



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO TEXCOCO (1507), ESTADO DE MÉXICO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación Administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	7
3.1 Provincia fisiográfica.....	7
3.2 Clima.....	8
3.3 Hidrografía.....	9
3.4 Geomorfología.....	10
4. GEOLOGÍA.....	13
4.1 Estratigrafía.....	15
4.2 Geología estructural	24
4.3 Geología del subsuelo	26
5. HIDROGEOLOGÍA.....	27
5.1 Tipo de acuífero	27
5.2 Parámetros hidráulicos.....	27
5.3 Piezometría	28
5.4 Comportamiento hidráulico.....	28
5.4.1 Profundidad al nivel estático	28
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	29
5.4.3 Evolución del nivel estático	30
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	31
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	33
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	33
7.1 Entradas	34
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	34
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	35
7.1.3 Recarga Inducida.....	36
7.2 Salidas.....	37
7.2.1 Bombeo (B).....	37
7.2.2 Descarga a través de manantiales.....	37
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	37
8. DISPONIBILIDAD	38
8.1 Recarga total media anual (R).....	39
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	39
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	39
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	40
9. BIBLIOGRAFÍA	41

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA. La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar. La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Texcoco, definido con la clave 1507 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-oriental del Estado de México; geográficamente se localiza entre los paralelos 19° 18' y 19° 38' de latitud norte y los meridianos 98° 39' y 99° 03' de longitud oeste, abarcando una superficie de 934 km² (figura 1). Limita al norte con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, perteneciente al Estado de México; al este con el acuífero Soltepec, perteneciente al estado de Tlaxcala; al sur y sureste con el acuífero Chalco-Amecameca, perteneciente al Estado de México y al oeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, perteneciente al Distrito Federal.

Geopolíticamente, la superficie del acuífero comprende totalmente los municipios Chicoloapan, Chimalhuacán, Chiconcuac, Papalotla y Texcoco; casi la totalidad de Atenco, Chiautla, Ixtapaluca, Nezahualcóyotl, La Paz y Tepetlaoxtoc; así como pequeñas porciones de los municipios Acolman, Ecatepec de Morelos y Tezoyuca.

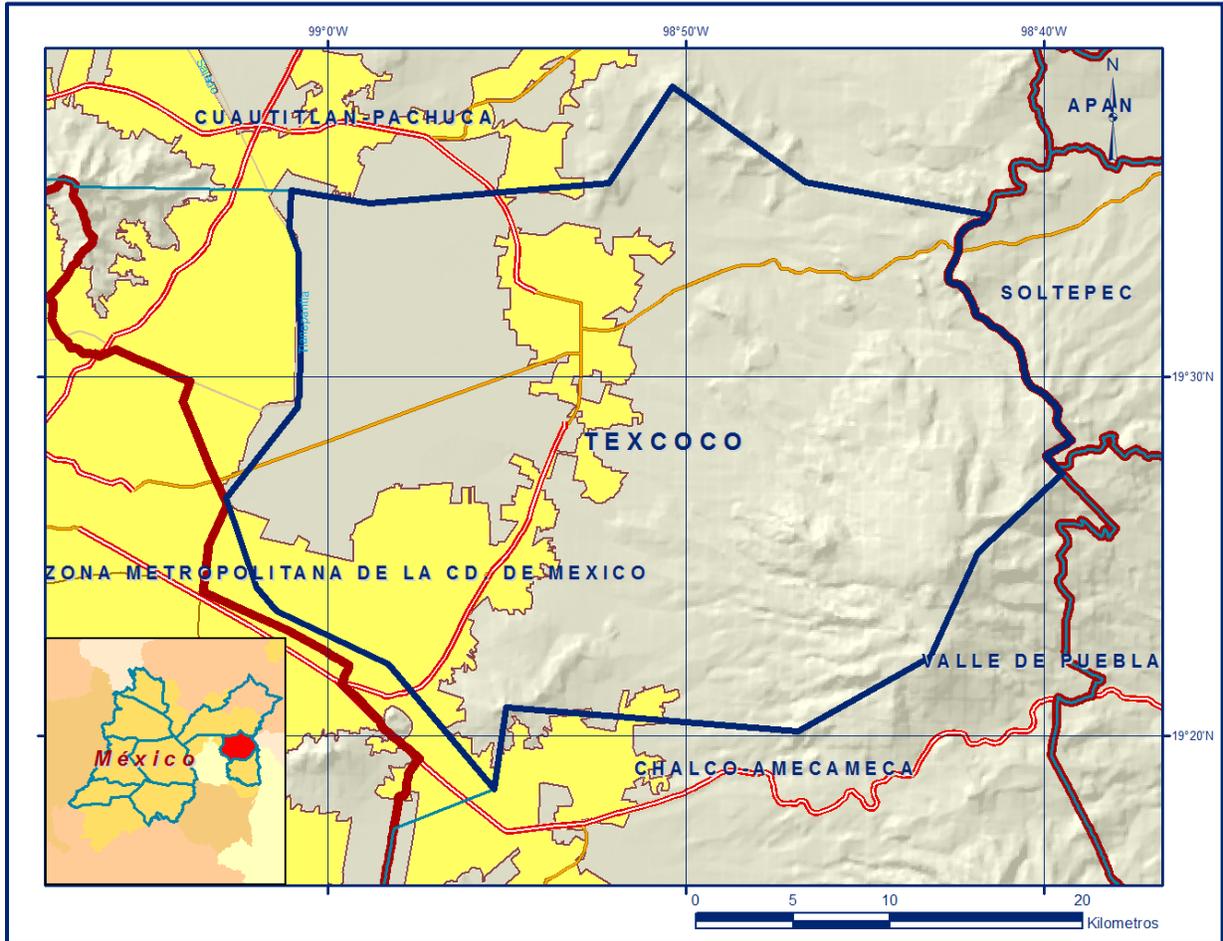


Figura 1. Localización del acuífero

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

ACUIFERO 1507 TEXCOCO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	39	39.3	19	27	27.6	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	98	39	30.5	19	27	18.0	
3	98	41	51.6	19	25	6.9	
4	98	43	11.0	19	22	11.6	
5	98	46	52.6	19	20	6.7	
6	98	55	1.0	19	20	46.4	
7	98	55	21.5	19	18	29.8	
8	98	58	17.4	19	21	59.0	
9	99	1	25.4	19	23	28.2	
10	99	1	59.0	19	24	8.4	
11	99	2	50.0	19	26	37.3	
12	99	0	50.2	19	29	9.4	DEL 12 AL 13 POR EL LIMITE MUNICIPAL
13	99	0	48.6	19	33	27.9	
14	99	1	4.5	19	34	8.8	
15	99	1	0.7	19	35	11.6	
16	98	58	48.8	19	34	50.6	
17	98	52	9.8	19	35	24.2	
18	98	50	23.5	19	38	4.7	
19	98	46	41.1	19	35	25.6	
20	98	41	35.1	19	34	30.4	DEL 20 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	98	39	39.3	19	27	27.6	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Texcoco pertenece al Organismo de Cuenca XIII “Aguas del Valle de México” y es jurisdicción territorial del Estado de México. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos. La mayor parte de su superficie está regida por el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida por Cuenca o Valle de México”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de agosto de 1954; esta veda es de tipo I, en la que la capacidad de los mantos acuíferos solo permite extracciones limitadas para usos domésticos.

En una pequeña superficie del extremo suroriental, rige el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos del Estado de México, que no quedaron incluidos en las vedas impuestas mediante Decretos Presidenciales de 7 de diciembre de 1949, 21 de julio de 1954, 10 de agosto de 1965, 14 de abril de 1975 y Acuerdo Presidencial del 1 de julio de 1970”*, publicado en el DOF el 10 de julio de 1978, esta veda es de tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua es el público-urbano. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna ni se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca Valle de México, instalado el 16 de agosto de 1995. Una pequeña porción de su extremo suroriental, pertenece al Consejo de Cuenca Río Balsas, instalado el 26 de marzo de 1999.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación y prospección, entre los más recientes e importantes, se mencionan los siguientes:

DISEÑO DE REDES DE MONITOREO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE PACHUCA-TIZAYUCA, TEXCOCO, CHALCO-AMECAMECA Y LA CIUDAD DE MÉXICO, EN EL VALLE DE MÉXICO. Elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C.V. en 1996 para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo fue establecer una red de pozos piloto para obtener información piezométrica que sirva para la configuración de los niveles del agua subterránea y definir su comportamiento y evolución en el tiempo.

ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE OBSERVACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE TEXCOCO Y ATLACOMULCO-IXTLAHUACA. Realizado por Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V. en 1997 para la Comisión Nacional del Agua. Entre sus objetivos más importantes destaca el diseño óptimo de una red de monitoreo que considere el número mínimo de pozos de observación para medir las variaciones del nivel del agua subterránea y de su calidad, definir la geometría del acuífero y el modelo conceptual del flujo subterráneo, determinar la magnitud de las variables del balance de aguas subterráneas y construir un modelo numérico de flujo subterráneo.

ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS DE LOS ACUÍFEROS ACTIVOS EN 1996 EN EL VALLE DE MÉXICO. Elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C.V. en 1997 para la Comisión Nacional del Agua. Tuvo como objetivo principal la medición de niveles del agua subterránea en los 116 pozos que definen la red de monitoreo piezométrico, así como la actualización de las configuraciones del nivel estático.

DIÁGNÓSTICO DE LA REGIÓN XIII VALLE DE MÉXICO. Realizado por Consultores S.A de C.V. en 1997 para la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México. Entre sus objetivos más importantes destacan el conocimiento de la condición actual del recurso hídrico, determinar la demanda actual y futura de los distintos usos a corto plazo (año 2000), mediano (año 2010) y largo plazo (año 2020) y la interrelación con otros acuíferos, así como la estimación de las necesidades actuales y futuras de infraestructura, definiendo el tipo de obras requeridas, costos y fuentes de financiamiento.

ESTUDIO DE MODELACIÓN PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DEL ACUIFERO TEXCOCO. Realizado por Proyectos, Estudios y Servicios, S.A. de C.V. en el 2006 para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo fue construir un modelo de flujo hidrodinámico para conocer las condiciones y efectos de las diferentes variables hidrogeológicas sobre el comportamiento del acuífero, actualizar el censo de aprovechamientos, así como realizar la hidrometría de las extracciones y determinar su uso. Con el balance de aguas subterráneas y el modelo de simulación se definieron acciones concretas de reducción de la demanda y manejo del acuífero. Formula y analiza una propuesta de Plan de Manejo del Acuífero.

MODERNIZACIÓN DE LAS REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO, TEXCOCO, CHALCO-AMECAMECA Y CUAUTITLÁN-PACHUCA. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en el 2007 para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Este estudio tuvo como objetivo general optimizar el número de pozos que integran las redes de monitoreo piezométrico y proponer una red secundaria de control de la calidad del agua. Realiza un estudio más detallado de la calidad del agua subterránea.

PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO. Realizado por Grupo Dan Servicios de Ingeniería y Construcciones, S.A. de C.V. en el 2009 para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

En este estudio se llevó a cabo la piezometría de los niveles del agua subterránea del acuífero.

Su objetivo fue analizar, procesar e integrar la información piezométrica para determinar el comportamiento del acuífero y definir las medidas preventivas y correctivas que permitieran planear adecuadamente el manejo y control de esta fuente de abastecimiento.

ESTUDIO TÉCNICO PARA ELABORAR EL REGLAMENTO DEL USO DEL AGUA DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO. Realizado por la **Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Gestora de Servicios Tecnológicos, en el 2010 para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.** Su objetivo fue integrar un informe técnico que permita conocer la problemática relativa al uso del agua subterránea y elaborar un Proyecto de Reglamento del uso del agua subterránea, con la participación de la sociedad, para la explotación sustentable de todos los sectores involucrados.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2011. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático. Estos dos últimos estudios, junto con la piezometría obtenida por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

Fisiográficamente la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Raisz E., 1964).

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1997), el área que cubre el acuífero se encuentra localizada al este de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, en la porción central de la Subprovincia Fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac.

El Eje Neovolcánico se caracteriza por una serie de cadenas montañosas de origen volcánico y por su complejidad en la composición de las rocas que varía de basáltica a riolítica, producto de eventos lávicos y piroclásticos; las geoformas volcánicas presentan edades que varían desde mediados del Cenozoico al Reciente.

Esta provincia limita al norte con la Llanura Costera del Pacífico, la Sierra Madre Occidental, la Mesa Central, la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte; al sur colinda con la Sierra Madre del Sur y la Llanura Costera del Golfo Sur; al oeste su límite natural es el Océano Pacífico y al este el Golfo de México.

Comprende parte de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, Estado de México, Tlaxcala, Distrito Federal, Hidalgo, Puebla, y Veracruz.

La integran grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas. Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico" integrado por: Volcán de Colima, Tancítaro, Zináltécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuétl (La Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19°; que representan el trazo de la gran Falla Clarión. La Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se caracteriza por estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, construidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas en antiguas cuencas lacustres, donde aparecen elevaciones aisladas.

Antiguamente el Valle de México drenaba hacia el sur, las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por la emisión de productos volcánicos a través de conos que dieron origen a la Sierra de Chichinautzin, erupción que ocurrió hace aproximadamente 600,000 años. Esto causó el cierre definitivo del drenaje hacia el sur y de la cuenca, que se convirtió en endorreica, lo que favoreció la acumulación de agua en la región central del valle, condiciones que dieron origen a la formación de los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac.

Las montañas que circundan la Cuenca de México son de origen volcánico, entre las que destacan la Sierra Nevada que se localiza al este, a Sierra de Las Cruces al oeste y la Sierra Chichinautzin hacia el sur.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, se observa que en la superficie cubierta por el acuífero predomina el clima BSl kw(w) (i') seco templado o árido templado con verano cálido, con régimen de lluvias en verano y porcentaje de

lluvia invernal menor de 5% anual, con poca oscilación anual entre las temperaturas medias mensuales, entre 5 y 7 °C. En las estribaciones de las sierras de mayor altitud se presenta el clima semifrío subhúmedo, con lluvias en verano, temperatura media anual entre 5 y 12 °C, porcentaje de lluvias invernales menor de 5%. En la parte más alta del Monte Tláloc el clima es frío, con temperatura media anual entre -2 y 5 °C e invierno muy marcado.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 21 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero, 15 de ellas localizadas dentro de la superficie del acuífero: Atenco, La Grande, Tepetlaoxtoc, Atenco, San Andrés Río Frio, Texcoco, San Juan Totolapan, San Miguel Tlaixpan, Chapingo, Chapingo (SMN), Lago Nabor Carrillo, Campamento Plan Lago de Texcoco, El Tejocote, Cuatepec de Los Olivos y Km 2 + 120 Bombas; y 6 más en sus inmediaciones: Tepexpan, Xochihuacán, Los Reyes, Nezahualcóyotl (Palacio Municipal) y km 27 + 250 Gran Canal, cuyo registro comprende el periodo 1971-2000; así como el plano de isotermas del INEGI para determinar la temperatura media de la región donde se localizan los volcanes.

De esta manera se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **750 mm y 25° C**, respectivamente. Para las zonas altas de las sierras la temperatura media anual es 10 °C.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica No. 26, Pánuco, Subregión Hidrológica Valle de México, cuenca del Río Moctezuma. El sistema hidrográfico del acuífero está integrado principalmente de escurrimientos efímeros e intermitentes de carácter torrencial, con avenidas de corta duración y arroyos secos durante el estiaje.

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

El rasgo hidrológico más importante es el sistema de lagos que conforman el Proyecto Lago de Texcoco, el cual recibe aguas residuales provenientes de Chimalhuacán,

Ciudad Nezahualcóyotl y Ecatepec; las entradas procedentes de las sierras del oriente, además de los ríos La Compañía y Churubusco, cuyos escurrimientos son medidos en varias estaciones hidrométricas, entre las cuales destacan La Draga, Tepexpan, La Grande, Los Reyes y Puente La Llave.

El primer río que confluye (de norte a sur) al lago de Texcoco, es el Río San Juan Teotihuacán, el cual atraviesa el municipio de Acolman, cuyos escurrimientos se miden en la estación hidrométrica Tepexpan. Otro río es el Papalotla, cuyos escurrimientos son medidos en la estación La Grande, en el municipio de Texcoco.

Más adelante, confluye el Río Xalapango, cuyo caudal es medido en la estación Atenco. Uno de los principales aportadores de agua al sistema de lagos es el Río La Compañía, cuyo caudal es medido en la estación Los Reyes. Entre las principales corrientes aportadoras, destacan también el Río Churubusco, proveniente de la Ciudad de México cuyo caudal de aportación se registra en la estación Puente La Llave.

Otros ríos de la zona son Papalotla, Coxcacoco, San Lorenzo, San Bernardino, Chapingo, San Mateo, Santa Mónica y Coatepec. En la actualidad, uno de los principales desfuegos del Lago de Texcoco es el canal La Draga, cuyo caudal se mide en la estación hidrométrica del mismo nombre.

3.4 Geomorfología

La actividad ígnea del Eje Neovolcánico ha dado lugar a un gran número de cuencas endorreicas y el consecuente desarrollo de lagos, que le da al paisaje geomorfológico una apariencia muy característica. Los procesos geomorfológicos que ha sufrido la Cuenca del Valle de México, han modificado su relieve estructural original, incluyendo la zona donde se localiza el Acuífero Texcoco,

De manera general se puede observar que la morfología es variada, se presentan diversos tipos de estructuras volcánicas bien conservadas, como son: conos cineríticos, volcanes compuestos y volcanes escudo, además de extensos derrames basálticos, sobre los que se han originado algunos lagos, debido al cierre de la cuenca.

La presencia de las sierras es uno de los aspectos físicos que caracterizan y limitan a la cuenca de México; sin embargo, en su interior el relieve es básicamente suave, dominando las llanuras lacustres con altitudes promedio de 2,240 msnm, que sólo se ven interrumpidas por algunas elevaciones de relativa altura entre las que destacan

las sierras de Guadalupe y Santa Catarina localizadas al norte y suroriente del Distrito Federal, respectivamente.

En general, es posible identificar en la superficie del acuífero dos elementos geomorfológicos principales: las zonas altas que bordean al valle, que están constituidas por sierras, cerros, laderas y lomeríos, en la porción oriental, y las zonas planas que corresponden a una altiplanicie que consta de depresiones lacustres en proceso de desecación y pequeñas elevaciones topográficas aisladas. Desde el punto de vista de las unidades morfológicas, se distinguen:

Planicies aluviales. De origen exógeno acumulativo del Cuaternario, distribuidas ampliamente y compuestas por depósitos aluviales y por otros depósitos de ladera, originados por procesos gravitacionales y fluviales.

Algunas de ellas se caracterizan por estar formadas por depósitos de lahar retrabajados y por secuencias piroclásticas de caída y de flujo, así como de tobas eólicas y brechas de pómez. Otras presentan en su superficie costras de caliche, evidencia de la presencia actual del nivel freático somero y de su relación con la antigua influencia lacustre.

Además de estar compuestas principalmente de materiales aluviales, las planicies aluviales contienen otros tipos de depósitos, como los de ladera, originados por procesos gravitacionales y fluviales, intercalaciones de materiales coluviales, detritos rocosos acumulados al pie de las laderas empinadas, etc.

Estas planicies se localizaron principalmente al pie de la Sierra Nevada.

Piedemontes. Se distinguen principalmente por su origen exógeno acumulativo (en algunos casos denudatorio y tectonizado) del Cuaternario y por estar compuestos de lavas, tobas, cenizas y depósitos epiclásticos y piroclásticos de flujo; algunos de ellos presentan forma de abanico con una composición basáltica y basáltica-andesítica. Se localizan al norte, centro noroeste, centro sur y sur del Valle.

También se caracterizan por presentar tectonismo activo que se manifiesta por la presencia de fallas con orientación oeste-este, con trayectoria curvilínea. Presentan pendientes que varían en promedio de 0° a 6°, con altitudes medias de 2,500 a 2,740 msnm y alturas relativas de 360 m.

Laderas de montaña. Presentan un origen endógeno volcánico (muy tectonizado) del Cenozoico Superior-Cuaternario (Plioceno, Plioceno-Cuaternario y Plioceno-Pleistoceno), formadas principalmente de domos, conos volcánicos y derrames de lava. Están conformadas por rocas básicas e intermedias del tipo fenobasálticas, de lavas andesíticas, dacíticas, riódacíticas y tobas con material piroclástico de flujo y de caída (de Cserna et al., 1988; Mooser et al., 1996).

Presentan crestas agudas y cimas redondeadas. Registran una pendiente dominante de 4° a 16°, una altitud media de 2,740 a 2,940 msnm y una altura relativa dominante de 460 m. Las más representativas se localizan al norte, noreste y este.

Planicies lacustres. Su origen es exógeno acumulativo del Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno) y están compuestas por sedimentos lacustres que provienen de los depósitos piroclásticos de las explosiones recientes de los volcanes cuaternarios que se localizan tanto dentro de la Cuenca de México como de las cuencas vecinas, y del acarreo que produce el agua de los cauces provenientes de montañas, así como sedimentos clásticos y productos piroclásticos de caída, relacionados con la actividad volcánica del estratovolcán Popocatepetl y de la Sierra de Chichinautzin, los cuales se depositaron en un ambiente lacustre.

Esta unidad presenta pendientes dominantes que varían entre 0° y 2°, una altura relativa media de 40 m y una altitud media de 2,260 a 2,300 msnm.

Lomeríos. Son de origen endógeno volcánico y endógeno volcánico modelado (tectonizado y denudatorio) del Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno). Se localizan al norte, noroeste, noreste, este, centro y sur del área acuífero.

Todos ellos presentan las características litológicas dominantes de tobas, cenizas y depósitos piroclásticos de flujo y de caída, compuestos de rocas básicas e intermedias del tipo basálticas y basáltico-andesíticas.

También se caracterizan por mostrar estructuras disyuntivas que se han generado por los movimientos tectónicos actuales (fallas con una orientación principal este-oeste). Registran una clase geométrica con pendientes que varían de 0° a 10°, una altitud media de 2,420 a 2,580 msnm y una altura relativa promedio de 160 m.

4. GEOLOGÍA

La geología del acuífero está íntimamente ligada al desarrollo y evolución de la Cuenca del Valle de México, de la cual forma parte; las rocas que la constituyen deben su origen a procesos volcánicos y tectónicos desarrollados desde el Eoceno (figura 2).

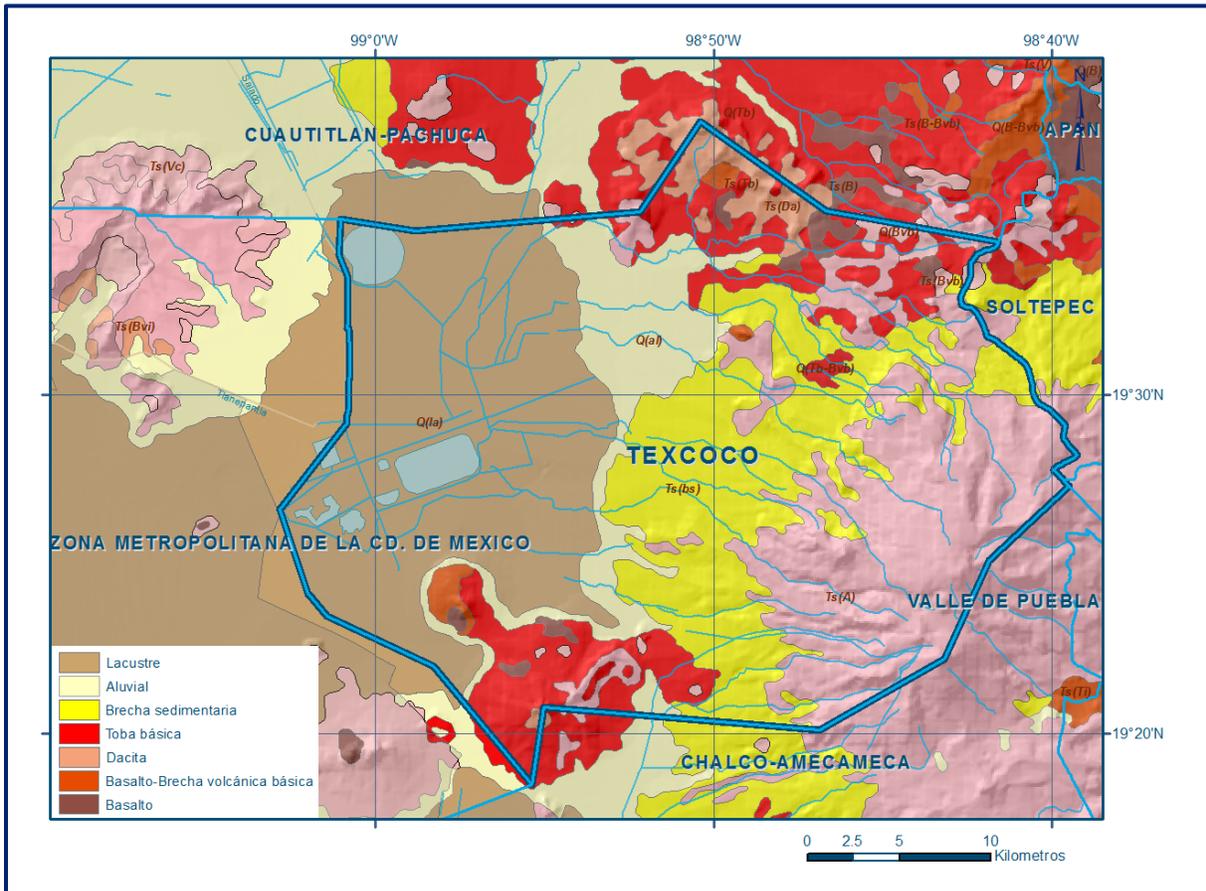


Figura 2. Geología general del acuífero

Durante este período se inició un conjunto de procesos eminentemente volcánicos, evidenciados por la presencia de importantes espesores de lava, toba y brecha.

Mientras que durante el Mioceno temprano predominaron las erupciones de andesita y dacita, con un espesor promedio de 600 a 700 m, esta actividad magmática y tectónica generó rocas volcánicas y un extenso fracturamiento con una orientación W-E.

En las porciones de la base de la Sierra de Guadalupe y en cerros como Coatepec y Gordo, existen afloramientos de toba, brecha y complejos volcánicos del Mioceno, profundamente erosionados, cuya composición varía de andesita a dacita.

Durante este tiempo (final del Mioceno) el inicio la formación de las denominadas sierras mayores: Sierra de Río Frío y Sierra Nevada. Procesos estructurales desarrollados durante el Plioceno Tardío y Cuaternario, dieron origen a la formación de amplias fosas tectónicas con un rumbo preferentemente NNE definidas como; Tláloc-Apan y Cuauhtepic, identificadas en la Sierra de Guadalupe.

Estas depresiones están limitadas por fracturamientos y fallas que provienen del poniente y describen un gran arco cóncavo hacia el sur, que afecta a la Sierra Nevada y formó la fosa en el flanco poniente del Cerro Tláloc. Las grandes depresiones formadas fueron rellenas por material clástico, al oriente, hacia el antiguo Lago de Texcoco, donde existen depósitos aluviales de granulometría gruesa cerca de las sierras, que disminuye a medida que se acerca hacia la zona limítrofe del vaso lacustre, los cuales están constituidos por depósitos clásticos plio-cuaternarios subyacidos por material aluvial y lahares retrabajados. Estas depresiones (fosas) fueron cubiertas tanto por materiales producto de la erosión como por rocas provenientes de la actividad volcánica contemporánea; así en la parte inferior de las sierras mayores se encuentran extensos abanicos volcánicos, mientras que sierras de menor elevación, como la Sierra de Guadalupe, se caracterizan por presentar abanicos aluviales menores.

El origen de los depósitos lacustres está relacionado con la obstrucción definitiva del drenaje de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra de Chichinautzin.

El vulcanismo durante el Pleistoceno y Holoceno es de tipo monogenético y formó conos cineríticos, domos volcánicos y derrames de lava, asociados con materiales piroclásticos.

La Sierra Chichinautzin es el área en la que se tiene la mayor extensión de rocas volcánicas cuaternarias al sur de la Cuenca de México. Otra de las áreas de mayor extensión de rocas volcánicas cuaternarias se localiza al oriente y nororiente de Tizayuca-Atzompa-Texcoco, misma que se extiende hasta Ciudad Sahagún-Singuilucan, al norte y nororiente de Apan, Hidalgo.

Para el Cuaternario continúa el vulcanismo principalmente de composición andesítico-basáltico, reconocido en los cerros Chimalhuacán, Gordo y El Pino y las erupciones basálticas y andesíticas entre Tizayuca y Apan. Las sierras mayores con grandes volcanes, como los de la Sierra Nevada, alcanzaron su máximo desarrollo,

formándose extensos abanicos volcánicos.

4.1 Estratigrafía

La geología superficial y del subsuelo de la cuenca del Valle de México, y por lo tanto del acuífero Texcoco, está constituida por rocas sedimentarias, volcánicas y en menor proporción intrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico hasta el Reciente .

A continuación, se describe brevemente cada una de las unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente:

CRETÁCICO

Formación Xochicalco

Es la unidad más antigua identificada y está constituida por una secuencia de calizas, principalmente calcilutíticas y calcilimolíticas, dispuestas en capas que presentan laminación fina, contenido carbonoso variable y abundantes vetillas de calcita, preferentemente hacia la cima. Aflora en el límite sudoccidental del área y se depositó en el Aptiano en un ambiente marino.

Formación Morelos

Con este nombre Fries (1960) define una secuencia de calizas y dolomías de edad Albiano-Cenomaniano, que aflora principalmente en los estados de Morelos, Guerrero y México, de color gris cremoso a negro, de textura que cambia de calcilutita a calcarenita, con presencia de nódulos de pedernal muy esporádicos y horizontes de caliza dolomítica.

Está constituida por una caliza que varía en color de gris claro a negro, con una textura de calcilutita a calcarenita, de espesor mediano a grueso. Aflora al sur de la Sierra Chichinautzin con un espesor máximo de 900 m, que se adelgazan al oriente y poniente. Su presencia en la Cuenca del Valle de México se detectó en los pozos exploratorios Mixhuca 1 y Tulyehualco 1 (PEMEX, 1988) a profundidades de 2,060 y 2,160 m, respectivamente.

Está constituida por una interestratificación de capas gruesas de calizas y dolomías concordantes, con anhidritas laminares subyacentes. Pantoja y Fries 1959, por la presencia de *Toucacia* y *Actoeonella*, le estiman una edad Albiano Superior-Cenomaniano Inferior.

Formación El Doctor

Definida formalmente por Wilson et al. (1955), para designar a rocas calcáreas de banco de edad Albiano Medio-Cenomaniano Temprano. Posteriormente, en 1962, Fries menciona que la facie de cuenca de esta unidad es la que aflora entre Apaxco y Tula, Hidalgo, y que probablemente hacia el sur se interdigite en el subsuelo con la Formación Morelos. Según Fries, corresponde a una secuencia de 200 metros de espesor de calizas de textura fina en capas delgadas, con nódulos y lentes de pedernal e intercalaciones locales de lutita. Su espesor varía de 450 y 900 m, en diversas secciones medidas en el estado de Morelos.

Formación Cuautla

Propuesta originalmente por Fries (1960) quien reconoció facies de cuenca, de banco y de litoral, del Cenomaniano Tardío al Turoniano Tardío. Las facies de banco predominan en la región y afloran al sur de la Sierra Tepozotlán a una altitud promedio de 1500 msnm y al norte de Zumpango a una elevación promedio de 2,400 msnm.

Está constituida por calizas de estratificación gruesa, con abundantes biostromas y rudistas. Sobreyace a la Formación Morelos y subyace a la formación Mezcala, en ambos casos en de manera transicional y concordante.

Formación Mezcala

Denominada por Fries (1960) en la cuenca del Río Balsas, en su localidad tipo del poblado Mezcala, Guerrero.

Está formada en su parte inferior por una interestratificación gradual rítmica de margas, grauvacas (turbiditas) limolitas y lutitas.

Hacia arriba en la sucesión, las capas de marga y caliza desaparecen y las areniscas predominan, incluso con capas de conglomerado fino intercaladas. Aflora al sur de la Sierra Chichinautzin y en el cerro La Palma, ubicado al noreste de la cuenca.

Debido al intenso plegamiento que muestra, no se ha podido establecer una secuencia litológica detallada ni conocer su espesor real; sin embargo, se ha reportado un espesor medio de 1,250 m. Su depósito ocurrió en aguas someras durante el Coniaciano-Campaniano.

CENOZOICO

Granito Colotepec

El tronco granítico Colotepec se presenta en el extremo suroccidental, intrusionando a la Formación Xochicalco, en el núcleo del anticlinal de Colotepec. Está relacionado genéticamente con el tronco Coxcatlán del Eoceno-Medio.

Grupo Balsas

Los primeros depósitos del Paleógeno-Neógeno que descansan encima de las rocas cretácicas consisten en un grupo de sedimentos clásticos, volcánicos y lacustres, no marinos, que se denomina Grupo Balsas.

Se le ha designado como grupo, ya que las unidades que lo conforman tienen litología muy variable, la cual podría constituirse, por sí misma, como unidad con características propias, aunque en algunos lugares presenta facies que se interdigitan y en otras están superpuestas.

El nombre fue asignado por Fries (1960) para referirse a una secuencia continental constituida principalmente por conglomerados, calizas lacustres, arcosas, areniscas y limolitas, así como brechas volcánicas, tobas y lavas que se presentan en la cuenca del Río Balsas.

Más tarde Ortega (1980.) separa del grupo a una unidad vulcanoclástica constituida por tobas, brechas volcánicas y lavas, que aflora en el área de San Juan Tetelcingo, Guerrero. Aflora al sur de la cuenca y consta de un conglomerado calizo generalmente compacto con matriz limo-arcillosa cementada por calcita y óxido de hierro, de estratificación masiva y espesor máximo de 500 m, que se interdigita y está cubierto por una secuencia de 800 a 2,000 m de espesor, constituida por capas deleznable de arcillas, limos y arenas. Descansa discordantemente encima de las formaciones cretácicas y la secuencia superior es discordante con la Riolita Tilzapotla.

Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano

Esta secuencia volcánica muestra una composición que varía de andesítica a riódacítica, se presenta muy erosionada y fracturada en los cerros Picacho y Púlpito del Diablo, con un espesor variable entre 390 y 1,750 m. Constituyen una secuencia de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados, con capas de clásticos aluviales de espesor promedio de 6 m que indican periodo en el que el vulcanismo cesó su actividad.

En el subsuelo de la Cuenca de México estas rocas volcánicas cubren localmente en forma discordante a unidades cretácicas y son discordantes con rocas volcánicas del Mioceno Medio y Tardío y del Plio-Cuaternario.

Grupo Pachuca

Es un grupo volcánico que representa la actividad volcánica desde el Oligoceno hasta el Plioceno. Las lavas varían en composición de basálticas a riolíticas, predominando las andesitas y las dacitas.

Las formaciones que constituyen la mayor parte del grupo y tienen grandes afloramientos están constituidas por sucesiones de derrames lávicos de composición andesítica y dacítica, interestratificadas con brechas volcánicas y tobas, separadas por suelos que podrían indicar diferentes secuencias volcánicas correlacionables con rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío. Las formaciones superiores de este grupo consisten de brechas volcánicas, lavas y depósitos piroclásticos cuya composición varía de dacitas a riolitas.

Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío

Con este nombre se designa a las rocas volcánicas que difieren en composición litológica y posición estratigráfica con respecto a las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano.

Sus afloramientos se distribuyen de manera aislada por toda la cuenca en áreas pequeñas, en la mayoría de los casos, cubiertas por los materiales volcánicos más recientes. Se encuentran asociadas a tres estratovolcanes, de grandes dimensiones, el mayor de ellos se localiza al noroeste, en la Sierra de Guadalupe. En la porción sur de la cuenca se encuentran principalmente en los cerros El Elefante, El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños, la base de la Sierra Guadalupe, la base de la Sierra de Las Cruces, El Cerro Patlachique y en algunos otros afloramientos en el norte de Texcoco.

En el norte se encuentran ampliamente distribuidos en pequeños afloramientos entre los que destaca la Sierra de Tepetzotlán. Estas rocas están constituidas por una secuencia de tobas, brechas volcánicas y lavas que en algunos lugares se encuentran interestratificadas con brechas volcánicas.

En el subsuelo de la porción sur de la Cuenca de México, esta unidad se distribuye ampliamente y cubre discordantemente a las rocas del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano.

En el subsuelo del lago de Texcoco, se interpretan como pertenecientes a esta unidad las secuencias que se encuentran entre 490 y 1,125 m de profundidad, de acuerdo con los fechamientos realizados con el método Potasio-Argón. Desde el punto de vista hidrogeológico, se considera a esta unidad el basamento hidrogeológico del acuífero del lago de Texcoco.

Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano

Se refiere al conjunto de rocas extrusivas que representan un segundo periodo magmático, afloran en los flancos de las Sierras Las Cruces, Zempoala y Río Frío, y en cerros aislados de la cuenca, también coronan las Sierras de Guadalupe y Tepotzotlán; sobreyacen discordantemente a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y están cubiertas de la misma forma por unidades volcánicas del Plioceno Tardío y Cuaternario. La composición de estas rocas varía de andesítica a dacítica; las secuencias piroclásticas no están consolidadas, constituyen tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas.

Formación Otomí

Son productos volcánicos emitidos durante la parte más temprana del Plioceno Tardío, que afloran al occidente de la Cuenca de México, en lo que se conoce como Sierra de Monte Alto.

Se caracteriza por estar formada en su mayor parte por depósitos piroclásticos que se presentan como flujos lobulados. Las lavas de esta unidad se encuentran aflorando en las regiones altas de la Sierra de Monte Alto, en las que son características las intercalaciones de brechas volcánicas con coladas lávicas de textura fanerítica en los derrames de mayor consistencia. Su espesor máximo es de 1,300 m en el cerro Las Palomas.

Rocas Volcánicas Máficas del Plioceno Tardío

Están constituidas por derrames lávicos interestratificados en ocasiones con capas de poco espesor de brechas volcánicas que se consideran pertenecientes a los depósitos piroclásticos del Plioceno.

Formación Las Cruces

Aflora en el límite suroccidental de la Cuenca de México, en donde tres estratovolcanes, junto con sus depósitos piroclásticos, se orientan de NNW a SSE y separan la Cuenca de México de la cuenca del Río Lerma. También aflora en el Desierto de Los Leones-La Marquesa, en la carretera Naucalpan-Jiquipilco.

Los depósitos piroclásticos pertenecientes a esta unidad consisten de pómez, cubiertos por flujos piroclásticos generalmente no soldados, de cenizas cristalinas, vítreas y de pómez con o sin fragmentos y bloques de composición heterogénea. Su espesor máximo es de 990 m.

Esta formación es el conjunto de tres estratovolcanes alineados en una dirección norte-sur, cuyas características morfológicas y variación de edades de lo más antiguo a lo más reciente, de norte a sur, podrían indicar una migración del vulcanismo en la dirección mencionada. Este vulcanismo es representativo del Plioceno Tardío en la Cuenca de México.

Formación Zempoala. Es un conjunto de productos volcánicos de dos centros eruptivos alineados en dirección norte-sur, que se encuentran en la porción suroccidental del área, son posiblemente contemporáneos con el vulcanismo que originó la Formación Las Cruces. Está conformada por una secuencia de lavas andesíticas afaníticas-porfiríticas, con escasos cristales de anfíboles.

Su espesor máximo se estima que es de 1,000 m en el cerro de Zempoala y se considera de edad Plioceno Tardío.

Riolita Navajas. Esta unidad está constituida por rocas riolíticas que sobreyacen discordantemente sobre el grupo Pachuca y rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno, con un espesor aproximado de 500 m en la porción central de la cuenca.

Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno.

Son depósitos no diferenciados relacionados genéticamente con la actividad piroclástica y fluvial del Plioceno. En el subsuelo de la porción meridional de la cuenca, dichos depósitos constan de tobas, brechas volcánicas y aglomerados, con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas, cubiertos discordantemente por aluvión del Cuaternario, acumulados en fosas tectónicas (Graben de Chalco) y rellenando amplios valles. Su espesor máximo es del orden de 750 m.

Formación Tarango

Definida formalmente por Bryan (1948) en la localidad tipo ubicada al poniente de la ciudad de México, sobre el flanco poniente de la Sierra Las Cruces. Corresponde a los sedimentos clásticos de relleno de valles antiguos, erosionados activa y profundamente por las corrientes superficiales, acumulados sobre antiguos cauces fluviales, llanuras de inundación y abanicos aluviales. Estos sedimentos clásticos están dispuestos generalmente en estratificación horizontal pero sus capas tienden a ser discontinuas lateralmente.

También, se intercalan localmente con capas de tobas de grano fino y arenas pumíticas re-transportadas o de erupciones volcánicas contemporáneas. Localmente, presenta sedimentos lacustres en forma de interestratos de arcillas, margas y tierras diatomáceas.

CUATERNARIO

Formación Llano Grande.

Es una secuencia eruptiva de composición variable de andesitas y riocitas, que aflora en la base noroccidental de la Sierra Nevada, las secciones tipo pueden observarse a lo largo de las cañadas El Agua y Cosa Mala, en las que las secuencias constan de capas delgadas de lapilli pumítico y lítico y flujos de cenizas vítreas. Esta unidad está cubierta discordantemente por la Formación Iztaccíhuatl.

Formación Tláloc

Definida por Schalaepfer (1968) para referirse únicamente a las coladas de lava que forman parte de la Sierra Río Frío, cuya composición es andesítica, latítica y dacítica, aunque se relacionan con tefra caracterizada por flujos piroclásticos lobulados, en forma de mesetas inclinadas.

Está compuesta principalmente por flujos piroclásticos en las partes bajas de los volcanes Tláloc y Telapón, y por secuencias de lavas y piroclásticos en las zonas más altas. Cerca del área de estudio, al este y noreste de San Miguel Coatlinchán, está constituida por brechas volcánicas y lavas andesíticas. Algunas secciones de referencia se pueden observar en los bancos de material localizados en el flanco poniente de la sierra, así como en las cañadas El Muerto, El Partidor y Los Pilares. Cubre discordantemente rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío y del Plioceno Temprano.

Formación El Pino

Está representada por rocas volcánicas máficas que forman los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla y los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba; su expresión geomorfológica es de conos cineríticos terminales, de volcanes de escudo y de amplias coladas lávicas, principalmente en bloques. Las secciones tipo se encuentran en las cañadas del Volcán El Pino; los espesores máximos medidos son del orden de los 700 m que se presentan en los centros eruptivos y se acuñan en la periferia.

Las coladas de lava de los volcanes pertenecientes a esta unidad se extienden en ocasiones en el subsuelo, intercalándose con depósitos aluviales. Sobreyace a los depósitos aluviales y a la secuencia piroclástica de la Formación Tláloc; se encuentra cubierta por los estratos más recientes de aluvión y por depósitos lacustres.

Aflora al sureste de la población San Miguel Coatlinchán, en donde está constituida por lavas basálticas.

Formación Iztaccíhuatl

Se refiere a las rocas de los volcanes Llano Grande Iztaccíhuatl y Nexpayantla, este último, antecesor del volcán Popocatepetl. Está constituida por una secuencia de andesitas basálticas a dacíticas, que se inicia con derrames lávicos. Los domos reconocidos en campo están constituidos por andesitas de olivino y/o anfíbol y dacitas de anfíbol.

Descansa con ligera discordancia sobre las formaciones Llano Grande y Tláloc y subyace en discordancia a las formaciones Chichinautzin y Popocatepetl. Se considera que tiene una edad correspondiente al intervalo de 0.6 a 0.08 millones de años. Los afloramientos en el volcán Iztaccíhuatl exponen un espesor máximo aproximado de 2,500 m.

Formación Popocatepetl

Cubre discordantemente la porción meridional de la Formación Iztaccíhuatl y probablemente se interdigita hacia el poniente con la Formación Chichinautzin, ya que son contemporáneas; la interdigitación se presenta con clastos fluviales hacia las llanuras aluviales de Cuautla y Amecameca. Su espesor total se desconoce, pero con base en la altitud de los afloramientos se infiere que tiene un máximo de 3,500 m.

Con base en su fechamiento isotópico y polaridad magnética normal, se le asigna una edad del Pleistoceno Tardío-Holoceno.

Formación Chichinautzin

Carl Fries en 1965 propone este nombre para identificar a las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados, de composición andesítica y basáltica que descansan en discordancia angular sobre la Formación Cuernavaca, señalando su localidad tipo al cerro de Chichinautzin, ubicado en el límite entre el estado de Morelos y Distrito Federal.

Esta unidad estratigráfica comprende a todas las corrientes lávicas y depósitos asociados de composición andesítica y basáltica, incluyendo material dendrítico depositado en agua.

Está representada por extensas y potentes corrientes de lava, que se encuentran interdigitadas con productos piroclásticos, brechas y aglomerados. Litológicamente se conforma principalmente por basaltos de olivino. Las lavas son en general extensas, vesiculares, masivas o lajeadas, presentan una composición principalmente andesítico-basáltico y andesítica, de grano fino y medio, con fenocristales de olivino y piroxenos en matriz vítrea y microcristalina.

Se le ha asignado un espesor máximo de 1,800 m y una edad de 700,000 años determinada por medio de polaridad magnética normal. Sus rocas son correlacionables con las del Volcán Parícutín y su edad corresponde al Pleistoceno-Holoceno.

Depósitos aluviales

Constituidos por materiales poco consolidados, compuestos por fragmentos de granulometría variable, desde gravas, arenas, limos y arcillas; localmente con margas, que rellenaron el valle antes de la existencia del lago y posterior a su formación se acumularon en las márgenes de las sierras que lo rodean.

El espesor del aluvión es del orden de 350 a 400 m. Sin embargo, se aprecia que, en las capas inferiores, a partir de los 180 metros, se encuentra interestratificado con tobas vítreas, que se asocian a la Formación Tláloc. Los cortes litológicos de los pozos localizados en la porción meridional de la Cuenca de México muestran gran heterogeneidad en la granulometría de estos depósitos.

Descansan en discordancia sobre los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno y localmente sobre rocas volcánicas más antiguas y sedimentarias del Cretácico; debido a que se interdigitan con formaciones volcánicas de la misma edad y por determinaciones radiométricas, su edad corresponde al Pleistoceno- Reciente.

Depósitos lacustres

Se agrupan dentro de esta unidad todos los depósitos granulares depositados en ambiente lacustre que se encuentran en el lago de Texcoco, incluidos los estratos arenosos permeables, denominados localmente “capas duras”.

Para fines prácticos, en la zona de Texcoco y en la Ciudad de México, los estratos que quedan debajo de la segunda capa dura se han dividido en: Formación Arcillosa Superior y Formación Arcillosa Inferior. En la zona de Texcoco, estos estratos tienen una edad correspondiente al Pleistoceno Temprano. Incluye también a los sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, los cuales se depositaron en ambiente lacustre.

Se extienden desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec, con espesores que varían de 30 a 300 metros, los mayores se presentan en las planicies de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco y disminuyen hacia los márgenes.

4.2 Geología estructural

Las fallas normales y activas presentes en la zona indican que de la región ha estado sometida a la acción de un régimen tectónico distensivo. La tectónica regional indica que las rocas más antiguas son producto de vulcanismo asociado al desarrollo de un arco de islas que probablemente inició a finales del Jurásico y continuó hasta el Cretácico Inferior, relacionado con la margen activa del Océano Pacífico. El periodo Albiano-Cenomaniano se caracteriza por la estabilidad tectónica en la región, lo que propició la precipitación de carbonatos y el depósito de las calizas de las formaciones Xochicalco, Morelos y El Doctor, que culmina con el cambio a la sedimentación terrígena de la Formación Mezcala. A principio del Cenozoico se interrumpe la sedimentación debido a la fase tectónica más intensa de la Orogenia Laramide caracterizada por esfuerzos compresivos de deformación continua que producen pliegues y cabalgaduras en las rocas cretácicas.

Casi de manera contemporánea al levantamiento, empieza a actuar una fase erosiva con sedimentación molásica, representada por la Formación Balsas, también contemporáneamente se desarrolla el evento magmático andesítico de la Sierra Madre del Sur, que puede relacionarse con la migración de arcos magmáticos que se distribuyen a lo largo de la costa del pacífico (Moran, Z. D. et al., 2000), evidenciado por intrusiones graníticas-granodioríticas y vulcanismo andesítico. Durante el Mioceno Medio se inicia el desarrollo del Eje Neovolcánico como una serie de eventos con características vulcanológicas y estructurales muy particulares cuyas rocas, caracterizadas por la abundancia de andesitas y dacitas, son típicas de una provincia calcoalcalina.

El Eje Neovolcánico se originó por un proceso de subducción en el que la placa que se introduce en forma oblicua respecto de la fosa, presenta variantes en sus características como espesor, densidad, edad, distancia, ángulo de subducción, composición, etc., además de que otros eventos lo afectaron, que permitieron el ascenso de magmas a través de las superficies de debilidad (Carta Geológico-Minera "Ciudad de México" E14-2. Escala 1:250,000. SGM, 2002).

Las estructuras geológicas más importantes en la subcuenca de Texcoco son los aparatos volcánicos del Cenozoico y del Cuaternario, entre los cuales existen algunas diferencias, que se pueden agrupar por edades y tipo de estructuras.

El volcán más importante del área es el estratovolcán Tláloc, que tiene una radio de aproximadamente 20 km, cuyos productos eruptivos alcanzaron el lago de Texcoco, sus laderas están conformadas por secuencias piroclásticas que representan un volumen grande de materiales granulares en la porción oriental del área. Otra estructura volcánica de importancia es la Sierra de Guadalupe, ubicada al noroccidente.

Es la más antigua del área y tiene una longitud aproximada de 10 km. También se identifican otras dos estructuras de este tipo, una de ellas sepultada, que conforman los afloramientos de las rocas extrusivas del Mioceno Medio.

En la porción norte y sur existen los volcanes escudo Chimalhuacán y Chiconautla, respectivamente, además de conos monogenéticos en la porción noreste, que forman parte del campo volcánico del norte de la Cuenca de México.

De la interpretación de imágenes de satélite se identificaron varios lineamientos importantes que se asocian con fallas. Los más evidentes son fallas con dirección E-W, que atraviesan transversalmente el acuífero.

La más importante es la que atraviesa el ex lago de Texcoco proveniente de la Sierra de Guadalupe y continúa en la región al NE de Texcoco. Por su orientación y la edad de las rocas que afecta, este sistema se originó durante el Pleistoceno, asociado a los esfuerzos distensivos típicos de esta porción del Eje Neovolcánico.

También se aprecia un sistema estructural de fallas normales profundas, que debe ser de edad Plioceno o Mioceno tardío, con direcciones N-NW-SSE y NE-SW.

La primera dirección de este arreglo es la que formó el volcán Iztaccíhuatl, que al interpretar la información del subsuelo se identificó que afecta notablemente a las rocas extrusivas del Cenozoico Medio. La dirección NE-SW se observa claramente en los lineamientos tectónicos regionales. De esta manera, el lago de Texcoco está formado en una depresión tectónica afectada por fallas de al menos dos periodos distintos, lo que explica la diferencia en el espesor de los depósitos clásticos del Cuaternario.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información de cortes litológicos de pozos y sondeos geofísicos, se puede establecer que el subsuelo de la región está conformado en su porción más somera por una capa de arcillas cuyo espesor promedio es de 50 m, subyacidos por un potente paquete de sedimentos aluviales, constituido por arcillas, gravas, areniscas, conglomerados de origen volcánico y rocas volcánicas, principalmente tobas, cuyo espesor alcanza los 1,500 m.

El acuífero está constituido, en su porción superior por un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución, que forma un acuitardo de espesor variable que actúa como confinante o semiconfinante en el centro de la cuenca. Bajo este paquete se encuentra el acuífero actualmente en explotación, formado principalmente por material granular más grueso que el del acuitardo, depósitos vulcanoclásticos y conglomerados de origen volcánico, también de espesor y propiedades hidráulicas variables, generalmente mayor de 200 m. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base se localiza hasta 2,000 m en el centro del valle, disminuyendo hacia los márgenes de la cuenca.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

La información de los cortes litológicos de pozos, sondeos geofísicos y las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **libre a semiconfinado** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por un estrato de arcillas lacustres en el centro del valle, una secuencia de materiales granulares aluviales, rocas y depósitos volcánicos (tobas, brechas, andesitas y cenizas), con intercalaciones de sedimentos arcillosos, que en conjunto presentan permeabilidad media y espesor promedio de 1,500 m, permitiendo la infiltración, circulación y almacenamiento de agua subterránea; la porción inferior está alojada en rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están representados por los sedimentos arcillosos, las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece su fracturamiento y a mayor profundidad por los conglomerados compactos de la Formación Balsas y la secuencia de lutitas, limolitas y margas que constituyen la Formación Mezcala. Debajo de esta secuencia, las rocas calizas cretácicas alojan un acuífero confinado por sedimentos lacustres y rocas arcillosas, cuya presencia y potencial ha sido demostrado en las perforaciones profundas realizadas en la cuenca del Valle de México.

5.2 Parámetros hidráulicos

En los estudios previos realizados en el acuífero y en la Cuenca del Valle de México, existe información de gran cantidad de pruebas de bombeo de larga duración, realizadas tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales y por el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton (1991), se establece que los valores de transmisividad varían **de 2.2×10^{-4} a $40.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ; en tanto que para la conductividad hidráulica se registran valores que oscilan entre **2.3×10^{-6} y $7.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$** (0.2 y 65.0 m/d). Muy pocas pruebas de bombeo contaron con pozo de observación; sin embargo, mediante el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton se obtuvieron valores de rendimiento específico S_y que varían de 0.08 a 0.2 y de coeficiente de almacenamiento de 0.01 a 0.00001.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con información para diferentes años que comprenden 1986, 1996, 2004, 2008 y 2009; sin embargo, debido a que para los últimos años se cuenta con mayor apoyo piezométrico y con el objetivo de evaluar una condición actual del acuífero, para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2006-2011.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2009 presenta valores que varían de 40 a 130 m. Los valores más someros se registran en la porción suroccidental del acuífero, en las inmediaciones el lago Nabor Carrillo, desde donde se incrementan gradualmente, por efecto de la topografía, hacia el norte y este en donde se localizan las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero. Los valores más profundos se presentan en la porción este del acuífero, hacia las estribaciones del volcán Tláloc, en la base de la Sierra Quetzaltepec, desde la comunidad San Miguel Tlaixpan hasta San Miguel Coatlinchán (figura 3).

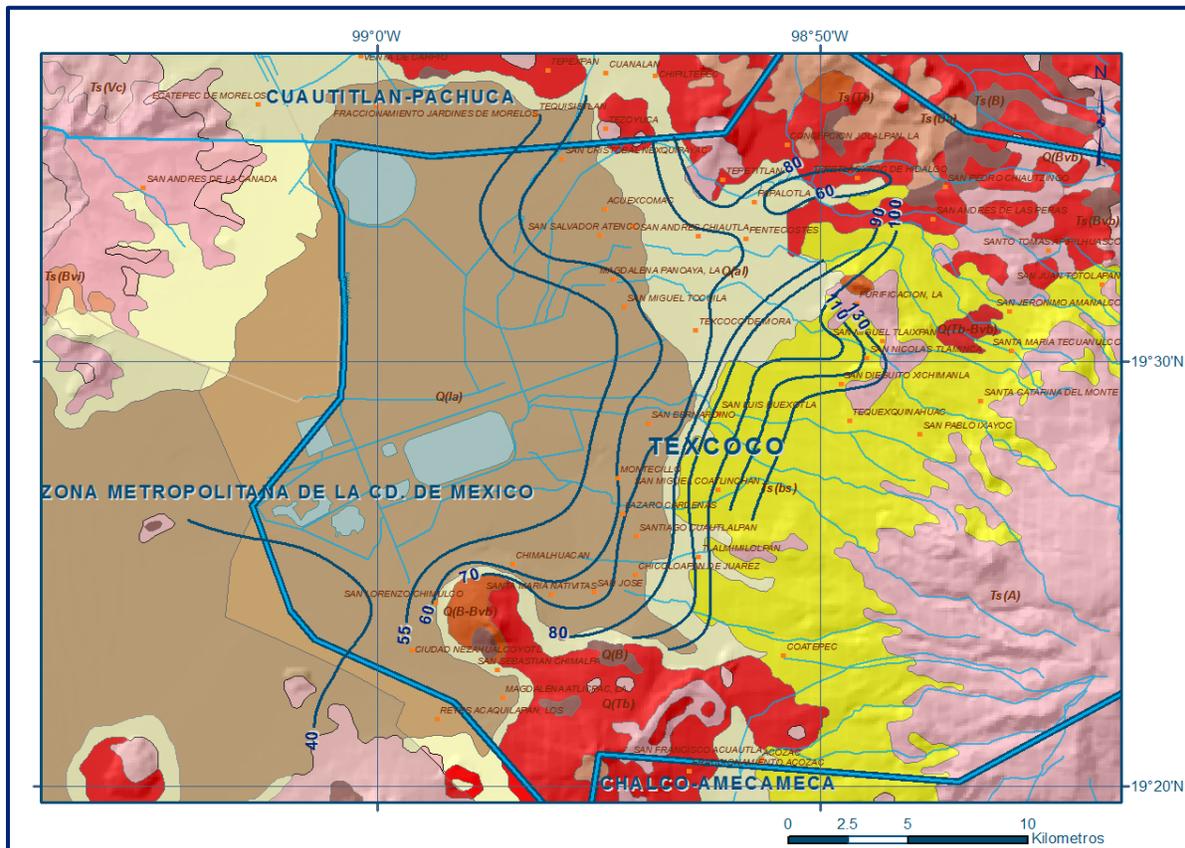


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m, (2011)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para el año 2009, registra valores que varían de 2,300 a 2,170 msnm. Las menores elevaciones, de 2,160 a 2,190 msnm, se registran en toda la porción occidental del acuífero, en la zona que circunda el Lago Nabor Carrillo, la planta de tratamiento “El Caracol” y Texcoco. Las mayores elevaciones, de 2,220 a 2,300, se registran en el extremo nororiental del acuífero, en las inmediaciones del poblado Santo Tomás y a lo largo de las estribaciones de la Sierra Quetzaltepec, desde donde descienden gradualmente, al igual que la profundidad por efecto topográfico, hacia el valle (figura 4).

La dirección del flujo subterráneo muestra una red concéntrica hacia el centro del valle. Al sur del acuífero, en las inmediaciones del Volcán Chimalhuacán, la elevación del nivel estático varía de 2,180 a 2,190 msnm, en torno del Cerro El Pino, hacia el acuífero vecino Chalco-Amecameca. Las principales zonas de recarga se ubican en las sierras Guadalupe y Quetzaltepec, ubicadas en los extremos norte y oriental, respectivamente.

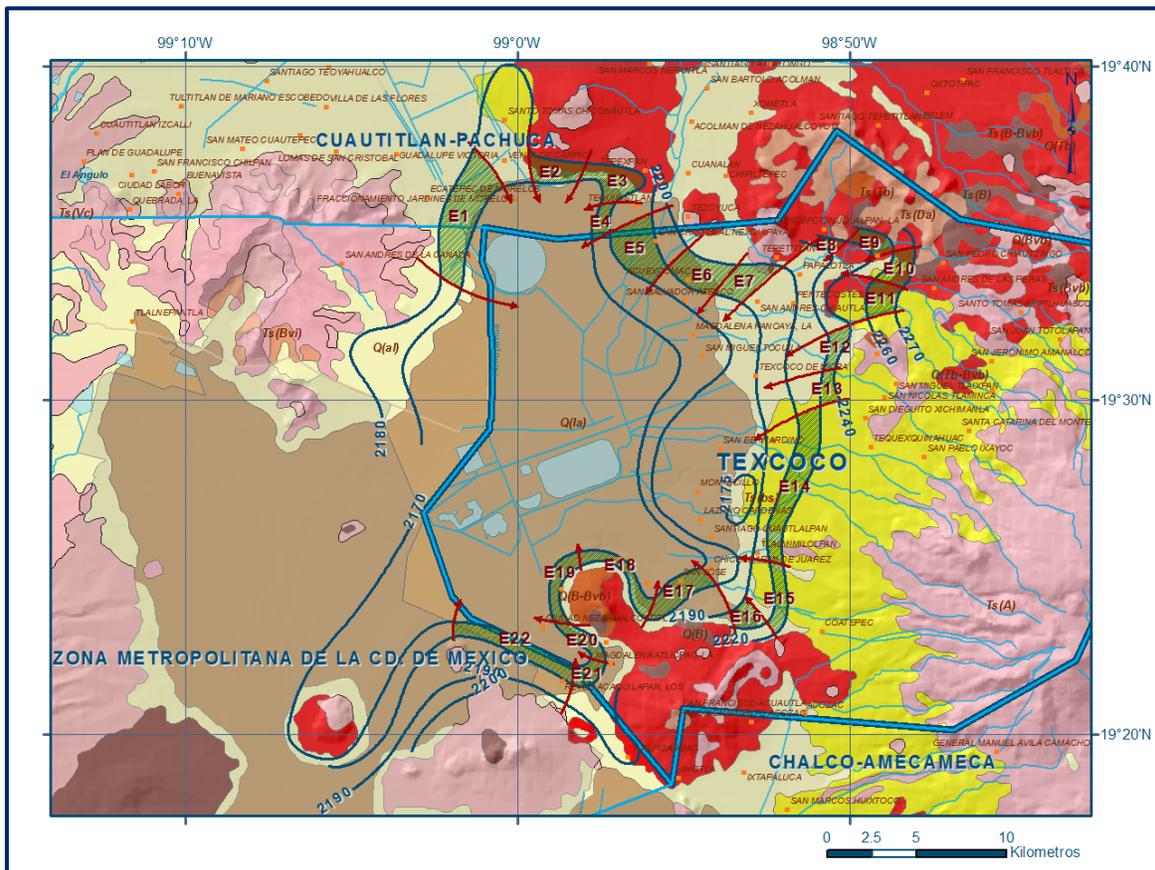


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2011)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2006-2011, se observa que se registran valores de abatimiento que varían de 6 a 19 m, que representan un ritmo anual de 1.2 a 3.8 m. La zona que muestra los mayores abatimientos se ubica hacia el sur del acuífero, en las inmediaciones de la comunidad Santiago Cuautlalpan, donde se aprecian abatimientos que superan los 10 m, mientras que, hacia la zona de San Vicente Chicoloapan, se registran valores puntuales que superan los 15 m. Al norte del acuífero, entre Tepetlaoxtoc y San Jerónimo Amanalco, se presentan los menores abatimientos. La porción central del acuífero donde se localiza Texcoco, se caracteriza por la presencia de abatimientos que varían de 4 a 8 m (0.8 a 1.6 m anuales), desde los poblados de San Luis Huexotla y San Diego, ubicados al sur, hasta San Salvador Atenco y Chiconcuac (figura 5).

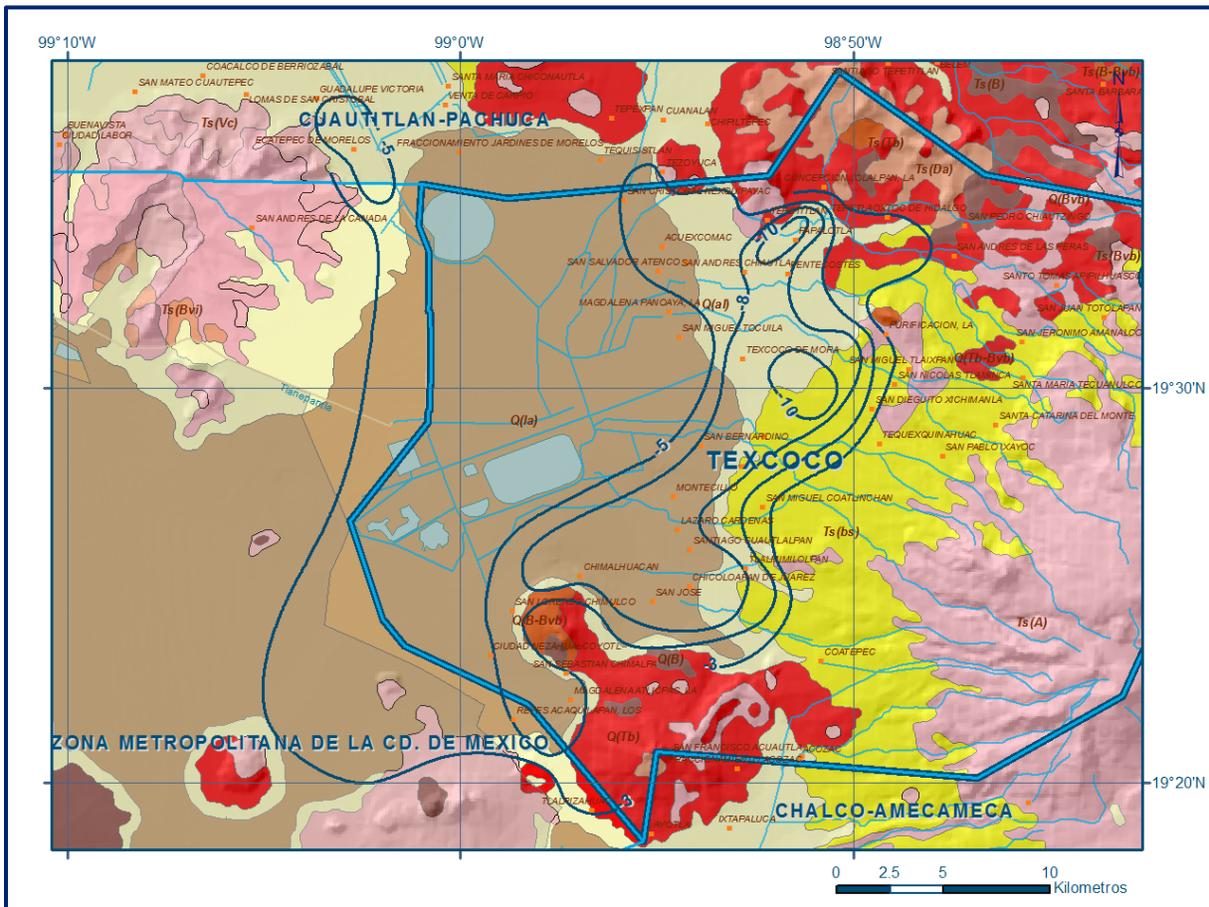


Figura 5. Evolución del nivel estático m, (2006-2011)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De la información que corresponde a los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua recolectadas en 1995 y 2007, principalmente en los pozos de las zonas Peñón- Texcoco y Lago Nabor Carrillo, se establece que se rebasan los Límites Máximos Permisibles (LMP) que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. en las concentraciones de cloruros, sólidos totales disueltos (STD), hierro y manganeso.

Con respecto a las familias del agua por iones dominantes, están presentes diferentes familias del agua, predominando entre ellas la clorurada-sódica, bicarbonatada-sódica clorurada-mixta y bicarbonatada-magnésica. Como parte de los trabajos del estudio realizado en el 2009, se tomaron 59 muestras de agua subterránea de los diferentes ramales de pozos (Tizayuca-Pachuca, Teoloyucan, Los Reyes F.C., Los Reyes-Ecatepec, Santa Catarina-Mixquic, Tláhuac, Lago Nabor Carrillo, Santa Catarina y Peñón- Texcoco), para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, nitritos, carbonatos, bicarbonatos, fosfatos, calcio, magnesio, sodio y potasio.

De los resultados, se establece que las concentraciones de cloruros, bicarbonatos y STD rebasan el LMP que establece la norma mencionada. La concentración de STD varía de 360 a 2,220 mg/l, sólo tres muestras, 2 procedentes de pozos en el lago Nabor Carrillo y 1 en un pozo del Ramal Peñón- Texcoco, rebasan los 1000 mg/l que establece la NOM para el agua destinada al consumo humano.

De acuerdo con los trabajos realizados por diversos investigadores, la calidad del agua subterránea en el acuitardo ha sido identificada en forma indirecta por medio de geofísica (Rodríguez, 1987; Rodríguez y González, 1989) y directa por medio de toma de muestras en pozos y piezómetros y extracción del agua de poro en núcleos de sedimentos (Hiriart y Graue, 1969; Ortega et al. 1993; Ortega et al. 1997, Pitre, 1993; Rudolph et al. 1991; Domínguez et al., 1996; SARH-CAVM, 1988; DGCOH, 1996).

Los resultados de dichas investigaciones indican que, en general, el agua subterránea contenida en el acuitardo lacustre se considera de mala calidad, al compararla con la NOM-127-SSA1-1994.

Aunque la información disponible relacionada con la distribución espacial de los solutos disueltos en el acuitardo no es abundante, es posible establecer que la salinidad del agua presenta una distribución heterogénea dentro del cuerpo arcilloso. Por ejemplo, las concentraciones de STD que se detectan en la zona que ocupaba el Lago de Texcoco se encuentran entre 37,000 a 195,000 mg/l, mientras que en Chalco los valores máximos son un poco menores (15,600 mg/l; Domínguez, 1996).

Para el caso de concentraciones de cloruro, Rudolph et al. (1991) reportaron valores máximos del orden de 60,000 mg/l a una profundidad de 20 m en los sedimentos lacustres de la planicie de Texcoco. La presencia de características de acuífero semiconfinado en la región del Ex-Lago de Texcoco, favorece en el subsuelo la generación de condiciones redox reductoras, que facilitan la movilización de ciertos elementos.

De este modo, las concentraciones de especies redox que se detectan en el agua subterránea de algunos pozos ubicados en las regiones con agua de mala calidad, indican que las condiciones redox a profundidad constituyen un factor determinante en la movilidad de elementos como el nitrógeno amoniacal, hierro, manganeso y ácido sulfhídrico, constituyentes que representan un problema en el abastecimiento de agua potable proveniente de pozos. Con respecto a las familias del agua por iones dominantes, están presentes diferentes familias del agua, predominando entre ellas la clorurada-sódica, bicarbonatada-sódica, clorurada-mixta, y bicarbonatada-magnésica, entre otras.

Por otro lado, no se tiene un inventario de las fuentes de contaminación; solo existen estudios regionales de calidad del agua por su contenido de contaminantes orgánicos e inorgánicos. La ausencia de plantas de tratamiento impide la reutilización segura de este recurso, como fuente para satisfacer parcial o totalmente las necesidades de riego agrícola y jardines, que disminuirían la demanda de agua subterránea.

Adicionalmente la disposición, tránsito y uso de aguas residuales en la zona, constituye una fuente potencial de contaminación. De acuerdo a los resultados de análisis de las aguas residuales practicados en los estudios anteriores, se concluye que la salinidad

del agua residual y las concentraciones de nitrógeno y sulfatos totales de los ríos no rebasan los LMP, de 0.5 y 400 mg/l, respectivamente, por lo que, para el riego y en el sector público-urbano no tiene restricciones, pero si para la protección de la vida acuática.

La alta concentración de materia orgánica en el agua residual explica los altos valores de DBO encontrados e indica que el agua residual sin tratamiento no debe utilizarse para riego, mucho menos para el sector público-urbano. La contaminación por coliformes fecales y parásitos del agua residual es severa, rebasando ampliamente los LMP para aguas destinadas al riego agrícola.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2006, se registraron un total de 1009 aprovechamientos, de los cuales sólo 552 se consideran activos y 457 inactivos. De los aprovechamientos activos 528 son pozos, 5 norias y 19 manantiales; las únicas norias existentes se localizan al norte del acuífero, en las inmediaciones de Tepetlaotoc.

Del total de aprovechamientos activos, 256 se destinan al uso agrícola, 193 para uso público-urbano, 30 para actividades pecuarias, 24 para uso industrial y 49 para uso múltiple y servicios. En total el volumen de extracción asciende a **183.1 hm³ anuales**, con la siguiente distribución por usos: 128.4 hm³ (70.1%) para uso público-urbano, 48.6 hm³ (26.6%) para uso agrícola, 3.7 hm³ (2.0%) para uso industrial, 1.6 hm³ (0.9%) para uso múltiple y servicios y 0.8 hm³ (0.4%) para uso pecuario. Adicionalmente, a través de los **19 manantiales** se descarga un caudal conjunto de 330 lps, que representan un volumen de 10.4 hm³ anuales, destinados al uso agrícola y pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2006-2011, en una superficie de 700 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa es la siguiente:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de masa}$$

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento:

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión:

$$Rv + Ri + Eh - B - Dm = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Rv: Recarga vertical

Ri: Recarga inducida

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

B: Bombeo

Dm: Descarga a través de manantiales

$\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento:

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + D_m - R_i - E_h \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2009 (figura 4), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

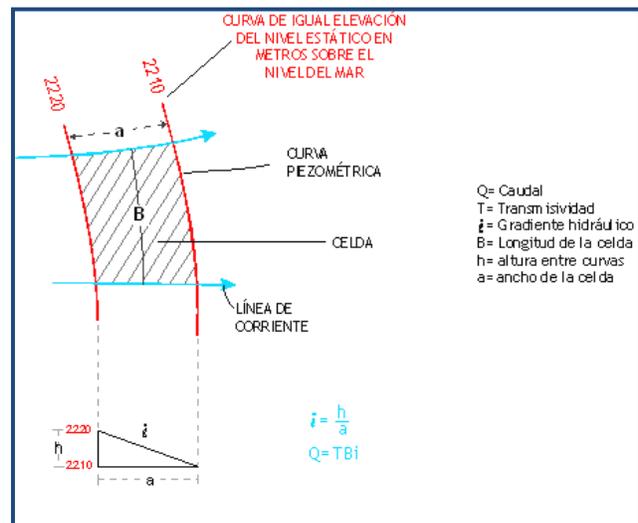
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **38.7 hm³/año**. Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos y en el llevado a cabo en el 2010, adaptados al espesor saturado en cada zona.

Tabla 2. Cálculo de entrada por flujo subterráneo horizontal

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E1	6290	1575	10	0.0063	0.0015	0.0599	1.9
E2	2920	1685	10	0.0059	0.0020	0.0347	1.1
E3	4045	1795	10	0.0056	0.0005	0.0113	0.4
E4	1795	1235	10	0.0081	0.0005	0.0073	0.2
E5	3370	2250	10	0.0044	0.0005	0.0075	0.2
E6	2695	1575	10	0.0063	0.0010	0.0171	0.5
E7	1800	2250	10	0.0044	0.0010	0.0080	0.3
E8	1685	675	20	0.0296	0.0015	0.0749	2.4
E9	1795	1125	20	0.0178	0.0020	0.0638	2.0
E10	1910	1010	10	0.0099	0.0020	0.0378	1.2
E11	2470	1685	10	0.0059	0.0020	0.0293	0.9
E12	2810	1125	20	0.0178	0.0030	0.1499	4.7
E13	2020	1010	20	0.0198	0.0015	0.0600	1.9
E14	8540	900	20	0.0222	0.0015	0.2847	9.0
E15	3370	560	20	0.0357	0.0020	0.2407	7.6
E16	1800	1125	10	0.0089	0.0030	0.0480	1.5
E17	3370	1460	10	0.0068	0.0003	0.0069	0.2
E18	5170	1130	10	0.0088	0.0003	0.0137	0.4
E19	5395	900	10	0.0111	0.0005	0.0300	0.9
E20	2250	1010	10	0.0099	0.0005	0.0111	0.4
E21	2135	1800	10	0.0056	0.0003	0.0036	0.1
E22	7415	785	10	0.0127	0.0003	0.0283	0.9
Total entradas							38.7

7.1.3 Recarga Inducida

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, el volumen del agua que retorna al acuífero ya sea en forma de retornos de riego y de infiltración de las fugas en las redes de agua potable y alcantarillado, se estimó al considerar un coeficiente de infiltración de 2% para el subsuelo constituido principalmente por las arcillas que conforman el acuitardo.

De esta manera, si tomamos en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen anual de 135.0 hm^3 , de los cuales 48.6 hm^3 son aguas subterráneas y 86.4 hm^3 aguas superficiales, el volumen de la recarga por retornos de riego es $R_r = 135.0 (0.02) = 2.7 \text{ hm}^3$ anuales.

De igual forma, considerando que el volumen de agua subterránea que se destina al uso público-urbano es de 128.4 hm³ anuales y un 2% de coeficiente de infiltración, el volumen de infiltración de las fugas en las redes de agua potable y de alcantarillado es de 2.6 hm³ anuales. Por lo tanto, **Ri = 5.3 hm³ anuales.**

7.2 Salidas

La descarga total del acuífero ocurre principalmente mediante la extracción por bombeo (B) y de manera natural a través de la descarga de los manantiales (Dm). No existen salidas subterráneas (Sh), descarga por flujo base (Dfb) ni por evapotranspiración (ETR).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **183.1 hm³ anuales.**

7.2.2 Descarga a través de manantiales

A través de los 19 manantiales se descarga un caudal conjunto de 330 lps, que representan un volumen de **10.4 hm³ anuales.**

7.3 Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático para el periodo 2006-2011 (figura 5). Con base en ella y considerando un rendimiento específico S_y = variable de 0.10 a 0.15 y un coeficiente de almacenamiento promedio de 0.05, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 700 km², mediante la siguiente expresión

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

$\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

h: Valor de la variación piezométrica en el período (m)

En la tabla 4 se muestra el detalle de la estimación del cambio de almacenamiento, cuyo valor medio anual es de -48.4 hm³. Por lo tanto $\Delta V(S) =$ **-48.4 hm³ anuales.**

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2000-2014)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-5	-5	10.0	0.15	-7.5
-10	-10	9.0	0.1	-9.0
-8 a -10	-9	85.0	0.1	-76.5
-5 a -8	-6.5	99.0	0.1	-64.4
-3 a -5 (volcánico)	-4.0	35.0	0.15	-21.0
-3 a -5 (lacustre)	-4.0	318.0	0.05	-63.6
0	0	144.0	0.15	0.0
Área de balance		700.0	TOTAL	-242.0
		Promedio anual		-48.4

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar, es la recarga vertical:

$$R_v = B + D_m - R_i - E_h \pm \Delta V(S)$$

$$R_v = 183.1 + 10.4 - 5.3 - 38.7 - 48.4$$

$$R_v = 101.1 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = E_h + R_v + R_i$$

$$R = 38.7 + 101.1 + 5.3$$

$$R = 145.1 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{array}{l} \text{DISPONIBILIDAD} \\ \text{MEDIA ANUAL DE} \\ \text{AGUA DEL SUBSUELO} \\ \text{EN UN ACUÍFERO} \end{array} = \begin{array}{l} \text{RECARGA} \\ \text{TOTAL} \\ \text{MEDIA} \\ \text{ANUAL} \end{array} - \begin{array}{l} \text{DESCARGA} \\ \text{NATURAL} \\ \text{COMPROMETIDA} \end{array} - \begin{array}{l} \text{EXTRACCIÓN DE} \\ \text{AGUAS} \\ \text{SUBTERRÁNEAS} \end{array}$$

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero.

Para este caso, su valor es de **145.1 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, el valor de la descarga natural comprometida corresponde a la descarga a través de los manantiales. Por lo que, **DNC = 10.4 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **284,505,124 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 145.1 - 10.4 - 284.505124 \\ \text{DMA} &= -149.805124 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **149,805,124 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1997. Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación de los acuíferos Texcoco y Atlacomulco-Ixtlahuaca. Realizado por Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 1997. Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos activos en 1996 en el Valle de México. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. 2010. Estudio Técnico para elaborar el reglamento del uso del agua subterránea del acuífero de Texcoco. Realizado por la Unidad Gestora de Servicios Tecnológicos de la Universidad Autónoma Chapingo.