochimilco para el periodo de 1910 a 1960 y 1985, al final del periodo, ya no existían los manantiales. Se observan espacialmente algunos pozos.

Modelo 2 (1985-2003)

Los valores de calibración para el segundo modelo se muestran en la Figura 34, el error para el final de la simulación converge lo más cercano a cero. En el caso del modelo 1 los valores simulados difieren con los reportados, por no tener datos conocidos de niveles estáticos de 1910. En el modelo 2, ocurre que la piezometría de la zona es conocida para el año 1985 reportada por Lesser (2003), y simula adecuadamente los niveles estáticos del año 2003 en la zona obtenidos por el mismo autor. Así, el modelo 2 reproduce perfectamente el comportamiento del sistema acuífero, donde se comienza a observar una gran zona vulnerable, y las elevaciones son desfavorables, al noroeste del área de estudio.

La calibración al comparar las cargas hidráulicas de los datos medidos frente a los arrojados por el modelo 2, es satisfactoria. Las curvas de valores simuladas y modeladas tienen el mismo comportamiento y las elevaciones de los niveles estáticos son iguales en casi todos los puntos de la zona (Figura 35).

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD 1					
CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T		
IN:		IN:			
STORAGE =	2209213184.0000	STORAGE =	283181.3750		
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000		
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000		
RIVER LEAKAGE =	30729016.0000	RIVER LEAKAGE =	1967.7283		
ET =	0.0000	ET =	0.0000		
HEAD DEP BOUNDS =	55920480.0000	HEAD DEP BOUNDS =	95145.8359		
RECHARGE =	767409728.0000	RECHARGE =	116805.1328		
TOTAL IN =	3566556416.0000	TOTAL IN =	497100.0625		
OUT:		OUT:			
STORAGE =	377661024.0000	STORAGE =	38601.1758		
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000		
WELLS =	3241376512.0000	WELLS =	467640.0000		
RIVER LEAKAGE =	1471584.7500	RIVER LEAKAGE =	963.7614		
ET =	4846976.0000	ET =	2557.7109		
HEAD DEP BOUNDS =	0.0000	HEAD DEP BOUNDS =	0.0000		
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000		
TOTAL OUT =	3625356032.0000	TOTAL OUT =	509762.6562		
IN - OUT =	-58799816.0000	IN - OUT =	-12662.5938		
PERCENT DISCREPANCY =	-1.64	PERCENT DISCREPANCY =	-2.52		
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD 1					
	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.67648E+07	9.46080E+05	15768.	657.00	1.7988
STRESS PERIOD TIME	5.67648E+08	9.46080E+06	1.57680E+05	6570.0	17.988
TOTAL TIME	5.67648E+08	9.46080E+06	1.57680E+05	6570.0	17.988

Figura 34. Calibración final en estado transitorio para el modelo 2, en el periodo de 1985 a 2003.

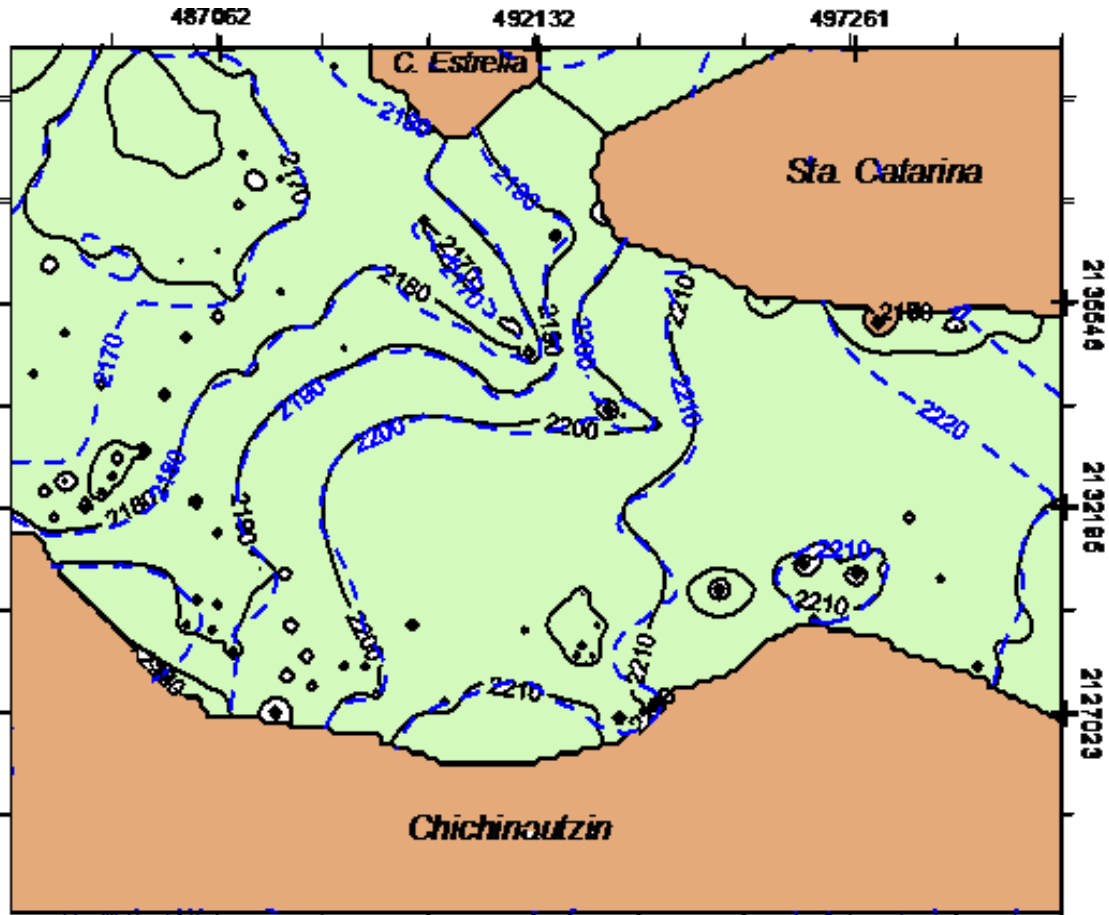


Figura 35. Elevación de los niveles piezometricos medidos para el año de 2003 (---) (Lesser, 2003), y los valores al final de la simulación modelo 2 (—).

La relación entre los valores de elevaciones de niveles estáticos, para los resultados calculados por el modelo frente a los reportados por Lesser (2003), se muestra en la Figura 36. Se observa un comportamiento semejante en los valores de las elevaciones que calcula el modelo, relacionados con los niveles estáticos que tienen cada pozo del área de estudio.

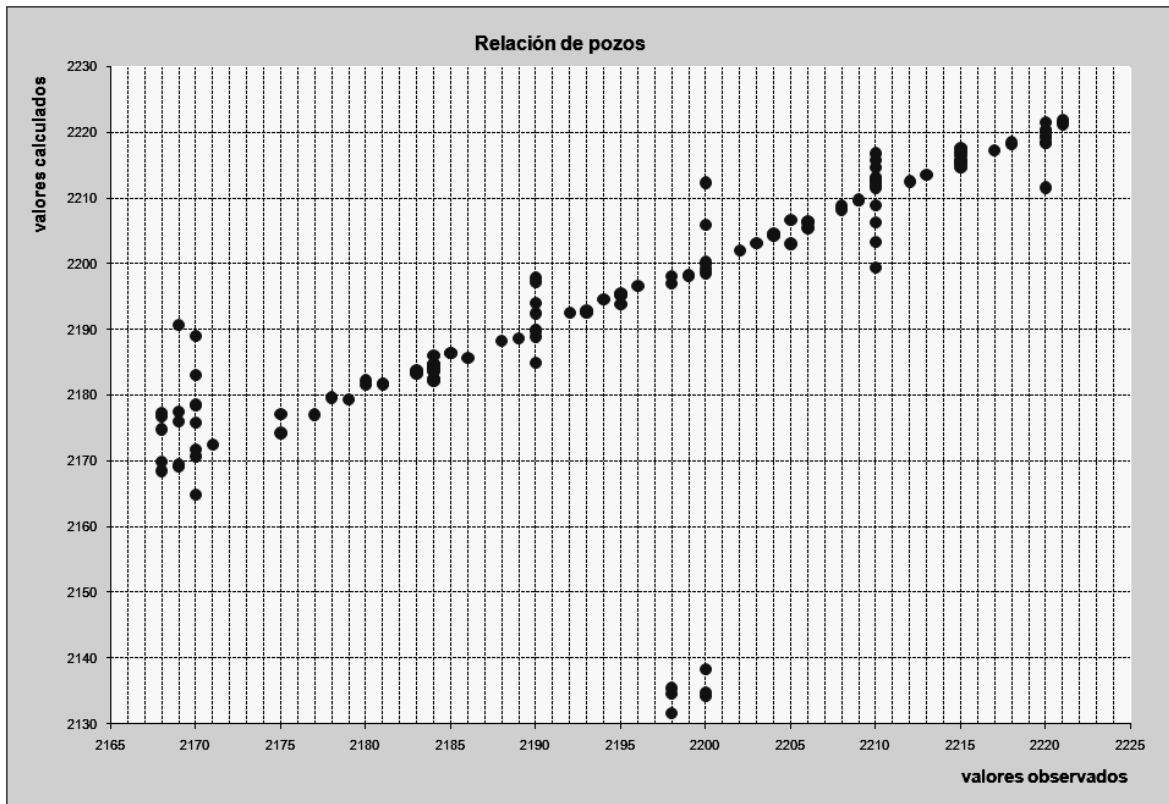


Figura 36. Elevaciones de los niveles estáticos en los pozos del modelo 2, valores calculados contra los reportados.

Es importante una calibración satisfactoria, para asegurar la validación del modelo proponemos un método más para satisfacer la calibración correcta del modelo 2, con el cálculo del error por Raíz Media Cuadrática (**RMC**). El cual se describe a continuación:

La predicción de la carga hidráulica en los modelos de flujo, es usada comúnmente como base para su calibración. Para calibrar se seleccionan parámetros que representan una parte importante de la simulación, en este caso, se utilizan las cargas hidráulicas medidas frente a las simuladas.

Al final de la calibración, podemos medir el error entre los datos observados y los calculados, la ecuación utilizada es el error Raíz Media Cuadrática (Anderson and Woessner, 1990):

$$\text{Root Mean Squared (RMS)} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2 \right]^{0.5} \dots\dots\dots(2)$$

Donde: h_m son los valores de cargas hidráulicas medidos (m), h_s son los valores de carga hidráulica simulada (m) y n es el número de puntos observados en la comparación. Resolviendo la ecuación (2) tenemos:

$$\begin{aligned} &= [1 / 34000 (1\ 894\ 488.899)]^{0.5} \\ &= [55.72]^{0.5} \\ \text{Raíz Media Cuadrática (RMC)} &= 7.46 \end{aligned}$$

Woessner y Anderson (1990) mencionan que el criterio para tener un valor aceptable en esta la calibración (un **RMC** bajo), depende de la magnitud de los cambios en las cargas sobre el fenómeno estudiado.

En este caso, prácticamente no se tienen cambios en la comparación de las cargas hidráulicas modeladas y simuladas (Figura 34), y el error **RMC** calculado, para este trabajo es moderado respecto al área de estudio simulada siendo no mayor a 10.

De manera general, el comportamiento del modelo 2 simula correctamente el sistema acuífero. En la porción este del área de estudio valores de cargas hidráulicas medidas y las simuladas difieren un poco, debido a que en esta zona no existen pozos de bombeo que modifiquen su comportamiento. La calibración de los datos es adecuada; el error en el balance hidráulico es bajo (-1.64), las cargas medidas y simuladas tienen en general el mismo comportamiento, y finalmente el error **RMC** es adecuado para el área de estudio.

El modelo 2 (1985-2003), servirá para desarrollar los escenarios a futuro en el año 2020 para la zona de estudio. La simulación del área de estudio en el modelo 2, presenta una explotación intensiva del acuífero, surgiendo una gran zona vulnerable (color azul en Figura 37) en la región de Coyoacán, Tlalpan y el sur de Xochimilco, con 147 pozos que bombean el agua y los niveles estáticos comienzan a disminuir en algunas partes llegando hasta la capa 3 del modelo.

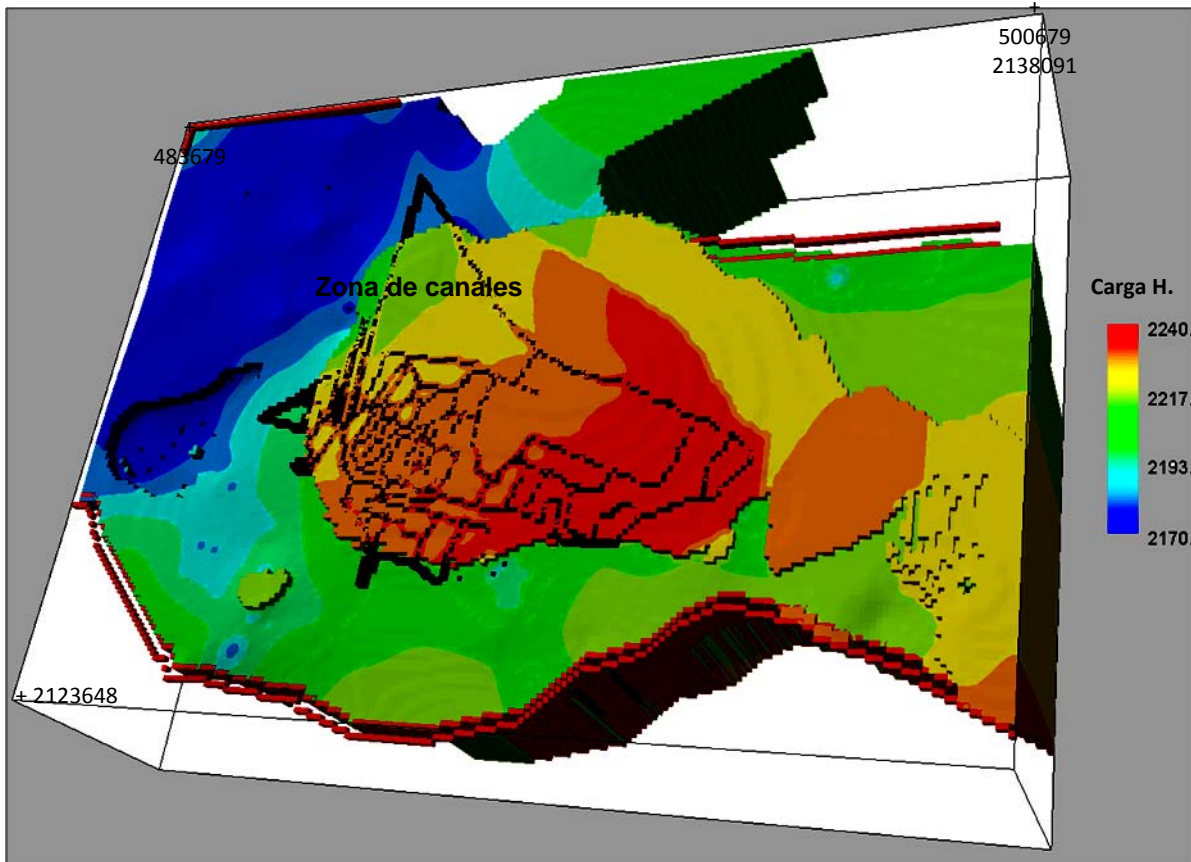


Figura 37. Modelo 2 (1985-2003), con las cargas hidráulicas. Se muestran la zona de canales y lagunas de Xochimilco para el periodo de 1985 a 2003. Los puntos negros sobre la zona, son algunos pozos de extracción.

SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

A lo largo del tiempo, el paisaje de la zona lacustre de Xochimilco, ha sufrido un deterioro significativo, debido a la implementación de obras hidráulicas realizadas en la región y a la fuerte explotación de sus recursos hídricos. A partir de 1901 y hasta 1914, el agua de sus manantiales, empezó a ser llevada a través de un gran acueducto, que abasteció de agua potable, a la Ciudad de México (Aréchiga, 2004).

A fines de la década de 1950, comienza a ser notoria la desecación de los canales. En la siguiente década, se agotaron los manantiales y para 1970, se vertían aguas negras en la zona, para mantener los niveles de sus canales. Finalmente, en las últimas décadas, el agua de Xochimilco siguió siendo explotada mediante pozos profundos, para abasto local y abastecimiento de la zona metropolitana de la Ciudad de México (Terrones, 2004).

En este trabajo se realizan diversas reconstrucciones hidrogeológicas del antiguo sistema lacustre, mediante modelos matemáticos, utilizando el paquete computacional MODFLOW 2000. En un periodo, menor a 100 años, la excesiva explotación acuifera de Xochimilco, ha deteriorado la zona, acabando con sus manantiales y secando casi por completo al antiguo lago somero. Este remanente, formado por canales y lagunas, recibe actualmente, recarga artificial de aguas tratadas del cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo. El aprovechamiento del agua del subsuelo, se realiza mediante pozos profundos.

Los modelos realizados en este estudio, se plantearon para distintos periodos de tiempo, iniciando en 1910, cuando la Ciudad de México captaba las extracciones de sus manantiales. Los modelos propuestos reproducen satisfactoriamente la fenomenología de la zona, simulada en el modelo.

Particularmente el modelo 2 (1985-2003), presenta una buena concordancia, reproduciendo adecuadamente los niveles piezométricos en la calibración de acuerdo a la información de Lesser (2003). Este modelo permite desarrollar escenarios a futuro y proponer condiciones, que podrían ser simuladas en nuevos modelos.

Como complemento a este trabajo de modelación predictiva, se presentan para el periodo comprendido, entre 2003 a 2020, cuatro escenarios posibles. Los escenarios propuestos quedarán como recomendaciones para los tomadores de decisiones de los organismos encargados del agua en la región. Generando información sobre efectos que podría sufrir la zona de Xochimilco, si se continúa ejerciendo el régimen de explotación actual.

Escenarios propuestos

A continuación se presentan varios escenarios posibles, en un periodo de 2003-2020, cuyos efectos serán posteriormente discutidos y analizados, La determinación de los escenarios se planteó de acuerdo al manejo ejercido por la CNA (2008).

Escenario 1: El sistema se mantiene sin modificaciones a lo largo del tiempo (17 años). Los parámetros y características hidrogeológicas conservan los mismos valores, así como la cantidad de pozos y el gasto de extracción.

Escenario 2: Se conservan todos los aspectos del escenario 1, excepto el régimen de extracción de los pozos.

De acuerdo a la información utilizada en el modelo 2 (1985-2003), el gasto de extracción se incrementó un 22.8% en el periodo. Al simular el periodo 2003-2020, se incrementa ese porcentaje. En todos los pozos de la zona se incrementarán en 23% la extracción (el régimen total será de 576635.25 m³/d).

Escenario 3: Se modifica el escenario 2, en cuanto al bombeo. Se incrementa la cantidad de pozos de extracción, en la zona de estudio, donde no existían obras de abastecimiento (porción este). Utilizando criterios históricos, incorporados del modelo 2 en el periodo de 1985 a 2003, la cantidad de pozos aumentó, pasando de 121 unidades a 147 (26 pozos en el periodo). Para esta etapa del estudio, se incorporarán 25 pozos, nuevos, en la parte este de la zona de estudio (Figura 38).

Dado que esta área, no ha sido alterada con pozos, se mantendrá el gasto de extracción de cada pozo. Así, el modelo incluirá un total de 172 pozos con un régimen de extracción total de 674704.4 m³/d.

Escenario 4: El análisis de los niveles estáticos del 2003, identifican una gran área vulnerable (Figura 38) hacia el noroeste de la zona lacustre de Xochimilco.

En esta área, se tienen los niveles estáticos más bajos de la zona de estudio, principalmente se debe a la cantidad y distribución de los pozos de Coyoacán (31), del ramal Tlahuác-Netzahualcóyotl (18) y los de ampliación Tlahuác-Netzahualcóyotl (8) (Figura 38).

Con la idea de reducir la presencia de estos conos de abatimiento y tratar de revertir efectos no deseados, como el hundimiento en el terreno de la zona chinampera, y los escurrimientos y desbordes de algunos canales.

En este escenario, se pretende reducir en 20% los gastos de extracción de los pozos que se encuentran dentro del área vulnerable de la zona lacustre de Xochimilco, y repartir este porcentaje, entre los demás pozos, con la finalidad de mantener el mismo régimen de extracción de agua potable. Los valores para cada pozo en el modelo, serán los utilizados en el escenario 3. Para el ramal de Coyoacán, se seleccionaron 31 pozos, los cuales extraen un total de 121603.7 m³/d. El gasto se reducirá 20% (resultando un total de 97282.96 m³/d).

En el caso de la ampliación y ramal Tlahuác-Netzahualcóyotl, se seleccionaron 26 pozos de bombeo que extraen 101990.2 m³/d, se disminuirá a 81591.96 m³/d. El porcentaje reducido para cada zona, será repartido entre los demás pozos del área de estudio y la extracción total, será la misma del escenario 3.

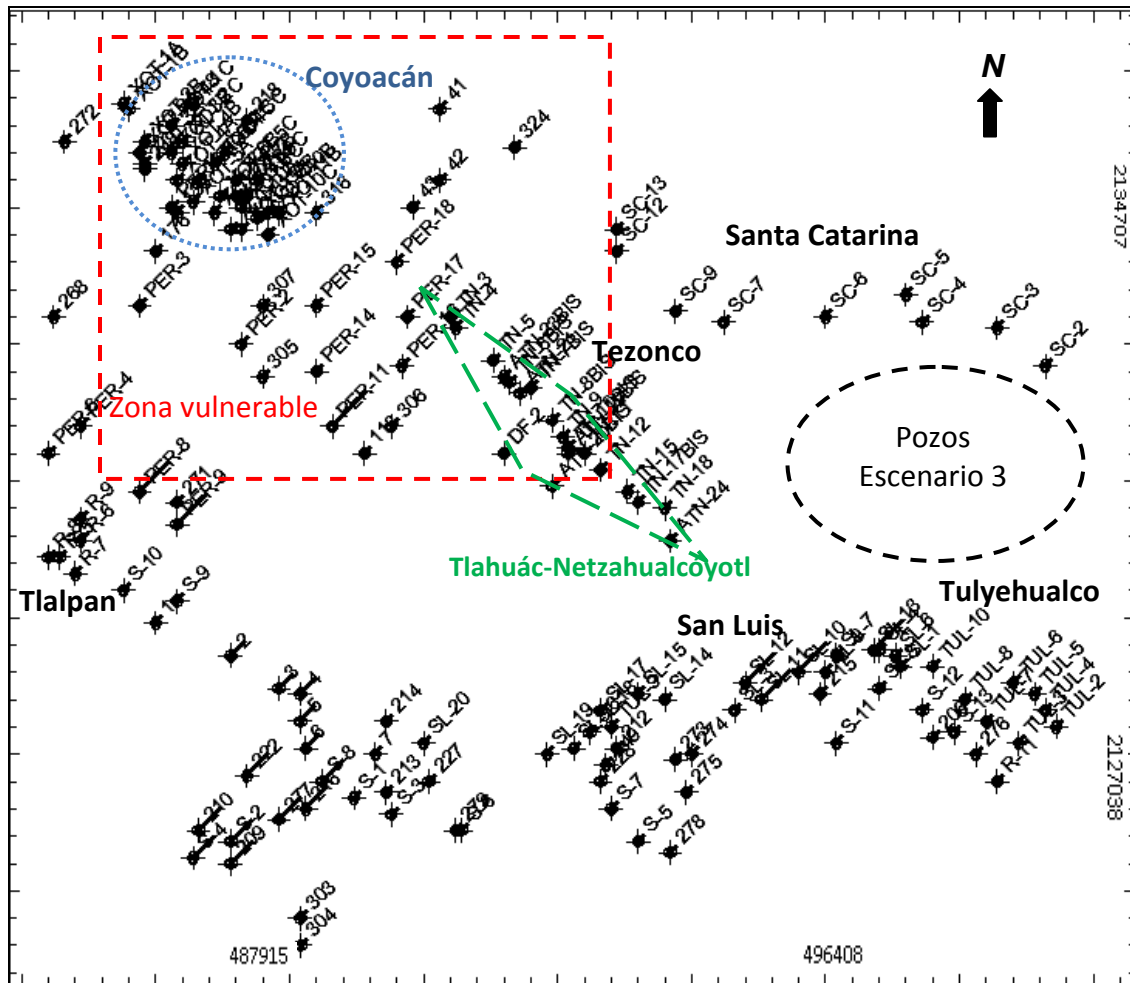


Figura 38. Mapa de ubicación de los pozos y ubicación de fenómenos importantes en la simulación de escenarios futuros.

Análisis de los escenarios

Algunos de los aspectos discutidos, en este estudio, podrían representar una buena opción para detener el deterioro existente y propiciar la recuperación del área de Xochimilco. Esto se lograría reubicando asentamientos irregulares en la zona lacustre, con la finalidad de incrementar las zonas inundables y lograr a largo plazo, la recuperación paulatina del lago de Xochimilco.

Dado que esta idea, para restituir la zona lacustre, resulta poco probable, ya que la decisión no solo corresponde a los organismos del agua, sino a otros intereses Delegacionales y Federales, de llevarse a cabo, tardaría mucho tiempo en ser vistos los beneficios. A partir de la calibración del 2003, el modelo nos permite establecer que para el 2020, independientemente del escenario propuesto, la zona de estudio presentará abatimientos en toda la región a consecuencia de las acciones y decisiones incorporadas.

En la Figura 39, se muestra una comparación entre los valores obtenidos para cada escenario simulado, a lo largo de una sección E-E', que se proyectó en cada escenario. La línea punteada oscura, representa el comportamiento del nivel estático para el año 2003. Como se observa, los niveles en esta sección decrecen en dirección noroeste (alcanzando el valor de 2170 msnm).

Como se había comentado anteriormente, la zona más vulnerable se encuentra ubicada en la antigua comunicación entre el lago de Xochimilco y el de Texcoco. Los diferentes niveles de los antiguos lagos del Valle de México, hacían verter sus aguas de un lago a otro.

En la región sur, el lago de Chalco ocupaba el nivel más alto del sistema lacustre; sus aguas tendían a ocupar el vaso de Xochimilco, que le seguía en altura y enseguida el vaso de Texcoco, recibía agua dulce por el estrecho lacustre formado entre el cerro de la Estrella y el Pedregal.

La Figura 39 indica que independientemente del escenario propuesto, en la zona se continuará degradando el área vulnerable, presentando abatimientos de 20 a 42 m, en 17 años. Sin embargo la parte central y sureste, son áreas poco sensibles a los cambios ejercidos.

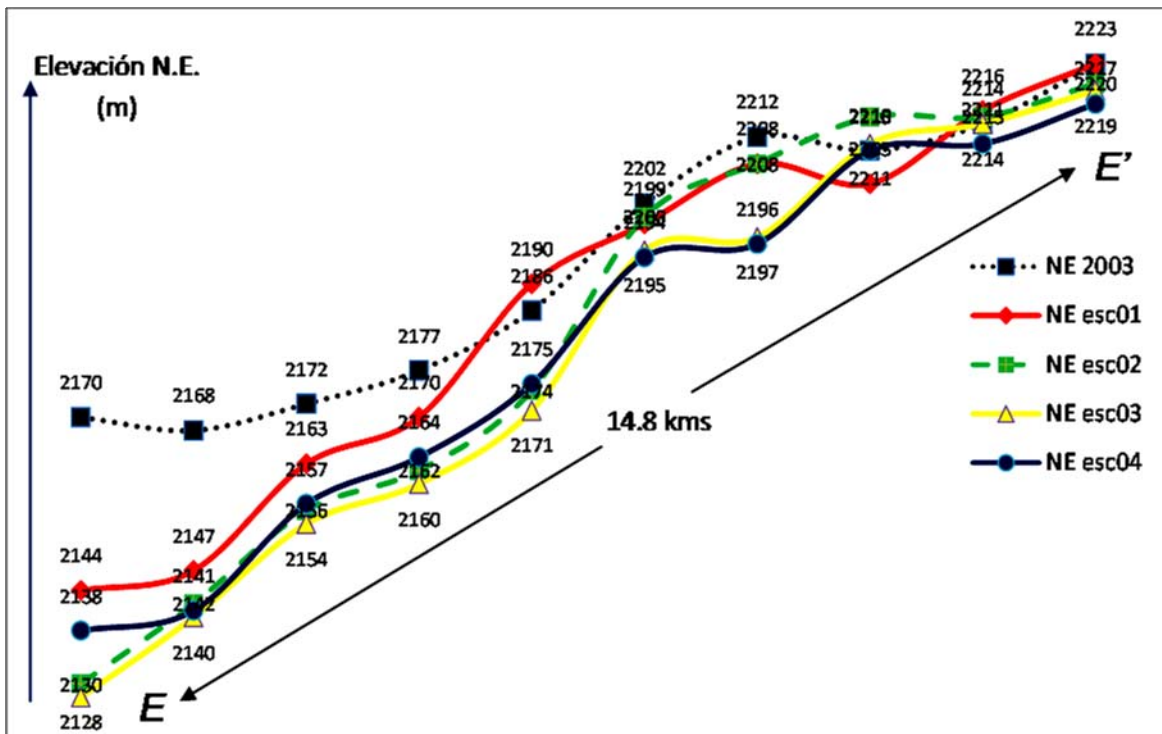


Figura 39. Comparación de elevaciones de los niveles estáticos en una sección E-E' (14.8 kms), para los cuatro escenarios propuestos, con los valores del modelo 2, del periodo 2003.

A continuación se describen cada uno de los escenarios simulados, en la zona lacustre de Xochimilco, y sus comportamientos se muestran en las figuras 40 a 43.

Escenario 1

La Figura 40, muestra los abatimientos que podría tener la zona lacustre, si se continúa manteniendo, el mismo régimen de extracción. Durante el periodo planteado, se extraerán 2,908 millones/m³ de agua. Bajo este comportamiento, que mantendría el área hasta el 2020, se mantienen los conos de abatimiento de los ramales de Coyoacán y Tlahuác-Netzahualcóyotl, generándose una disminución de 20 m en promedio en los niveles estáticos.

La aglomeración de los 16 pozos Auxiliar Xotepingo en Coyoacán (Anexo 2), son responsables de la disminución pronunciada en esta zona, y en el caso del ramal Tlahuác-Netzahualcóyotl, los primeros 15 pozos de la batería del ramal-ampliación, ubicados en la región de San Lorenzo Tezonco (Anexo 2), son los principales generadores de los abatimientos de la zona. Otras zonas de menor abatimiento (5 m en promedio), presentes en el escenario1, se ubican al pie de las sierras. En Chichinautzin los 13 pozos de San Luis y Tulyehualco (Anexo 2), en Santa Catarina, los 4 pozos pertenecientes a Tlahuác y en la porción oeste del área de estudio, los 10 pozos de Tlalpan.

Escenario 2

La Figura 41, muestra la simulación de los efectos que sufriría la zona de Xochimilco, al aumentar el régimen de explotación en cada uno de los 147 pozos de la zona, producto del 23 % de aumento en el bombeo. Durante el periodo de 2003 a 2020, se tendrá una extracción de agua de 3,509 millones/m³. Esta acción incrementa al doble el área de abatimiento en la porción noroeste, y la zona central.

Estos efectos, como sucedió en el escenario 1, se deben principalmente a los pozos de los ramales de Coyoacán y Tlahuác-Netzahualcóyotl, que al aumentar su régimen de extracción, aumentan el deterioro de la zona. Se disminuye el efecto de los conos de Tlalpan y Santa Catarina y solo, el cono de San Luis, continúa presente con un abatimiento de 5 m en promedio.

De la parte central y hacia la porción este, la zona conserva los mismos abatimientos, no hay cambios significativos. En la parte este, se comunicaban hidráulicamente los antiguos lagos de Xochimilco y Chalco.

Escenario 3

La Figura 42 muestra la simulación que proporciona el modelo, al aumentar el gasto y la cantidad de los pozos. Como se había mencionado, fueron propuestos para la porción este, 25 nuevos abastecimientos en este escenario.

Para el 2020 se extraerán en la región 4,135 millones/m³. El comportamiento en los descensos de los niveles estáticos, es parecido en lo general, al escenario 2, se incrementa la extensión del cono de abatimiento del ramal de Coyoacán, y en mayor medida el del ramal Tlahuác-Netzahualcóyotl. También se incrementa la zona de influencia de los pozos de San Luis, en el área sur, y se desplaza hacia la zona central.

Los descensos en los niveles de la porción este, bajan de 5 a 10 m en promedio. Se observa que al producir bombeo en esa zona, donde no había un régimen de explotación directa, se altera el gradiente suave que se tenía en el escenario 1.

Al proponer un régimen de extracción en la porción este, el gradiente en los niveles estáticos se modifica y, la dirección de flujo del agua cambia su comportamiento. Como ya se había mencionado, la antigua comunicación de los lagos de Xochimilco y Chalco, permitía un aporte subterráneo, se modifica, los niveles estáticos toman distintas direcciones en esa zona. Además, en las cercanías, se encuentra la batería Mixquic-Santa Catarina de 14 pozos, que abastecen al Estado de México.

Escenario 4

Dado que se planteó la necesidad de tratar de obtener la recuperación paulatina en los niveles de la zona vulnerable. Se tratará de reducir los conos de abatimiento, disminuyendo el bombeo en los ramales antes mencionados.

Nótese que el agua potable extraída, por los pozos de la región es de 4,132 millones/m³ y el comportamiento de los niveles estáticos presenta cierta recuperación en los ramales de Coyoacán y Tlahuác-Netzahualcóyotl, especialmente en este último. Sin embargo es claro que el tiempo empleado en la simulación (17 años) resulta pobre para revertir los efectos ocasionados, sin llegar a igualar los niveles presentes en el escenario 1.

El efecto de los 25 pozos incluidos en la parte este (antigua comunicación con el lago de Chalco) sigue generando efectos no deseados y principalmente la existencia de un gran cono de abatimiento en la parte central (Figura 43).

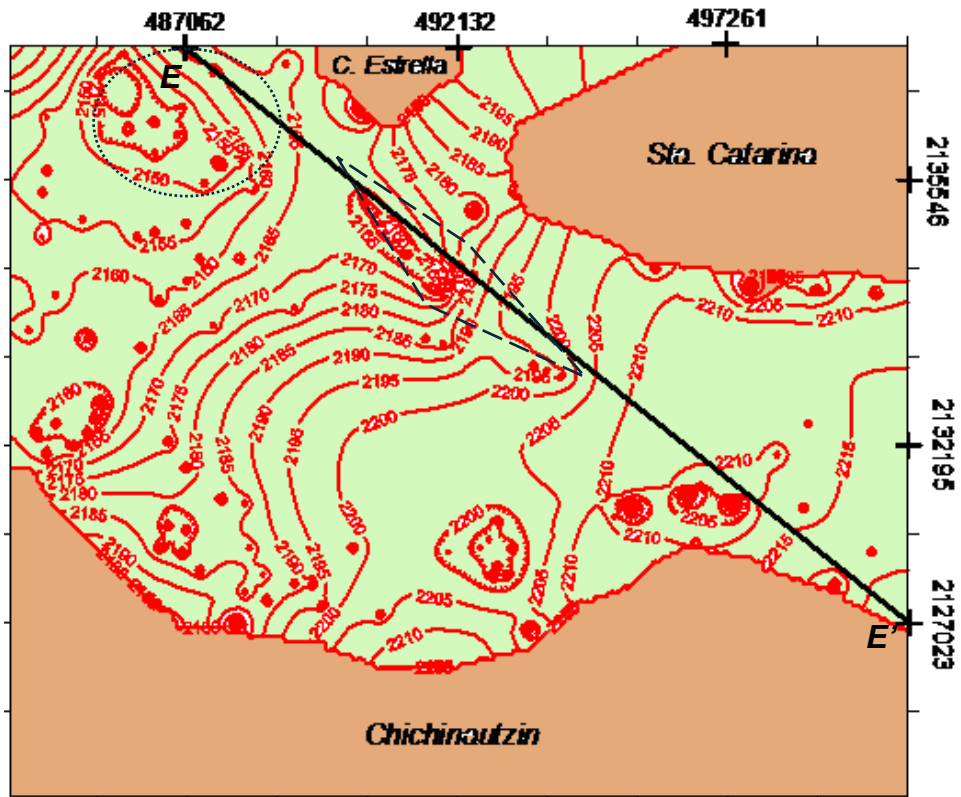


Figura 40. Elevación de los niveles estáticos para la zona de estudio en el escenario 1. Pozos de los ramales de Coyoacán (---) y al centro los de Tlahuác-Netzahualcóyotl (- - -).

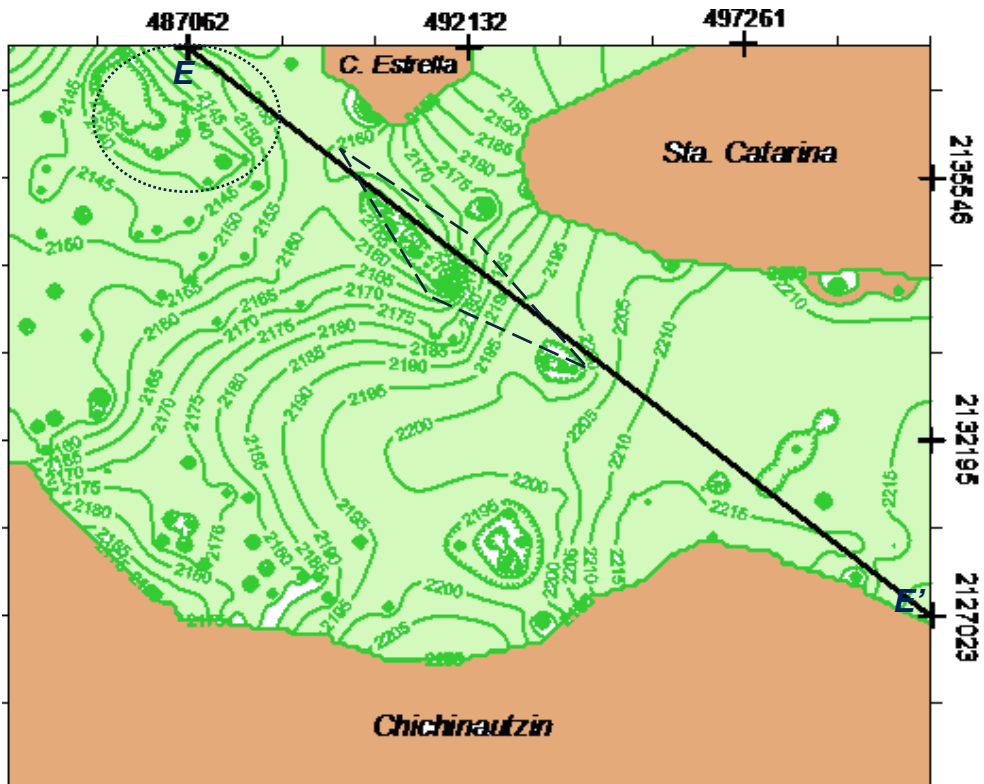


Figura 41. Elevación de los niveles estáticos para la zona de estudio en el escenario 2. Pozos de los ramales de Coyoacán (---) y al centro los de Tlahuác-Netzahualcóyotl (- - -).

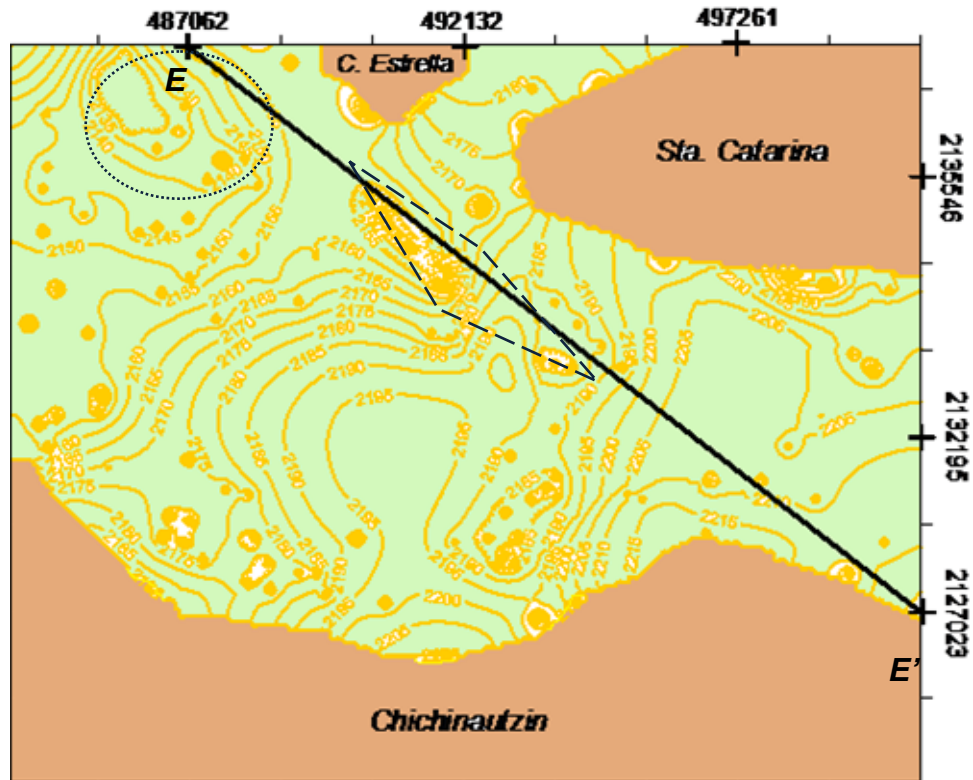


Figura 42. Elevación de los niveles estáticos para la zona de estudio en el escenario 3. Pozos de los ramales de Coyoacán (---) y al centro los de Tlahuac-Netzahualcoyoatl (- - -).

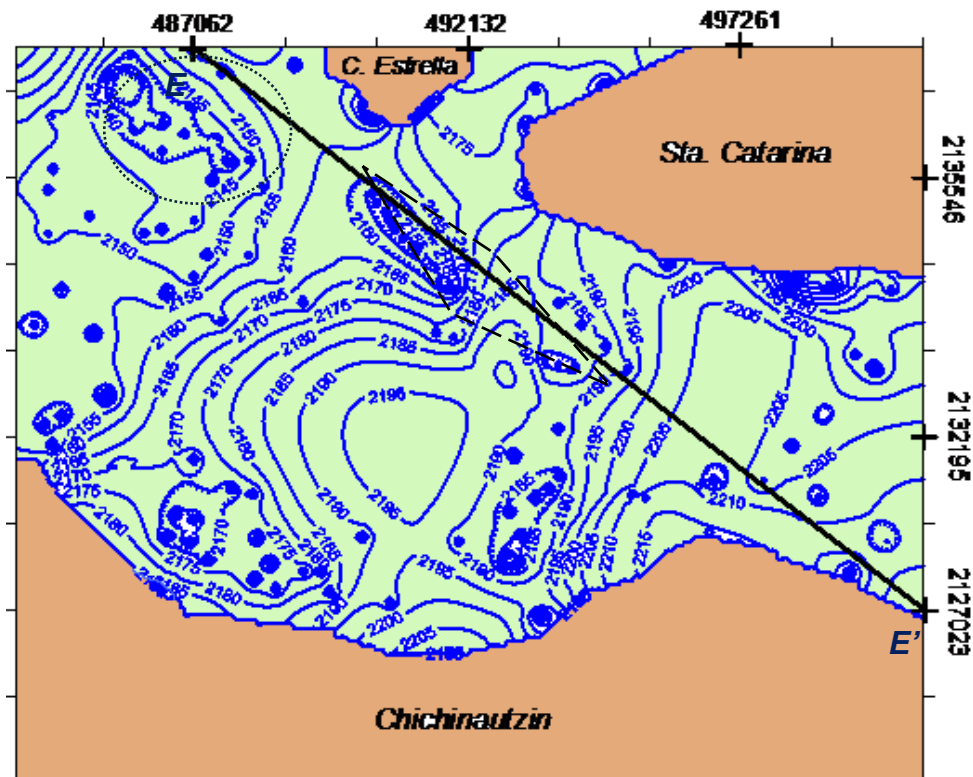


Figura 43. Elevación de los niveles estáticos para la zona de estudio en el escenario 4. Pozos de los ramales de Coyoacán (---) y al centro los de Tlahuac-Netzahualcoyoatl (- - -).

CONCLUSIONES

- Se logró establecer un modelo matemático computacional, para simular el comportamiento del sistema acuífero. El modelo estacionario propuesto, simula de manera aceptable un área de cuatro capas litoestratigráficas de distintas características. Con los parámetros propuestos, se obtuvo la buena reproducción de esta región para el año de 1900, cuando el sistema aún funcionaba en forma natural y estaba poco perturbado.
- El modelo 1, en dos etapas, reproduce los fenómenos que comenzaron el deterioro del comportamiento hidrogeológico de la zona lacustre de Xochimilco en un periodo de 75 años. La primera etapa abarca de 1910 a 1960, lapso en que los manantiales de Xochimilco fueron explotados hasta su agotamiento, se observa el descenso paulatino en las elevaciones en los niveles estáticos en la zona y se comienza la explotación del acuífero con pozos.
- El deterioro en Xochimilco aumenta a partir de la siguiente etapa, de 1960 a 1985 en el modelo 1, cuando el crecimiento de la mancha urbana demanda un incremento de agua potable y propicia la perforación de pozos profundos, se presenta un descenso alarmante de los niveles de los canales y pese a la incorporación de agua tratada, no ayuda a restablecer los niveles deseados en la zona lacustre, todo esto propicia una reducción del área lacustre.
- La comparación entre los valores reportados y los simulados de las cargas hidráulicas en el modelo 1, específicamente 1985, difieren de forma puntual en el área. Por tal motivo, se planteó el modelo 2 para un periodo de 18 años. En este periodo se trabaja con valores conocidos, inicia y termina con configuraciones de niveles estáticos reportados en la zona, así se asegura su confiabilidad en la reproducción del comportamiento del sistema acuífero.
- El modelo 2, reproduce de forma correcta los fenómenos ocurridos en la zona lacustre de Xochimilco para esta etapa. Los abatimientos en el sistema acuífero comienzan a ser acelerados por la explotación de 147 pozos que en promedio tienen una profundidad de 200 m, la distribución de los pozos y el desaprovechamiento de algunas regiones provocan una gran zona vulnerable en la región, ubicada en la parte noroeste del área de estudio, las elevaciones en los niveles estáticos son las más desfavorables, la recarga artificial por las tres plantas de tratamiento no ayudan a la recarga del acuífero de Xochimilco.

Al validar el modelo 2 propuesto, nos permite establecer escenarios futuros que podrían darnos una panorámica del comportamiento de la zona en otro periodo y bajo otras características. Los resultados de los escenarios propuestos indican:

- De mantenerse el ritmo actual de extracción (en un periodo de 17 años), se reducirán en 20 m en promedio los niveles estáticos en las dos zonas vulnerables antes mencionadas y mucho menos, en el resto del área. Sin embargo, si se incrementara la extracción de los pozos, se aumentaría la influencia de la zona de abatimiento, en las áreas descritas.
- El crecimiento urbano y la demanda de agua, propiciarían la perforación de nuevos pozos en áreas no explotadas. Al implementar 25 pozos en la porción este, el cono de abatimiento en el ramal Tlahuác-Netzahualcóyotl expande su área y la profundidad de los niveles freáticos en la porción este disminuye de 5 a 10 m.
- Con la finalidad de tratar de recuperar los niveles en las zonas vulnerables, se propuso reducir en 20% el régimen de explotación de pozos, manteniendo el volumen total que se extrae en el área de estudio. Aunque recupera en varios metros (de 5 a 10) el área noroeste, el comportamiento hidráulico en la porción este se altera.

Aunque desconocemos el régimen de extracción que imperará en los siguientes años en la zona de estudio, suponemos que este aumentará y tendrá repercusiones semejantes a los obtenidos en las simulaciones propuestas.

- Los cuatro escenarios a futuro, muestran aspectos negativos, en el comportamiento de la región. Por esta razón, es necesario proponer alternativas que incidan en el impacto sobre el acuífero y que tiendan a la recuperación de la zona. Los aspectos que podrían modificarse son los relacionados con el balance hidráulico, principalmente incrementar las entradas de agua al sistema y controlar sus salidas, sobre todo en los pozos de extracción.
- El modelo permite establecer alternativas, que permitieran a los tomadores de decisiones establecer las políticas necesarias para tratar de detener el deterioro de la zona. Hoy en día, los canales y lagunas representan poco más de 15% del total, que ocupaba el lago de Xochimilco en 1900.

Acciones recomendadas para estudios futuros en la región de Xochimilco

Algunas propuestas que se pudieran implementar, a futuro, para establecer la forma de mejorar la calidad del paisaje en la zona lacustre de Xochimilco son:

- Dado que la recarga superficial en los canales y lagunas, no aporta agua al acuífero, se propone una inyección directa en zonas estratégicas para mejorar la recarga subterránea.
- Desarrollar un plan de acción para controlar y en lo posible revertir el gran cono de abatimiento presente en la zona noreste. Esto implicaría un estudio más a detalle. Este estudio piloto, requerirá de la intervención y apoyo de las autoridades encargadas de la administración del agua.
- Ampliar la zona de modelación, para comprender mejor el funcionamiento hidráulico de la zona, y observar cómo afecta a la subcuenca que le precede, la de Chalco.
- Una reubicación planificada de los pozos para reducir abatimientos en el área.
- Aprovechando los escurrimientos al pie de la sierra de Santa Catarina, reubicar algún conjunto de pozos en esa zona.
- Proponer que el estudio abarque un periodo de 30 a 50 años, donde se planteen las adecuaciones necesarias para tener una recuperación paulatina de los niveles estáticos del acuífero en explotación.

Si fuera posible:

- Reubicar los asentamientos irregulares en la zona lacustre, para aumentar las zonas inundables y los lugares de escurrimientos.
- Recibir agua tratada de la mejor calidad posible para no afectar a las especies endémicas de la zona (Ajolote, acocil, charal, carpa y tilapia) y otras especies vegetales.

LITERATURA CITADA

- Acevedo L. S., 1972. Monografía histórica de Xochimilco. Edición mimeografica.
- AGN., 1782. Archivo General de la Nación Desagüe. México. Vol. 22.
- Aguilera, H. M., 1987. Rehabilitación de suelos de chinampas y su relación con las plantas cultivadas. Boletín del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. pp 1-28.
- Aguirre M. L. y Estévez J., 1992. Estudio Edafológico del Parque Natural de Xochimilco. Departamento de suelos y aguas del Parque Ecológico de Xochimilco. México. 175 p.
- Alfaro S. G. y Orozco C. F., 1980. Estudio edafológico del ejido de Xochimilco, Ciénaga Grande. Tesis de Licenciatura Biología. UNAM, México. 103 p.
- Altamirano M. J., 1988. Contaminación de los Canales y Lago de Xochimilco. Reporte Final de Servicio Social. UAM – Xochimilco, México, 160 p.
- Anderson M. P. and Woesner W. W., 1992. Applied Ground Water Modeling. Edit. Academic Press. U. S. San Diego. 381p..
- Arcos R., E. Cabrera M. Pérez M. Ruiz y S. Soriano, 1995. Evaluación de la Calidad del Agua de los Canales Chinamperos de Xochimilco, Posibles Alternativas de Usos y Tratamiento. Memorias, II Seminario Internacional de Investigación de Investigadores de Xochimilco, pp 76-82.
- Arcos R. R., Cervantes S. A., Guerrero V. R., Tapia O. F., 2006. Comparación del deterioro ambiental en relación al comportamiento físico y químico en tres diferentes periodos del lago de Xochimilco. Memorias VI congreso internacional y XII Nacional de ciencias ambientales, Chihuahua, México. pp 688-693
- Aréchiga C. E., 2004. Xochimilco y el agua. Historia de Xochimilco en el siglo XX. Gobierno del D.F. Delegación Xochimilco. México. pp 97-192.
- Balanzario, Z. J. R. 1976. Contaminación de las aguas de los canales de Xochimilco. Tesis Licenciatura. Licenciado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México. 76 p.
- Banks S., 1993. Exploratory modeling for policy analysis. Oper. Res. Vol. 4. 435 pp.
- BENTON, 2003. Diseño de pozos de recarga con agua tratada y sistemas de control en el área del Cerro de la Estrella. BENTON y Asociados para GDF. Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM. México. Vol. I

- Berbeyr M. R., 1961. Cuantificación y balance de las aguas subterráneas de la Cuenca del Valle de México aprovechables en el D. F. Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. México. Vol. I.
- Bryan K., 1919. Clasificación of spring. *Journal of Geology*. 27: pp 522 – 561.
- CAGIGAS V. J. R., 2003. Actualización del balance hidráulico de la zona lacustre de Xochimilco. Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM. México. Vol. I, II, III, IV.
- CAVM, 1975. Pozos del Distrito Federal, cortes litológicos y gastos. CNA Comisión Nacional del Agua Dirección General de Construcción, Residencia General de pozos. México. Vol. I y II.
- CGTP, 1999. Estudio para determinar el balance hidrológico de la zona lacustre de Xochimilco. CG Topografía Especializada para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. México. Vol. I.
- CHU, 2004. Estudio para la georeferenciación de las instalaciones hidráulicas a cargo del Sistema de Aguas de la Ciudad de México en la Delegación Iztapalapa mediante posicionamiento GPS. CHU, Ingeniería y Sistemas S. A. de C. V. para GDF. Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM. México. Vol. IV.
- CIBERHIDROGEOFISICA, 1999. Estudio para el diagnostico del hundimiento de los canales de la zona lacustre del sur del D.F. con el empleo de modelos matemáticos para generar un pronóstico de evaluación. Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM. México. Vol. I, II, III, IV.
- Cisneros I. L. P., 2005. Aspectos ambientales relacionados con la calidad del agua en Xochimilco, D.F. Tesis de Licenciatura. Biología. UNAM. México D.F. 91 p.
- CNA, 2008. Documento de gastos y ubicaciones de pozos para el periodo 2003 - 2008. Proporcionado por las oficinas de GRAVAMEX y supervisado por la CNA. México D.F. pp 1-5.
- Damon E. P., M. Shafigullah y F. K. Clark, 1981. Evolución de los Arcos Magmaticos en México y su relación con la Metalogénesis. *Rev. Inst.Geol.*, UNAM, 5, 2, pp. 223-238.
- DDF., 1975. Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal. Departamento del Distrito Federal. México D. F. Vol. I 180 p.
- DDF, 1994. Diagnostico del estado presente de las aguas subterráneas de la Ciudad de México y determinación de sus condiciones futuras. Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Sistema General de Obras. UNAM Instituto de Geofísica. México. 110 p.

- DDF, 1996. Xochimilco 1955-1996. Monografía. Departamento del Distrito Federal. Gobierno de la Ciudad de México.
- DEMM, 1991. Zonificación de los canales de Xochimilco D. F. DEMM Consultores S. A. de C. V. para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. México. Vol. I.
- DGCOH, 1987. Plan Maestro de agua potable del D.F. Dirección Técnica de Subdirección de programación. Planes Maestros. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Departamento del Distrito Federal. México D.F. Vol. I.
- DGCOH, 1987. Simulación del funcionamiento hidráulico del sistema lagunario de Xochimilco. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Sistema General de Obras. México. 45 p.
- DGCOH, 1994. Sistema hidráulico del Distrito Federal (Cronología). Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Sistema General de Obras. México. 184 p.
- DGCOH, 2005. Plan de acciones hidráulicas 2001-2005. Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Delegaciones Xochimilco, Iztapalapa, Coyoacán, Tlalpan, Tlahuac. México. 110 p.
- Domínguez R. A. y Díaz R. G., 2004. Evaluación de la Concentración de Metales Pesados (Cd, Cr, Pb y Zn) Tanto en la Columna de Agua Como en Tres Especies de Macrofitas Acuáticas: Lirio (*Elchornia crassipes*), lentejilla (*Lemna gibba*) y Elodea (*Egeria densa*) en el Lago de Xochimilco. Tesis de Licenciatura, FES-Zaragoza, UNAM, México D.F. 139 p.
- DRINGF, 1992. Estudio de trazadores isotópicos del agua subterránea en la zona de Tepoztlán Morelos, de la vía férrea México- Cuernavaca. Realizado por el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM. México.
- Escolero F. O., 2004. Aplicación de modelos de simulación para la gestión del agua subterránea. En la gestión del agua en México: Los retos para el desarrollo sustentable. Jacobo-Villa, M. A. y Saborio. Universidad Autónoma Metropolitana. México. pp. 33-38.
- EXYCO, 1993. Estudio en el que se interpretan las pruebas de bombeo realizadas en el Distrito Federal. EXYCO S. A. de C. V. para el Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. México. Vol. I.
- Fernández A. M. A., 1986. El sistema chinampero como una alternativa para el cultivo de peces. Tesis Licenciatura. Biología. ENEP-Iztacala. UNAM. México. 49p.

- Fitts C. R. 2002. Groundwater science. Edit. Academic Press. San Diego California. USA. 450p.
- García M. B., 2007. La Cuenca de México. Arqueología Mexicana. Vol. 15 Núm. 86. México. pp71.
- González M. A., 1990. Plan para la regeneración ecológica y el desarrollo regional en la cuenca hidrológica de Xochimilco. Grupo de Estudios Ambientales Friedrich Ebert. México. pp 67 – 102.
- Guerrero V. G., Moreno F. A., Garduño V. H., 1982. El sistema hidráulico del Distrito Federal, Un servicio público en transición. Departamento del Distrito Federal. México, D.F. 210 p.
- Harbaugh A. W. and McDonald M. G., 1996. Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U. S. Geol. Surv. Modular finite-diference ground-water flow model. U. S. Geol. Surv. Open-File Report 94 – 486, 220 p.
- Hsieh A. P., Bra M. J., Doe W. T., Flint L. A., 2001. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. National Academy Press. Washington D. C. USA. 374 p.
- INEGI, 2000. Cuaderno Estadístico Delegacional, Xochimilco, D.F. 163 p.
- INEGI, 2001. Xochimilco, Distrito Federal. Cuaderno Estadístico Delegacional. México. 138 p.
- Lesser, 2003. Estudio de medición de red de pozos piloto en la parte sur de la Cuenca del Valle de México, medición parámetros y análisis de la evolución en 2003. Lesser y Asociados para GDF. Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM. México. Vol. I y II.
- Loehnberg A., 1959. Estudio de los recursos de agua subterránea disponible en la región sureste del Valle de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Sistema General de Obras. México. Vol. I.
- Lugo de la F. J. A., 1984. Suelos sódicos–salinos del Ejido de Xochimilco. Tesis de Licenciatura Biología. UNAM México. 90 p.
- Lugo H. J., 1984. Geomorfología de la zona sur de la Cuenca de México. Instituto de Geografía UNAM. Serie Varia T. 1. Núm. 8. México. 95 p.
- Marzal R. J. y Masari M., 1959. El subsuelo de la ciudad de México. UNAM. Facultad de Ingeniería. México D. F.
- Mazari, M. y Alberro J., 1990. Hundimiento de la Ciudad de México. En Problemas de la Cuenca de México. Kumate J. y Mazari M. Edit. El Colegio Nacional, México DF 83-95 p.

- McDonald M. G. and Harbaugh A. W., 1984. A Modular Three-dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model. Scientific Publications Co. Washington D. C.
- Mendoza R.M., 1961. Estudio geográfico de la Delegación de Xochimilco. Tesis de Maestría. Facultad de Filosofía y Letras. Colegio de Geografía. UNAM. 113 p.
- Model View 2002., Manual para el manejo del preprocesador MFI2K en MODFLOW 2000. <http://water.usgs>. 36 p. (consultada el 7 de septiembre de 2008).
- MODVM, 1902. Memorias de las obras del desagüe del Valle de México (1449 – 1900). Obras del Desagüe del Valle de México, Tipografía de la oficina impresora de estampillas. México. Vol. I y II. 462 p.
- Mooser F., 1990. Estratigrafía y estructura del Valle de México. en la revista de la SMMS.
- Mooser F. y Molina C., 1993. Nuevo modelo hidrogeológico para la Cuenca de México. En Boletín del Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra. Vol. III, No. 1.
- Moreno I. L., 2005. Estudio edafológico de algunas chinampas de Xochimilco. México D. F. Tesis de Licenciatura Biología. UNAM, México. 48 p.
- Niederberg B. C., 1987. Paléopayseges et archéologie pré-urbaine du bassin de México, México, CEMCA, Col. Études Mésoaméricaines 1-13. Vol. I y II. 855p.
- Olabode I. I. A., 2000. Purificación de las aguas residuales tratadas de los canales de Xochimilco para el uso de riego agrícola. Servicio Social. QFB. UAM-Xochimilco. 53 p.
- Orozco y Berra M., 1864. Memoria para la carta hidrográfica del Valle de México. México. Boletín de la Sociedad Mexicana de geografía y estadística. T IX, México 185 pp.
- Ortiz, R. B. y Ruvalcaba G. A., 2005. Evaluación del Estado Trófico del Lago de Xochimilco, Méx. Tesis de Licenciatura, FES-Zaragoza, UNAM, México D.F. 105 p.
- Palerm A., 1973. Obras hidráulicas prehispánicas en el sistema lacustre del Valle de México. Edit. S.E.P por I.N.A.H., México D.F. 244 p.
- Peñafiel A., 1884. Memoria sobre las aguas potables de la Capital de México. Secretaría Fom. México D.F.
- Pérez-Fons, R., 1993. Xochimilco: Rescate de un pueblo y de un paisaje. Tiempo. México. pp 6-13.

- Pinder F. G. 2002. Groundwater modeling using geographical information systems. Edit. John Wiley & Sons. New York USA. 233 p.
- Ramírez A. H., 1987. Informe general de problemas sobresalientes en la zona lacustre de Xochimilco. Proyecto de emergencia a la zona lacustre de Xochimilco-Tlahuac. 48 p.
- Rebolledo M. D. y López L. E., 1987. Geomorfología e Hidrogeología de la Delegación Xochimilco. Instituto Politécnico Nacional Ciencias Biológicas. México. 139 p.
- Rodríguez C. R. y Ochoa a. C., 1989. Geología de la cuenca de México. Revista Geofísica Internacional. Vol. 28 Núm. 2. pp. 191-206.
- Rojas R. T., 2004. Las cuencas lacustres del Altiplano Central. Arqueología Mexicana. Vol. 12. Núm. 68. México. pp 25.
- Rojas R. T., Strauss A. R., Lameiras J., 1974. Nuevas noticias sobre las obras hidráulicas prehispánicas y coloniales en el Valle de México. Edit. S.E.P. por I.N.A.H. México D.F. 231 p.
- Romero, L. P. 1993. Impacto socio ambiental en Xochimilco y Lerma, de las obras de abastecimiento de la Ciudad de México. UAM-Xochimilco. México. 151 p.
- Rushton K. R. 2003. Groundwater hydrology conceptual and computational models. Edit. John Wiley & Sons. England. 416 p.
- Salas S. I., 1998. estudio de la vegetación del Parque Ecológico de Xochimilco. Tesis de Licenciatura Biología. Facultad de Ciencias UNAM. México.
- Sandoval C. J., 2003. Calidad Microbiológica y Fisicoquímica del Agua de los Canales de Xochimilco D.F. Tesis licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México, 64 p.
- Santoyo V. E., Ovando S. E., Mooser F., León P. E., 2005. Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México. Edit. TGC. México D.F. 172 p.
- Schwartz W. F. and Zhang H., 2003. Fundamentals of Ground Water. Edit. John Wiley and Sons Inc. U. S. New York. 583 p.
- Shilling K. E., 1939. Los jardines flotantes de Xochimilco.
- SRH, 1964. Hidrología de la Cuenca del Valle de México. Secretaria de Recursos Hidráulicos. Oficina de Hidrología. México D.F. Tomo I. 246 p.
- TASA, 1997. Diagnostico del sistema hidráulico de la Delegación Xochimilco D. F. TASA Tecnología Aplicada S.A. de C.V. para la Dirección General de Construcción de Obras Hidráulicas. México D. F. Vol. I.

- Terrones L. M. E., 2004. A la orilla del agua política, urbanización y medio ambiente. Historia de Xochimilco en el siglo XX. Gobierno del D.F. Delegación Xochimilco. México. 288 p.
- Trejo C. A., 1984. Estudio Edafológico del Ejido Grande de Xochimilco, Tesis Facultad de Ciencias, UNAM, México. 111p.
- USGS., 2007. <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/ofr00-92.pdf> (consultada el 28 de agosto de 2008).
- Vargas R. G. 2003. Análisis fisicoquímico de agua en cuatro estaciones posicionadas del canal Cuemanco en Xochimilco. Servicio Social. QFB. UAM-Xochimilco. 45 p.
- Vázquez S. E. y Jaimes P. R, 1989. Geología de la cuenca de México. Revista Geofísica Internacional. Vol. 28 Núm. 2. pp. 133-190.
- Vela E., 2004. La Cuenca de México a vuelo de pájaro. Arqueología Mexicana. Vol. 12. Núm. 68. México. pp 85.
- Viniegra O. F. 1992. Geología histórica de México. Edit. SESIAB. México. 213 p.
- Watts K. R. 1989. Potencial hidrogeológico de los efectos de agua subterránea en un acuífero de Dakota, suroeste de Kansas. USGS. Water Supplí Paper 2304. 47p.
- Woessner W. W. and Anderson M. P. 1990. Setting calibration targets and assessing model calibration – room for improvement: an example from North America, in: Calibration and Reliability in Ground Water Modelling. Edit. K. Kovar USA. IAHS Pub. 125. pp 279 – 290.
- Zúñiga A. A. R. 2003. Análisis de la secuencia estratigráfica y construcción de secciones en la zona entre el Pedregal de San Ángel y el cerro de la Caldera con base en la correlación física y la interpretación estratigráfica de 75 pozos en la Delegación Coyoacán e Iztapalapa. GDF. Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM. México. Vol. II.

APÉNDICES

Apéndice 1: Momentos históricos de las aguas de Xochimilco

A continuación se presentan una serie de eventos a lo largo de la historia del lago de Xochimilco, son momentos decisivos que por su relevancia influyen en los parámetros que se desarrollaran en el modelo matemático computacional propuesto para esta trabajo.

1900

Se comienzan a desarrollar los estudios para resolver el problema de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de México. Con los estudios hechos por Peñafiel (1884), se expropiarán las aguas de Xochimilco. La Ciudad de México para este año, tenía aproximadamente 500 000 habitantes (Lugo de la F., 1984).

1901

Se decreta la construcción del sistema de dotación de agua potable para la Ciudad de México (Acueducto de Xochimilco). Se tomaron los recursos de los manantiales de Xochimilco para conducirlos, a la capital, a través de un gran acueducto de concreto armado (Figura A₁-1). La obra monumental dirigida por el Ingeniero Manuel Marroquín y Rivera, formó parte de los servicios públicos de la Ciudad de México (MODVM, 1902)

1902

Se inicia la captación de los manantiales regionales y la construcción del acueducto de Nativitas a Molino del Rey. El proyecto contaba con cinco plantas de bombeo: cuatro para los manantiales La Noria, Nativitas, Santa Cruz, Acalpíxtla y San Luis Tlaxialtemalco; y cuatro tanques de almacenamiento de 500 000 m³ cada uno, de reserva para un día (González, 1990).

1908

Antes de concluir el programa hidráulico, la Ciudad de México, a partir del 16 de julio de 1908, empezó a abastecerse con agua extraída de los manantiales de la Noria (Aréchiga, 2004).

Se termina el acueducto principal de Xochimilco. La obra consisten dos acueductos, conectados uno después, del otro. El de menor longitud media 6 m y el segundo, 26 km (Aréchiga, 2004).

1909

La capacidad de las plantas de bombeo en los manantiales era de 300 l/s para la Noria, y de 600 l/s, para Nativitas, Santa Cruz y San Luis, arrojando un total de 2 100 l/s (SRH, 1964).

1912

La construcción del tren de Xochimilco a Tulyehualco, implicó el relleno de una zona de manantiales en esa zona (González, 1990).

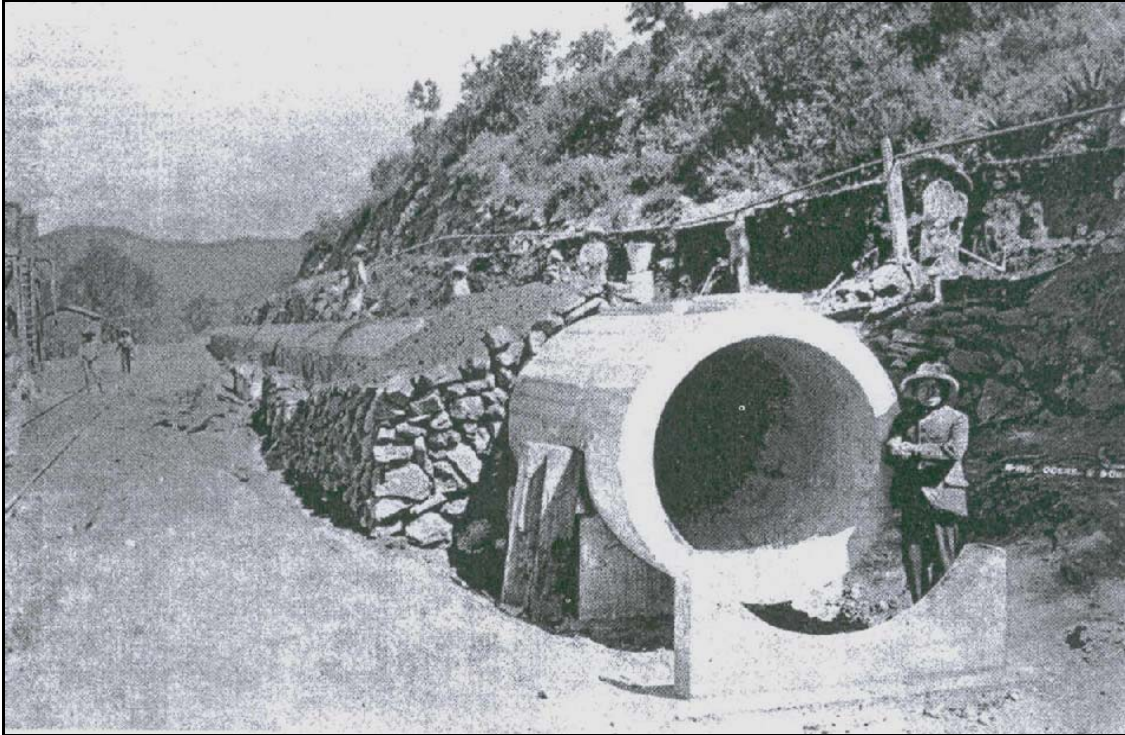


Figura A₁-1. Tubo de concreto utilizado para el acueducto que llevaría agua de los manantiales de Xochimilco, hacia la Ciudad (Tomado de Aréchiga, 2004).

1914

Nuevas obras rellenaron y terraplenaron algunos manantiales de Nativitas, a fin de permitir que aquellos bajo explotación, como el de Quetzalapa, proporcionaran más agua. Había manantiales desde Tlalpan hasta Chalco (DGCOH, 1994).

1918 a 1923

Ocurren restituciones en los ejidos de Xochimilco (Ciénega Grande y Ciénega Chica) y San Gregorio en la zona norte de la cuenca baja de Xochimilco. Producto de la conversión de superficies lacustres, en zonas pantanosas (González, 1990). Se abre un canal para comunicación fluvial, para el transporte de mercancías entre Mixquic y Tulyehualco que además de conducir el agua, de los manantiales de Tetelco y Tezompa hasta el lago de Xochimilco, sirve para el lavado de las atarjeas de la capital (González, 1990).

1926

Se limpiaron los canales de desfogue de la Noria a San Luis Tlaxialtemalco en una longitud de 6439 m (DGCOH, 1994).

1927

La población requiere un incremento notable en el consumo de agua. Se tomaron medidas para ejecutar nuevas obras de captación, restringir el fuerte desperdicio de agua, perforar 21 pozos de 400 l/s en San Luis Tlaxialtemalco, y colocar una bomba en el acueducto de Xochimilco (Terrones, 2004).

La Ciudad de México recibió a finales de este año un caudal de 2.5 m³/s para abastecimiento de sus habitantes (Terrones, 2004).

1930

La población de la capital aumenta rápidamente su tasa de crecimiento, en consecuencia generó mayor presión para los servicios urbanos (Terrones, 2004).

1931

Se explotan los manantiales de Monte Alegre, Saucedo y Tulmiac, en la Sierra del Ajusco que, aportaban un caudal de 66 l/s para dotar a los pueblos de las montañas en Xochimilco. Poca cantidad en comparación con los aproximadamente 3 100 l/s que en esas fechas aportaban los manantiales de Xochimilco a la Capital Mexicana (DGCOH, 1994).

Se construyó un acueducto de 42 km en su línea principal, y 63 km de líneas secundarias (Figura A₁-2), que bajaba de la parte alta de la Sierra del Ajusco hacia los pueblos de las montañas de Xochimilco, Tlalpan y Milpa Alta (DGCOH, 1994).

1932

En la región de Xochimilco, se terminan dos unidades de bombeo, con capacidad para 300 l/s, en San Luis Tlaxialtemalco (SRH, 1964).

1935

Para hacer posible el tránsito de las embarcaciones en los canales de la zona lacustre de Xochimilco, que estaban a punto azolverse, se mejoran las condiciones de escurrimiento (González, 1990).

1939

Las nuevas fuentes para el abastecimiento de agua para la Ciudad de México fueron: La Noria, Nativitas, Santa Cruz, San Luis entre otras, además de 56 pozos que completaban el abastecimiento de agua, a colonias y pueblos de todas las delegaciones (DGCOH, 1994).

1940

Comienza a notarse una disminución de agua en los canales de la zona lacustre de Xochimilco en sus canales particulares. Se construyen pozos, más profundos (González, 1990).

1945

Ya casi desecado, se rellena el canal de la Viga. Se inicia el dragado periódico de los canales mayores (acolotes), con intención de facilitar el tránsito de canoas turísticas (González, 1990).

1950

Hay una desecación casi total, de Xochimilco y Mixquic-Tetelco, es la primera desecación histórica (González, 1990).

1957

Se inicia la introducción de las aguas negras del río Churubusco al área lacustre (González, 1990).

El D.D.F. comenzó a restituir parte del volumen del agua extraída de los manantiales mediante la alimentación artificial de los canales, el desvío del río San Buenaventura a través del canal Nacional (DGCOH, 1994).

1958

A fin de incrementar el caudal de agua potable disponible para la Ciudad de México se perforaron ocho pozos profundos en la zona alta de Xochimilco, saturando la capacidad del acueducto, que era de 3 m³/s. Se dragaron los canales y se extrajo un volumen superior a los 200 000 m³ de sedimentos (DGCOH, 1994).

1959

Se crea la planta de Xochimilco tenía una capacidad de 400 l/s, para permitir la recuperación del lago. Se realiza la inyección a la zona lacustre de aguas negras tratadas provenientes de la planta Aculco en Coyoacán (DGCOH, 1994).

1960

Se entuba el agua de un manantial más en Nativitas (Terrones, 2004).

Los árboles del área chinampera comienzan a plagarse como efecto de las inundaciones con aguas negras (Aréchiga, 2004).

Por efecto del proceso de extracción de agua ocurre otra desecación alarmante, reduciendo los niveles de los canales en Xochimilco, es la segunda desecación histórica (González, 1990).

1961

Se construye la planta potabilizadora de Santa Catarina, con capacidad de 400 l/s, permitiendo incorporar esta agua al sistema Xochimilco-Chalco (DGCOH, 1994).

Los manantiales de Xochimilco prácticamente se agotaron, pero se mantuvo la explotación del agua de la zona, mediante la perforación de pozos profundos (Terrones, 2004).

1965

Se dragaron los canales de Xochimilco, San Gregorio, San Luis y Tlahuác (DGCOH, 1994).

1966

Se construyó la pista de remo y canotaje, para lo cual se perforaron dos pozos, de 200l/s y se instaló la planta potabilizadora de Santa Catarina, para utilizar 500 l/s, de 88 pozos cercanos (DGCOH, 1994).

1968

Se terminó la obra para elevar agua del sistema subterráneo, del área de Xochimilco-Mixquic, a los tanques del almacenamiento del Cerro de la Estrella (DGCOH, 1994).

1970

Al dragar la región de Santa Cruz, se presenta una nueva desecación en la zona lacustre, a raíz de la construcción y puesta en marcha de un nuevo sistema de pozos a lo largo del Canal de Chalco, al norte de los ejidos de Xochimilco, esta es la tercera desecación histórica (González, 1990).

1971

Entra en operación la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella. Para aumentar su abastecimiento de agua potable se perforaron 35 pozos y aforaron otros 29 del sistema Tlahuác-Mixquic-Xochimilco (DGCOH, 1994).

1972

Es dragado el Canal Nacional, lo que contribuye al debilitamiento de la zona chinampera. Se incrementa la compactación y el hundimiento del área norte de la chinampería (Aréchiga, 2004).

1974

La mitad de la laguna, frente al embarcadero Fernando Celada, es rellenada con piedra y tierra para ampliar la avenida Guadalupe I. Ramírez. Se inundan las chinampas de Asunción, al noreste; el agua llega hasta 1.5 m arriba de la chinampería (González, 1990).

1976

Un informe estima que el área ocupada por los canales se aproximaba a las 2200 ha y tenía forma irregular. Según este documento clasificaba los canales en cuatro categorías según su anchura: primarios, de 19 a 60 m, secundarios de 7 a 18 m, terciarios de 3 a 6 m, y cuaternarios de 1 a 2 m.

En algunos puntos de encrucijada entre los canales primarios, según esta clasificación, se abren las lagunas El Toro, Tlilac, Xaltocan, La Asunción, Tezhuilo y La Virgen (Terrones, 2004).

1980

En esta década se hicieron obras para la recuperación del agua de lluvia y conducirla hacia la zona de los canales en la zona lacustre de Xochimilco, como la construcción de interceptores pluviales en los pueblos de San Gregorio Atlapulco, Santa Cruz Acapixtla y Santa María Nativitas y del colector de la presa de San Lucas Xochimanca (DGCOH, 1994).

1985

Con los sismos de septiembre, en la Ciudad de México, se fractura el fondo de un canal en San Gregorio y se forma un resumidero que en menos de tres días absorbe toda el agua de la zona (González, 1990).

1987

Se logra revertir la expropiación del centro de Xochimilco. En diciembre la UNESCO decreta Patrimonio Cultural de la Humanidad a Xochimilco y al centro de la Ciudad de México (Terrones, 2004).

1989

Se inició la operación del primer modulo de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis Tlaxialtemalco, con capacidad inicial de 75 l/s y su tratamiento es de nivel terciario (DGCOH, 1994).

1991

Se amplió en un 1 m³/s, la capacidad de tratamiento del agua residual de la planta del Cerro de la Estrella, dotándole de la infraestructura necesaria para producir agua, a nivel terciario, para obtener 4 000 l/s (DGCOH, 1994).

1994

Se inicia la recarga del acuífero del Valle de México, a través de lagunas de infiltración, con 1 000 l/s, con un agua de excelente calidad proveniente de la planta de tratamiento, del Cerro de la Estrella, en las estribaciones de la Sierra de Santa Catarina (DGCOH, 1994).

1999

En Xochimilco, entra en operación una tercera planta de tratamiento de aguas residuales, llamada San Lorenzo, con un volumen aproximado de 632 000 m³/año (DGCOH, 1994).

Apéndice 2: Pozos de extracción en el área de estudio

<u>nombre del pozo</u>	<u>clave</u>	<u>ubicación</u>	<u>Coordenadas UTM</u>		<u>gasto m³/d (Q)</u>
			<u>X</u>	<u>Y</u>	
auxiliar 1-A	XOT-1A	coyoacán	485710	2137175	-1900.8
auxiliar 1-B	XOT -1B	coyoacán	485423	2137409	-6048
auxiliar 1-C	XOT -1C	coyoacán	485776	2137448	-4233.6
auxiliar 2-A	XOT -2A	coyoacán	485615	2137111	-3456
auxiliar 4-A	XOT -4A	coyoacán	485924	2136969	-7344
auxiliar 7-A	XOT -7A	coyoacán	486431	2135963	-3628.8
auxiliar 11-A	XOT -11A	coyoacán	486868	2135774	-2851.2
auxiliar 2-B	XOT -2B	coyoacán	485684	2137456	-1814.4
auxiliar 4-B	XOT -4B	coyoacán	486405	2136581	-5356.8
auxiliar 6-B	XOT -6B	coyoacán	486828	2136297	-1123.2
auxiliar 9-B	XOT -9B	coyoacán	487569	2135841	-1036.8
auxiliar 11-B	XOT -11B	coyoacán	487970	2135735	-6998.4
auxiliar 2-C	XOT -2C	coyoacán	485836	2137400	-2505.6
auxiliar 3-C	XOT -3C	coyoacán	485999	2137236	-3542.4
auxiliar 7-C	XOT -7C	coyoacán	486905	2136799	-3628.8
auxiliar 10-C	XOT -10C	coyoacán	487396	2136174	-2851.2
periférico 1	PER-1	coyoacán	485472	2136324	-2592
periférico 3	PER-3	coyoacán	485051	2134734	-4147.2
periférico 4	PER-4	coyoacán	484582	2133252	-5788.8
periférico 13	PER-13	coyoacán	485907	2136360	-5529.6
periférico 14	PER-14	coyoacán	488030	2133903	-5788.8
periférico 16	PER-16	coyoacán	489345	2133869	-2332.8
educación 2	48	coyoacán	485842	2137836	-3110.4
ruíz cortinez	130	coyoacán	484371	2136628	-4665.6
viveros del reloj 1	176	coyoacán	484300	2135236	-3801.6
viveros del reloj 2	248	coyoacán	484377	2135652	-3110.4
issste coapa 3	307	coyoacán	486990	2134540	-8985.6
issste coapa 4	308	coyoacán	487302	2135298	-7603.2
PS-25	PS-25	coyoacán	484283	2134328	-3456
cedral	316	coyoacán	488230	2135296	-1900.8
san francisco culhuacán	218	coyoacán	487506	2137482	-4492.8
issste coapa 1	305	tlalpan	486986	2133520	-5875.2
issste coapa 2	186	tlalpan	487221	2133938	-2678.4
nuevo huipulco	226	tlalpan	485079	2132396	-3196.8
periférico 2	PER-2	tlalpan	486350	2134425	-6307.2
periférico 10	PER-10	tlalpan	486803	2132179	-5011.2
preparatoria 5	122	tlalpan	486037	2134330	-6393.6
periférico 6	PER-6	tlalpan	484057	2132592	-1123.2
multifamiliar coapa 7	COA-7	tlalpan	487465	2132658	-6566.4
multifamiliar coapa 8	COA-8	tlalpan	486446	2133145	-4838.4
R1	R-1	tlalpan	484490	2130776	-2505.6
R2	R-2	tlalpan	484119	2130573	-2073.6
R3	R-3	tlalpan	484803	2130353	-1036.8
R4	R-4	tlalpan	485063	2130603	-2246.4
R5	R-5	tlalpan	485352	2131121	-2332.8
R6	R-6	tlalpan	4861113	2131077	-2160
R8	R-8	tlalpan	485726	2131317	-1296
san pedro mártir	223	tlalpan	484381	2130168	-2851.2
c.estrella1	335	iztapalapa	488788	2137532	-4838.4
c. estrella 2	324	iztapalapa	491396	2137138	-4665.6
g. estrella 1	41	iztapalapa	490079	2136694	-1987.2

g. estrella 2	42	iztapalapa	490222	2136618	-1900.8
sta catarina 10	SC-10	iztapalapa	493069	2135530	-1123.2
sta catarina 11	SC-11	iztapalapa	492365	2135167	-3283.2
tulyehualco 2	TUL-2	tlahuac	499873	2127887	-2246.4
tulyehualco 4	TUL-4	tlahuac	498972	2129742	-4406.4
tulyehualco 5	TUL-5	tlahuac	498679	2130293	-2332.8
sta catarina 2	SC-2	tlahuac	500021	2133635	-3456
sta catarina 3	SC-3	tlahuac	498942	2133758	-3456
sta catarina 4	SC-4	tlahuac	497566	2133836	-3456
sta catarina 6	SC-6	tlahuac	495650	2134057	-3456
el mirador 1	273	xochimilco	474044	2127502	-5443.2
el mirador 2	274	xochimilco	494219	2127687	-5616
el mirador 3	275	xochimilco	494190	2127195	-5875.2
monte sur 1	303	xochimilco	487678	2124354	-1814.4
monte sur 2	304	xochimilco	487707	2124924	-1296
nativitas 2	278	xochimilco	493839	2126273	-4579.2
nativitas 3	279	xochimilco	490540	2126582	-4320
noria 1	1	xochimilco	486572	2129904	-3542.4
noria 2	2	xochimilco	486922	2129412	-5443.2
noria 3	3	xochimilco	487564	2128797	-3024
noria 4	4	xochimilco	488002	2128765	-6393.6
noria 6	6	xochimilco	488001	2128366	-3888
panteón san lucas xochimanca	277	xochimilco	488380	2126829	-2678.4
periférico 11	PER-11	xochimilco	488413	2132845	-1641.6
reclusorio sur 1	210	xochimilco	486511	2126523	-2937.6
reclusorio sur 2	209	xochimilco	486803	2126123	-3024
residencial sur	271	xochimilco	486019	2131687	-4665.6
S1	S-1	xochimilco	488906	2127228	-3542.4
S2	S-2	xochimilco	486861	2126461	-4060.8
S3	S-3	xochimilco	489402	2126767	-3542.4
S4	S-4	xochimilco	486336	2126185	-3283.2
S5	S-5	xochimilco	493314	2126365	-2678.4
S6	S-6	xochimilco	494452	2125996	-2678.4
S7	S-7	xochimilco	492934	2126919	-4147.2
S8	S-8	xochimilco	488293	2127352	-5443.2
S9	S-9	xochimilco	486018	2130089	-4320
S10	S-10	xochimilco	485171	2130335	-2505.6
san gregorio atlapulco 1	212	xochimilco	492993	2127872	-1900.8
san gregorio atlapulco 2	212-A	xochimilco	489578	2127965	-1987.2
san lorenzo atemoaya 1	213	xochimilco	489256	2127167	-3974.4
san luis 1	SL-1	xochimilco	497489	2129008	-3196.8
san luis 7	SL-7	xochimilco	496526	2129038	-9158.4
san luis 8	SL-8	xochimilco	497168	2128793	-2764.8
san luis 9	SL-9	xochimilco	496263	2128916	-3628.8
san luis 11	SL-11	xochimilco	495270	2128608	-6220.8
san luis 12	SL-12	xochimilco	495008	2128731	-6220.8
san luis 13	SL-13	xochimilco	494891	2128424	-5184
san luis 14	SL-14	xochimilco	493694	2128701	-3196.8
san luis 16	SL-16	xochimilco	492380	2127872	-7257.6
san luis 17	SL-17	xochimilco	492731	2128394	-1296
san luis 18	SL-18	xochimilco	492584	2128025	-8121.6
san luis 19	SL-19	xochimilco	491825	2127749	-2505.6
san luis 20	SL-20	xochimilco	489986	2127873	-5788.8
san lucas xochimanca	216	xochimilco	487971	2126983	-3024
san luis tlaxialtemalco	215	xochimilco	496146	2128639	-3715.2

santa cruz acalpixca 1	228	xochimilco	492643	2127349	-2851.2
santa cruz acalpixca 2	249	xochimilco	492730	2127503	-5616
santa cruz xochitepec	224-A	xochimilco			-7257.6
santiago tepalcatlapan	222	xochimilco	487125	2127475	-3369.6
tepepan 2	219-A	xochimilco	487265	2129904	-2160
tepepan 3	220-A	xochimilco	486572	2128011	-2160
cerrillos 1	206	xochimilco	498014	2127963	-1641.6
cerrillos 2	206-A	xochimilco	498010	2127693	-4492.8
cerrillos 3	276	xochimilco	498627	2127717	-2678.4
S11	S-11	xochimilco	496496	2127932	-2851.2
S12	S-12	xochimilco	497722	2128362	-4924.8
S13	S-13	xochimilco	498306	2128116	-3024
tulyehualco 8	TUL-8	xochimilco	498540	2128639	-1641.6
p. olimpica 1	118	xochimilco	488909	2132453	-3369.6
R11	R-11	xochimilco	499153	2127256	-4406.4
tlahuac-neza 1	TN-1 BIS	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	490239	2135017	-5875.2
tlahuac-neza 2	TN-2 BIS	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	490599	2134547	-6998.4
tlahuac-neza 3	TN-3	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	490701	2134369	-5356.8
tlahuac-neza 4	TN-4	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	490864	2134161	-2678.4
tlahuac-neza 5	TN-5	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	491101	2133909	-5443.2
tlahuac-neza 6	TN-6 BIS	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	491482	2133635	-5097.6
tlahuac-neza 7	TN-7 BIS	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	491675	2133328	-2592
tlahuac-neza 8	TN-8 BIS	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	491868	2133078	-4838.4
tlahuac-neza 10	TN-10 BIS	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	492471	2132453	-4147.2
tlahuac-neza 11	TN-11	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	492812	2132134	-5702.4
tlahuac-neza 12	TN-12	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	493016	2132009	-3283.2
tlahuac-neza 13	TN-13 BIS	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	493255	2131862	-5702.4
tlahuac-neza 14	TN-14	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	493505	2131771	-4406.4
tlahuac-neza 15	TN-15	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	493743	2131714	-5270.4
tlahuac-neza 16	TN-16 BIS	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	493993	2131577	-1900.8
tlahuac-neza 17	TN-17 BIS	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	494221	2131532	-5011.2
vivero d.f. 1	DF-1	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	491425	2132373	-2937.6
vivero d.f. 2	DF-2	ramal tlahuac-netzahualcoyotl	491755	2132157	-2764.8
ampliación tlahuac 20A	ATN-20 A	ampliación tlahuac-netzahualcoyotl	492277	2132532	-2160
ampliación tlahuac 20	ATN-20 BIS	ampliación tlahuac-netzahualcoyotl	492005	2132850	-2592
ampliación tlahuac 21	ATN-21	ampliación tlahuac-netzahualcoyotl	491732	2133169	-3456
ampliación tlahuac 22	ATN-22	ampliación tlahuac-netzahualcoyotl	491505	2133373	-5529.6
ampliación tlahuac 23	ATN-23 BIS	ampliación tlahuac-netzahualcoyotl	491303	2133691	-5011.2
ampliación tlahuac 24	ATN-24	ampliación tlahuac-netzahualcoyotl	491008	2134032	-4838.4
ampliación tlahuac 26	ATN-26	ampliación tlahuac-netzahualcoyotl	490474	2134706	-4838.4
ampliación tlahuac 27	ATN-27	ampliación tlahuac-netzahualcoyotl	490343	2134894	-5702.4

Tabla A₂-1. Valores de extracción de los pozos localizados en el área de estudio, y Delegación o sección, a la que pertenecen (DGCOH, 2005; CNA, 2008).