



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ZONA METROPOLITANA DE LA
CD. DE MÉXICO (0901), CIUDAD DE MÉXICO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	7
3.1. Provincias fisiográficas.....	7
3.2. Clima.....	9
3.3. Hidrografía.....	10
3.4. Geomorfología.....	11
4. GEOLOGÍA.....	12
4.1. Estratigrafía.....	14
4.2. Geología estructural.....	22
4.3. Geología del subsuelo.....	24
5. HIDROGEOLOGÍA	25
5.1. Tipo de acuífero.....	25
5.2. Parámetros hidráulicos.....	26
5.3. Piezometría.....	26
5.4. Comportamiento hidráulico.....	26
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	26
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	27
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	28
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	29
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	30
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	31
7.1. Entradas.....	31
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	31
7.2. Salidas.....	34
7.2.1. Bombeo (B).....	34
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	34
7.2.3. Descarga a través de manantiales (Dm).....	34
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	34
8. DISPONIBILIDAD	36
8.1. Recarga total media anual (R).....	36
8.2. Descarga natural comprendida (DNC).....	36
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	36
8.4. Disponibilidad de agua subterránea (DMA).....	37
9. BIBLIOGRAFÍA	38

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 Zona Metropolitana de la Cd. de México, definido con la clave 0901 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del país, en el límite con los estados de Morelos y de México, abarcando también parte de él, entre los paralelos 19°02'54" y 19°35'31" de latitud norte y entre los meridianos 98°55'21" y 99°25'43" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,139 km².

Limita al norte y noroeste con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, al noreste y este con Texcoco, al sureste con Chalco-Amecameca, y al oeste con Valle de Toluca, todos ellos pertenecientes al estado de México; al sur y sureste con Cuautla-Yautepec, al sur con Cuernavaca, ambos del estado de Morelos (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero comprende las 16 alcaldías de la Ciudad de México: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco; de la misma manera el municipio de Tlalnepantla de Baz, casi la totalidad de Huixquilucan, Naucalpan de Juárez y Atizapán de Zaragoza, así como de manera parcial los municipios de Jilotzingo, Tultitlán, Ecatepec de Morelos, Xonacatlán, Nezahualcóyotl, La Paz, Ixtapaluca y Valle de Chalco Solidaridad, todos ellos pertenecientes al estado de México.

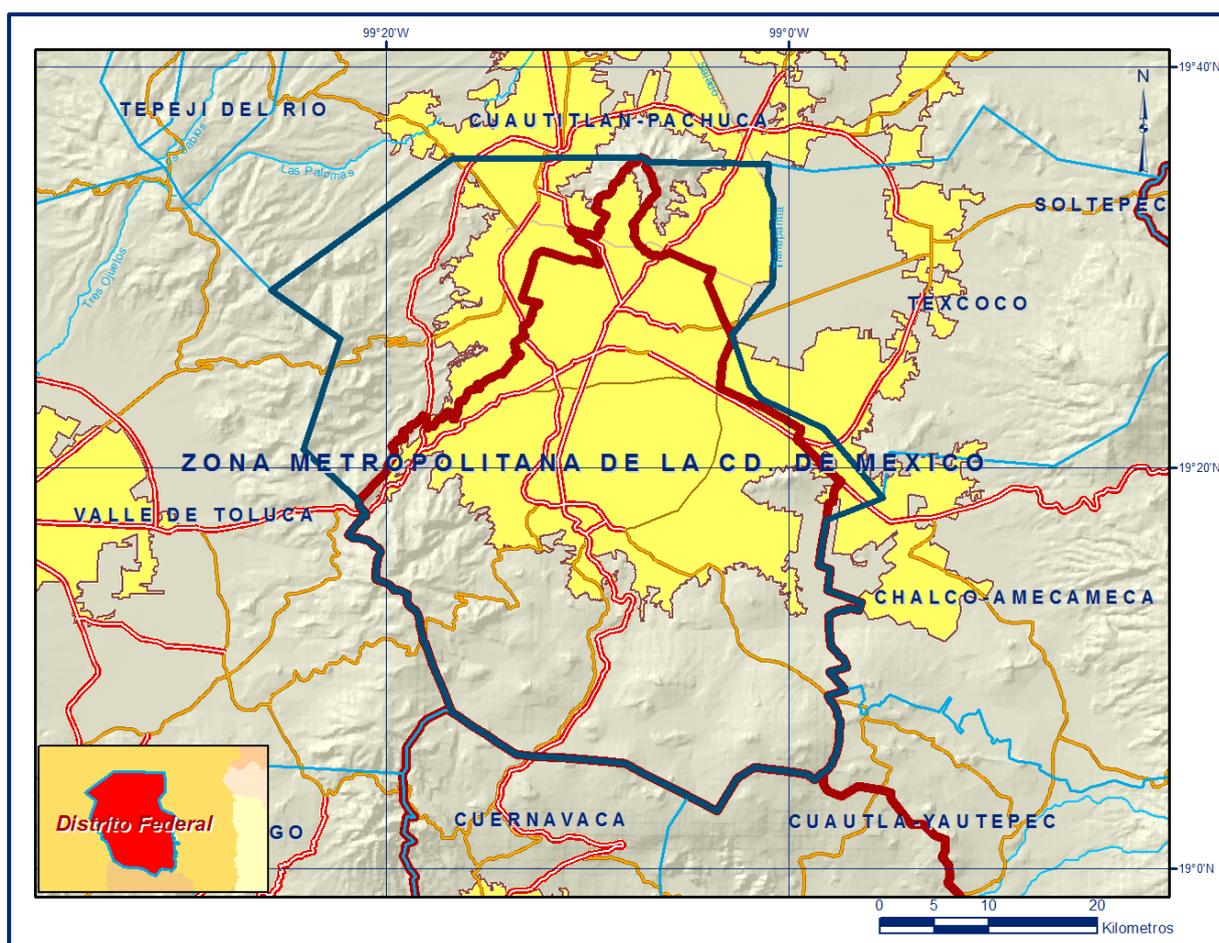


Figura 1. Localización del acuífero

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

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y al Consejo de Cuenca Valle de México, instalado el 16 de agosto de 1995. Su territorio se encuentra parcialmente vedado, la mayor parte de él sujeto a las disposiciones de 2 decretos de veda. El que cubre la mayor superficie es 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 tipo I en la que en la que la capacidad de los mantos acuíferos solo permite extracciones limitadas para usos domésticos.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0901 ZONA METROPOLITANA DE LA CD. DE MEXICO

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	21	22.1	19	18	22.7	
2	99	24	5.5	19	20	55.5	
3	99	22	14.9	19	26	27.3	
4	99	25	42.6	19	28	51.6	
5	99	16	40.2	19	35	28.2	
6	99	7	23.2	19	35	30.7	DEL 6 AL 7 POR EL LIMITE ESTATAL
7	99	7	2.9	19	35	17.2	
8	99	1	0.7	19	35	11.6	
9	99	1	4.5	19	34	8.8	
10	99	0	48.6	19	33	27.9	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE MUNICIPAL
11	99	0	50.2	19	29	9.4	
12	99	2	50.0	19	26	37.3	
13	99	1	59.0	19	24	8.4	
14	99	1	25.4	19	23	28.2	
15	98	58	17.4	19	21	59.0	
16	98	55	21.5	19	18	29.8	
17	98	58	9.3	19	17	24.0	DEL 17 AL 18 POR EL LIMITE ESTATAL
18	98	58	19.5	19	4	47.8	DEL 18 AL 19 POR EL LIMITE ESTATAL
19	99	5	0.1	19	3	37.7	DEL 19 AL 20 POR EL LIMITE ESTATAL
20	99	16	44.9	19	7	50.0	DEL 20 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	99	21	22.1	19	18	22.7	

En pequeñas áreas de su extremo occidental rige el “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida como Valle de Toluca, del Estado de México”, publicado en el DOF el 23 de septiembre de 1965. Esta veda es tipo III en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Sólo en una pequeña zona de la región sur, que limita con el estado de Morelos, no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no

vedada está sujeta a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 21 acuíferos que se indican”, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, se prohíbe la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, y el incremento de volúmenes autorizados o registrados, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. No existe distrito ni unidad de riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En su territorio existen los parques nacionales, Desierto de Los Leones, Cumbres del Ajusco, Lomas de Padierna, Cerro de la Estrella, El Histórico Coyoacán, Los Remedios, El Tepeyac y El Tepozteco; decretados el 27 de noviembre de 1917, 23 de septiembre de 1936, 22 de abril de 1938, 24 de agosto de 1938, 18 de febrero de 1937 y 22 de enero de 1937, respectivamente; así como el Área de Protección de Flora y Fauna Silvestres Corredor Biológico Chichinautzin, decretada e 30 de noviembre de 1988.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo muchos estudios geohidrológicos y de muchos otros tipos, así como escrito infinidad de artículos y tesis profesionales, entre los más importantes utilizados para este documento se mencionan los siguientes:

GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE MÉXICO, 1989. E. VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, R. JAIMES-PALOMERA. Geofísica Internacional. Vol. 28. No. 2 (1989). Propone la evolución geológica de la Cuenca de México desde el Cretácico, con base en el análisis estratigráfico, estructural y petroquímico. Describe la estratigrafía de las unidades litológicas de la cuenca.

MODELO GEOQUÍMICO CONCEPTUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE DE MÉXICO, 1995. A. Cardona y N. Hernández. Ingeniería Hidráulica de México. Vol. X, Núm. 3, pags.71-90, septiembre-diciembre de 1995. A partir de la interpretación de resultados de análisis químicos de elementos mayores y traza de agua subterránea y del reconocimiento de la interacción agua-roca, así como del cálculo del balance de masa, se propone un

modelo conceptual de la evolución química del agua subterránea, con la identificación de los procesos geoquímicos dominantes en el contexto hidrogeológico y dinámico del área de estudio.

VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E., 1995. MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO Y CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL ACUÍFERO EN EXPLOTACIÓN EN LA PARTE MERIDIONAL DE LA CUENCA DE MÉXICO. TESIS DE MAESTRIA, UNAM, MÉXICO. Define el modelo conceptual hidrogeológico que consiste de un acuífero superior en explotación separado hidráulicamente de otro inferior profundo, por un potente acuitardo inferior identificado a profundidades mayores de 800, Determina las características hidráulicas del acuífero en explotación mediante la interpretación de pruebas de bombeo por métodos analíticos y con un modelo numérico de flujo radial hacia el pozo, obteniendo valores de conductividad hidráulica de 8.6×10^{-6} a $< 3.7 \times 10^{-5}$ m/s y 1.7×10^{-5} a 4.9×10^{-5} m/s, respectivamente, congruentes con el medio poroso del acuífero superior. La distribución espacial de los valores de rendimiento específico (0.06 a 0.17) y coeficiente de almacenamiento (2.4×10^{-4} a 2.1×10^{-3}), que obtuvo de la simulación numérica de pruebas de bombeo, también concuerda con el tipo de medio poroso y comportamiento hidráulico del acuífero superior.

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.

DIAGNÓSTICO DE LA REGIÓN XIII VALLE DE MÉXICO. Realizado en 1997 por DEMM Consultores S.A de C.V. 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.

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.

ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO, ASÍ COMO DE EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO. Realizado en el año 2007 (b) por Ariel Consultores, S.A. para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Contiene los resultados de análisis fisicoquímicos de muestras de agua subterránea de pozos para abastecimiento de agua potable localizados en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

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.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA, CALIDAD DEL AGUA Y FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DEL ACUÍFERO ZONA METROPOLITANA DE LA CD. DE MÉXICO. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, de calidad del agua y de las fuentes de abastecimiento de agua potable.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico. Esta zona se considera una provincia fisiográfica independiente al resto de la República. Manuel Álvarez Jr. (1958), denominó a esta provincia como Zona de Fosas Tectónicas y Vulcanismo Reciente. Menciona que se caracteriza porque en ella predominan derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugieren estar situados en fosas tectónicas,

de ahí el nombre. Por otra parte, según 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, 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 Terciario 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, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (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. Está integrada por grandes sierras volcánicas o aparatos individuales que se alternan con amplios vasos lacustres. A ella pertenecen algunos de los más elevados volcanes del país; predominan las llanuras formadas por depósitos aluviales, como la de Tizayuca-Pachuca, rodeada de serranías, con una elevación media de 2,400 msnm.

El acuífero limita con elevaciones topográficas volcánicas como la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de Las Cruces al poniente, La Sierra Chichinautzin al sur, el volcán del Ajusco al suroeste y la Sierra Nevada al oriente. Dentro del valle existen algunos aparatos volcánicos aislados, los principales son los que forman la Sierra de Santa Catarina y algunos otros que aparecen en forma aislada como son el Peñón del Marqués, Peñón de los Baños y Cerro de La Estrella.

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 templado subhúmedo C(w0), con temperatura media anual entre 12y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura del mes más cálido menor de 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5 al 10.2% del total anual.

Conforme se asciende topográficamente se presenta el clima C(w1), C(w2) templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura del mes más cálido menor de 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. La diferencia en estas variantes reside en el índice P/T, para la primera varía entre 43.2 y 55 y para la segunda es mayor de 55. En las zonas topográficamente más altas que conforman la sierra las Cruces y Chichinautzin el clima es Cb'(w2) Semifrío subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 y 12°C, con temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, temperatura del mes más cálido menor de 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

En el extremo oriental predomina el clima BSkw semiárido templado, con temperatura media anual entre 12y 18°C, con temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, temperatura del mes más cálido menor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se analizó la información de 24 estaciones que tienen influencia en la superficie del acuífero: El Guarda, San Francisco Tlalnepantla, Milpa Alta, Tláhuac, Los Reyes La Paz, Lago Nabor Carrillo, Granjas Guadalupe, Las Arboledas, San Mateo Tecoloapan, Calacoaya, El Salitre, San Luis, Molino Blanco, Presa Totolica, Magdalena Chichicarpa, Huixquilucan, Monte Alegre, Presa Anzaldo, Colonia Santa Úrsula Coapa, San Lorenzo, Colonia Escandón, Colonia Marte, Colonia Agrícola Oriental y Presa Tacubaya. Con los registros de estas estaciones para el periodo 1975-2015, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración real de **768.5 mm, 14.7 °C y 1558.8 mm**, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia, uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones

menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región. En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, junio es el mes más cálido, en tanto que los meses de enero y diciembre registran la menor temperatura media.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica No. 26, Pánuco, Subregión Hidrológica Valle de México, cuenca del Río Moctezuma, que, por su manejo artificial para drenar sus aguas pluviales y residuales, pertenece a la Subcuenca del Alto Pánuco. En él se reconocen las zonas hidrológicas Xochimilco, Churubusco y Ciudad de México, y parcialmente a las zonas hidrológicas Texcoco y Chalco. En la zona Xochimilco destacan los ríos que descienden de la Sierra Chichinautzin, como San Gregorio, Santiago, San Lucas y San Buenaventura, los remanentes de las lagunas Xochimilco y Tláhuac, así como los canales de Cuemanco, Nacional, Bordo, Apatlaco, Chalco y De Garay. En la zona Churubusco existen los ríos (la mayoría de ellos entubados) Eslava, Magdalena, Barrancas, San Jerónimo, Anzaldo, Barrancas Coyotes, Guadalupe, Del Muerto, Texcalatlaco, Tarango y Mixcoac; los tres últimos cuentan con presas de almacenamiento para control de avenidas.

La zona Ciudad de México comprende varios ríos, entre ellos los denominados Becerra, Tacubaya, Tecamachalco, San Joaquín, Tornillo, Hondo, Totolica, Chico de los Remedios, San Mateo Nopala, Remedios, Tlalnepantla y San Javier. Los únicos escurrimientos perennes son Tacubaya, San Joaquín, Hondo y Tlalnepantla. Entre las presas importantes destacan las conocidas con los nombres Madín, Los Cuartos, El Sordo, San Joaquín, Tecamachalco, Tacubaya y Becerra. En la zona Chalco el dren general es el Río de La Compañía, que recibe los escurrimientos provenientes de la Sierra Nevada, al igual que la Zona Texcoco.

La infraestructura hidráulica es muy amplia, cuenta con una gran cantidad de obras hidráulicas, desde pequeños bordos hasta presas de mediana magnitud, algunas de las cuales están en servicio y otras azolvadas; además de varias presas para control de avenidas (Tacubaya, Becerra, Tarango, Anzaldo, Tecamachalco, San Joaquín, El Sordo, entre otras). También existe una serie de canales y ríos entubados que se localizan en la porción central de la Ciudad de México. Cuenta además con una gran cantidad de pozos para uso público-urbano, que integran los sistemas controlados por los organismos operadores: Sur, Pozos Aislados del Sur, Xotepingo, Santa Catarina, Santa Catarina-Mixquic, Oriente, Centro, Norte, entre otros, que suministran agua a gran parte de la población que se asienta en la ciudad. Por estos sistemas de abastecimiento se conduce agua que se extrae tanto de este acuífero como de acuíferos vecinos, como Cuautitlán-Pachuca e Ixtlahuaca-Atlahcomulco, y

de otras cuencas, como los sistemas Lerma y Cutzamala. Existen además pozos particulares para usos industriales, servicios y en menor proporción algunos para uso agrícola en Tláhuac y Xochimilco.

En cuanto al alcantarillado y drenaje de aguas pluviales y negras, se cuenta con varias redes de emisores, entre ellos, el emisor del poniente al que descarga sus aguas el Río Cuautitlán, para posteriormente salir de la cuenca. El Gran Canal del Desagüe es una estructura superficial construida a principios del siglo pasado para desalojar las aguas residuales y pluviales, y que ha estado en operación por más de 100 años; Además, se tiene el drenaje profundo y el túnel emisor oriente, también para desalojar las aguas de la Cuenca del Valle de México, así como con varias plantas de tratamiento de agua para usos industriales y riego de jardines.

3.4. Geomorfología

La actividad ígnea del Eje Neovolcánico dio 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. De manera general, se puede observar que la morfología es variada, se presentan diversos tipos de estructuras volcánicas bien conservadas, como conos cineríticos, volcanes compuestos y volcanes escudo, además de extensos derrames basálticos, sobre los que se han formado 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. La geomorfología se caracteriza por una extensa planicie rodeada por sierras volcánicas, cuya morfología, orientación y distribución, sugieren que está situada sobre el relleno granular de origen sedimentario y vulcanosedimentario de fosas tectónicas. La zona está limitada por elevaciones topográficas de origen volcánico como la Sierra de Guadalupe, al norte, cuya expresión morfológica está fuertemente afectada por la erosión a un grado que apenas se pueden reconocer las formas volcánicas originales; la Sierra Las Cruces, al poniente; la Sierra Chichinautzin, al sur; el Volcán Ajusco, al suroeste y en forma más alejada la Sierra Nevada, al oriente, que es parte de otra unidad hidrogeológica, donde se aprecian los majestuosos volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, el primero, estratovolcán en actividad y el segundo, afectado por la erosión muestra una morfología más compleja. Dentro de la cuenca se localizan algunos aparatos volcánicos aislados

como la Sierra de Santa Catarina, Peñón del Marqués, Peñón de los Baños y el Cerro de La Estrella.

Antiguamente la cuenca del Valle de México drenaba hacia el sur, las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por las emisiones de productos volcánicos que dieron origen a la Sierra Chichinautzin, convirtiéndola en una cuenca endorreica, ocasionando la acumulación de agua en las partes más bajas del valle, dando origen a la cuenca con los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac, actualmente desecados o en proceso de desecación.

La planicie lacustre, representa las partes topográficamente más bajas, ocupa un 20% del área total, con altitudes variables entre 2,230 y 2,240 msnm, actualmente drenada artificialmente a través de diversas obras hidráulicas, entre ellas el Gran Canal del Desagüe y el Sistema de Drenaje Profundo.

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. Aunque su basamento está constituido por rocas calcáreas cretácicas, está dominada por rocas ígneas extrusivas cuyo origen se debe a procesos volcánicos y tectónicos desarrollados desde el Eoceno. Durante este período se inició un conjunto de procesos eminentemente volcánicos, evidenciados por la presencia de importantes espesores de lavas, tobas y brechas. 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. Durante este tiempo (final del Mioceno) el inicio la formación de las denominadas sierras mayores: Sierra de Río Frío y Sierra Nevada (figura 2).

mayor extensión de rocas volcánicas cuaternarias. 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.

En el subsuelo existen secuencias de rocas que corresponden a intercalaciones de productos volcánicos, tales como lavas, tobas y cenizas que incluyen depósitos sedimentarios continentales, representados por materiales granulares transportados por ríos y arroyos provenientes de las partes topográficamente altas que rellenan los valles. Cubriendo a dichos materiales y con espesores variables, se encuentran arcillas y arenas finas, que son el producto de los más recientes procesos sedimentarios de los antiguos lagos.

4.1. Estratigrafía

La geología superficial y del subsuelo de la cuenca del Valle de México, y por lo tanto del acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México, está constituida por rocas sedimentarias y volcánicas, 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, cuyo depósito ocurrió 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 *Touacacia* 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. Corresponde a la unidad más antigua que aflora en la zona. Está formada por rocas calizas de grano fino (micritas) compactas, dispuestas en estratos de 50 cm de espesor. Presenta color gris a gris claro y abundantes fósiles.

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. Su depósito ocurrió en aguas marinas someras y representa una secuencia Flysch (De Cserna, 1988), la cual posiblemente se originó como consecuencia del levantamiento y erosión del arco magmático durante el Cretácico del borde occidental del continente (Damon *et al.*, 1981).

TERCIARIO

Grupo Balsas

Los depósitos del Paleógeno-Neógeno que descansan sobre las rocas cretácicas consisten en un grupo de sedimentos clásticos, volcánicos y lacustres, no marinos, que se denominan 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. Estas vulcanitas forman parte del basamento geohidrológico y por su baja permeabilidad, funcionan como basamento geohidrológico del acuífero. 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 2000 m de espesor, constituida por capas deleznable de arcillas, limos y arenas. Descansa discordantemente encima de las formaciones cretácicas.

Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano

Esta secuencia volcánica constituida por tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados; que contienen capas de clásticos aluviales de espesor promedio de 6 m, que indican inactividad volcánica. En el subsuelo de la Cuenca de México estas rocas volcánicas cubren localmente en forma discordante a unidades cretácicas y son discordantes con las rocas volcánicas del Mioceno Medio y Tardío por formaciones del Plio-Cuaternario. Aflora muy erosionada y fracturada en los cerros Picac hoy Púlpito del Diablo, su espesor es variable entre 390 a 1,750 m y su composición varía de andesítica a riodacítica.

Rocas Volcánicas del Plioceno

Dominan extensas zonas de la región norte y constan de una gran variedad de rocas volcánicas, cuya formación tuvo lugar en el Plioceno. Destacan las rocas ácidas e intermedias que ocupan parte de las sierras de Guadalupe y Tepotzotlán.

Su composición varía de andesítica a riolítica, tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas, con algunas intercalaciones de coladas lávicas y brechas. Su permeabilidad es baja funcionando como frontera de los acuíferos a profundidad. En el Plioceno Medio, se formaron las cuencas endorreicas someras, donde se advierten potentes depósitos lacustres cubiertos por depósitos aluviales, posiblemente interdigitados con cuerpos volcánicos sobrepuestos a los sedimentos lacustres y a las vulcanitas interdigitadas. Su edad corresponde al Plioceno Temprano.

Grupo Pachuca

El nombre fue propuesto por Segerstrom (1961) para referirse a rocas volcánicas que representa la actividad desde el Oligoceno hasta el Plioceno. Las lavas varían en composición de basálticas a riolíticas, predominando las andesitas y las dacitas, que sobreyacen en discordancia erosional al Grupo El Morro en el área de Pachuca y en algunos lugares en discordancia angular; de igual manera descansan en discordancia angular sobre rocas cretácicas. La sucesión más gruesa y más completa de estas rocas se define en la Sierra de Pachuca, en donde están muy falladas, intrusionadas, alteradas hidrotermalmente y mineralizadas, que subyacen a corrientes de riolita. El Grupo Pachuca fue dividido en ocho formaciones (Tezuantla, Cerezo, Vizcaína, Santa Gertrudis, Real del Monte, Pachuca, Corteza y Santiago) basado en estudios detallados realizados de la geología del distrito minero Pachuca-Real del Monte (Geyne, *et al.*, 1963), en donde predomina la andesita y la sucesión tiene más de 2,500 m de espesor. Todas las formaciones mencionadas están constituidas por capas o estratos interdigitados, compuestos por derrames de lava, brecha volcánica y toba. Tiene algunas capas clásticas interestratificadas (conglomerado volcánico y arenisca tobácea) y localmente depósitos lacustres (calizas, lutitas y margas).

Las formaciones que constituyen la mayor parte del grupo tienen grandes afloramientos y 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. Este grupo marca el inicio de una fuerte actividad volcánica a principios del Terciario, que obstruyó el drenaje fluvial de ríos antiguos y, en consecuencia, se formaron incipientes cuencas endorreicas lacustres. Por su amplio rango de edad, que abarca del Oligoceno al Plioceno, incluyen rocas volcánicas relacionadas genéticamente con la actividad

terminal del arco magmático de la Sierra Madre Occidental e inicio de la actividad del arco continental de la Franja Volcánica Transmexicana (Vázquez y Jaimes, 1989).

Rocas volcánicas del Mioceno Medio y Tardío

Con este nombre se designa a las rocas volcánicas constituidas por una secuencia de tobas, brechas volcánicas y lavas, en algunas localidades interestratificadas con brechas volcánicas, que difieren en composición litológica y posición estratigráfica con respecto a las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. Afloran en áreas pequeñas en toda la cuenca, 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 en la Sierra de Guadalupe. En la porción sur de la cuenca se presentan 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 Tepozotlán. En el subsuelo de la porción sur de la Cuenca de México, se distribuyen ampliamente cubriendo discordantemente a las rocas del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano.

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 Tepozotlán; 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 en la Sierra de Monte Alto, ubicada al occidente de la Cuenca de México. Está constituida principalmente por depósitos piroclásticos que se presentan como flujos de lava lobulados que, en las regiones altas de dicha sierra, en la que son características las intercalaciones de brechas volcánicas con coladas lávicas de textura fanerítica entre 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 la zona 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

Conjunto de productos volcánicos emitidos por dos centros eruptivos alineados en dirección norte-sur, que se encuentran en la porción suroccidental del área, 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. Se estima que su espesor es de 1,000 m en el cerro de Zempoala y se considera de edad Plioceno Tardío.

Riolita Navajas

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.

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, lo que indica una interrupción del drenaje fluvial para formar pequeños lagos de corta duración. Vázquez y Jaimes (*op cit.*) en la zona de la localidad tipo, identifican una serie de sucesiones piroclásticas, que comienzan con capas delgadas de pómez de caída y de ceniza-lapilli de oleadas (surges), seguida por gruesos paquetes de tobas y brechas de flujo, generalmente no soldadas, y termina con una capa delgada de cenizas vítreas de nube piroclástica.

Su espesor aproximado es de 400 m y fue depositada en una superficie de erosión que se desarrolló sobre todas las unidades litológicas anteriores, de manera que puede encontrarse igualmente encima de las rocas cretácicas más antiguas, como encima de los depósitos lacustres del Plioceno Medio; su edad es Plioceno Superior.

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.

CUATERNARIO

Formación Llano Grande.

Secuencia eruptiva de composición variable andesítica-riodacítica que aflora en la base noroccidental de la Sierra Nevada. Sus 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. Está cubierta discordantemente por la Formación Iztaccíhuatl.

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 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, 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 a volcánicas del Mioceno Medio-Tardío y del Plioceno Temprano.

Formación Iztaccíhuatl

Rocas emitidas por 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 en 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. 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, que 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.

Depósitos aluviales

Constituidos por materiales poco consolidados, compuestos por fragmentos de granulometría variable, desde gravas, arenas, limos y arcillas; localmente con margas, que rellenaron los valles antes de la existencia de lagos y posterior a su formación se acumularon en las márgenes de las sierras que los rodean. 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, interestratificados con tobas vítreas a profundidades mayores de 180 m. Su espesor varía de 350 a 400 m. 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

Constituidos por sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, depositados en ambiente lacustre. Sus afloramientos se presentan 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 las márgenes de las planicies.

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 Terciario 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).

El relieve estructural original está íntimamente relacionado con una intensa actividad volcánica iniciada a principios del Terciario y desarrollada durante el Pleistoceno Inferior. El conjunto de estructuras que caracterizan al relieve de esta región evolucionó sobre una paleogeografía constituida por los sedimentos mesozoicos plegados de la Sierra Madre Oriental. La evolución de los fenómenos volcánicos propició las condiciones para la formación de cuencas endorreicas, que posteriormente fueron rellenadas con aportes de materiales vulcanoclásticos, los cuales tienen características litológicas de rocas volcánicas depositadas en un medio lacustre y aparecen estratificadas. Estos depósitos actualmente se encuentran en una etapa de rejuvenecimiento y están siendo erosionados, pero sus antiguos niveles quedan como remanentes que se observan en formas planas, como mesetas. El espesor de este paquete volcánico formado por sucesivas coladas de lavas superpuestas, es testimonio de la durabilidad del fenómeno durante un lapso grande de tiempo, que abarcó desde principios del Terciario hasta épocas recientes. En algunas áreas como en las sierras de Chichinautzin, Nevada y de

Pachuca, se ha calculado que la suma de espesores de las formaciones volcánicas depositadas rebasa los 4,000 m.

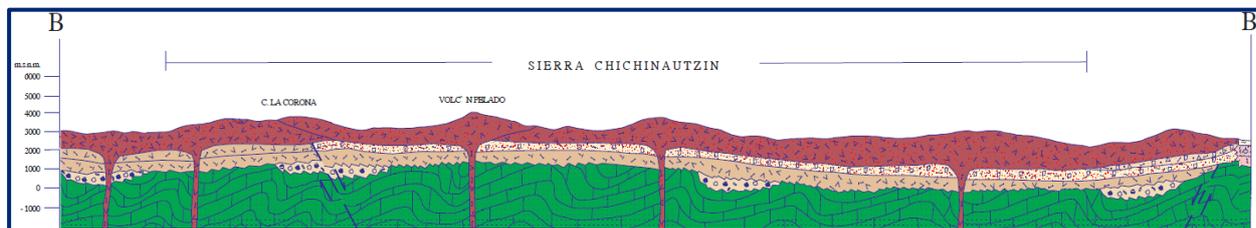
En esta zona se aprecia un conjunto de aparatos volcánicos complejos como el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, El Ajusco, y el Xitle, entre otros. Además, existen varios sistemas de fracturas y fallas regionales; tres son los más importantes: el primero tiene dirección NW-SE que afectó previamente a las rocas mesozoicas y está asociado al patrón estructural de la Sierra Madre Oriental; los otros dos sistemas están orientados N-S y E-SW, asociados a los esfuerzos de tensión que afectaron a las rocas volcánicas del Mioceno. Estos sistemas de fracturas están asociados a los procesos de mineralización que concentraron yacimientos económicos en los distritos mineros de la región. De acuerdo al trabajo de Vázquez-Jaimes (1989), existen varios periodos de actividad volcánica de tipo intermedio que se registran para el Terciario y otro más joven en el Cuaternario, de carácter básico.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información piezométrica, de cortes litológicos de pozos, sondeos geofísicos y geología superficial se puede establecer que de manera general el subsuelo de la región central del acuífero está conformado, en su porción más somera, por una capa de arcillas y limos, en ocasiones separados por horizontes de gravas y lentes duros, cuyo espesor promedio varía de 30 a 50 m, subyacidos por un potente paquete de sedimentos aluviales, constituido por arcillas, gravas, areniscas, conglomerados de origen volcánico y rocas volcánicas de composición riolítica-andesítica, cuyo espesor alcanza los 1500 m.

El acuífero está constituido, en su porción superior por un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución, disposición y propiedades mecánicas, 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, conformado principalmente por material granular más grueso que el del acuitardo, conglomerados de origen volcánico, depósitos vulcanoclásticos y rocas andesíticas y basálticas con intenso fracturamiento, asociadas con brechas volcánicas poco consolidadas y tobas arenosas de grano grueso alteradas; también de espesor y propiedades hidráulicas variables, generalmente mayor de 500 m, que presentan permeabilidad media a alta, dependiendo de su grado de fracturamiento. La unidad basal está representada por rocas volcánicas de composición riolítica, con escaso fracturamiento que le confiere permeabilidad baja, cuya base se localiza por debajo de los 2,000 m en el centro del valle, disminuyendo hacia las márgenes de

la cuenca. Debajo de esta secuencia se presentan las rocas calizas cretácicas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera E14-2 "Ciudad de México" Esc. 1:250.000 (SGM, 2002)

Figura 3. Sección geológica esquemática

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 **semiconfinado** en la porción central de la cuenca, **a libre** en la periferia, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, conformado por dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado.

La porción superior, en particular la región central de la cuenca está conformada por una capa de arcillas y limos, en ocasiones separados por horizontes de gravas y lentes duros, de espesor máximo de 50 m, de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución, disposición y propiedades mecánicas, que actúa como capa semiconfinante o confinante. Bajo este paquete se encuentra el acuífero actualmente en explotación, formado por material granular más grueso que el del acuitardo, conglomerados de origen volcánico, depósitos vulcanoclásticos y rocas andesíticas y basálticas fracturadas, asociadas con brechas volcánicas poco consolidadas y tobas arenosas de grano grueso alteradas; también de espesor y propiedades hidráulicas variables, generalmente mayor de 500 m, que presentan permeabilidad media a alta, que depende del grado de fracturamiento.

La porción inferior está alojada en rocas volcánicas de composición riolítica, con escaso fracturamiento, cuya base se localiza por debajo de los 2000 m en el centro de los valles. 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 el acuífero.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos de las unidades que conforman el acuífero en explotación, se analizó la información de pruebas de bombeo de larga duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, realizadas en estudios previos. 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 **2.5×10^{-5} a $65.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , en tanto que la conductividad hidráulica oscila entre **1.15×10^{-6} y $10.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.7 a 87.3 m/d)**. Los valores más bajos, de 0.1 a 1.0 m/d, se registran en la zona oriental del acuífero, en los límites con el estado de México, en la zona de la Ciudad Deportiva; en tanto que los valores más altos, de 10 a 87 m/d, se registran en las zonas de Xochimilco e Iztapalapa.

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 0.06 a 0.15 y de coeficiente de almacenamiento de 0.02 a 0.0002. De manera general, los valores más altos de los parámetros hidráulicos corresponden a las rocas basálticas fracturadas y los menores a los sedimentos lacustres arcillosos y volcánicos de grano fino.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en estudios previos además de registros históricos durante el periodo 1974-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 30 a 130 m, los cuales se incrementan, de manera general, del centro de los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan, conforme se asciende topográficamente. Esta tendencia general se altera en las zonas de concentración de la extracción para uso público-urbano. Los niveles estáticos más someros, de 30 a 40 m, se registran en la región suroriental del acuífero, entre los poblados San Pedro Mártir, San Andrés Totoltepec y Tetelco, y en la región norte entre Tlalnepantla y el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México; en tanto

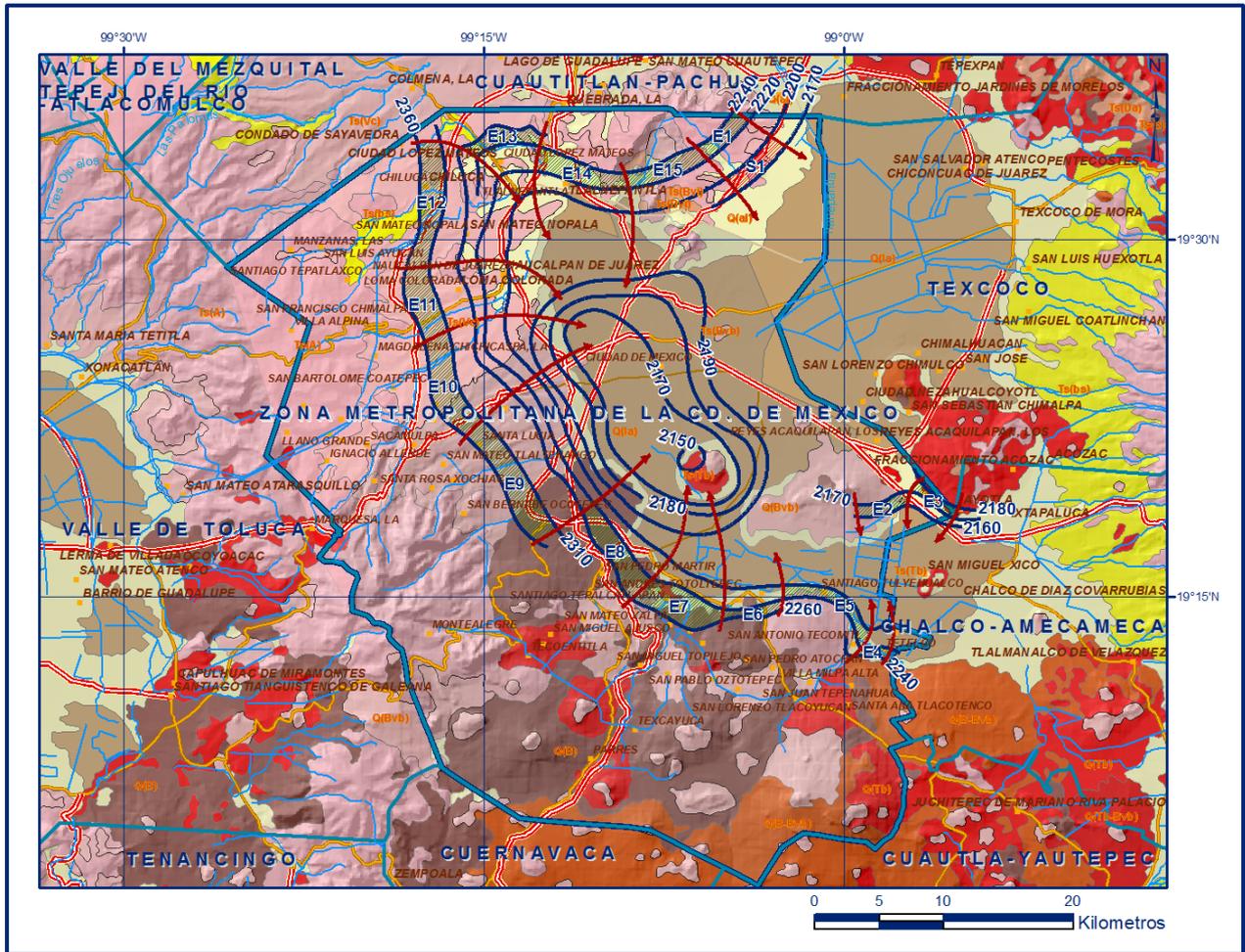


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 registró valores de abatimiento en toda la superficie de explotación del acuífero, que varían de 5 a 30 m, con valores locales de hasta 30 m, que representan 0.5 a 3.0 m anuales. Los valores máximos, de 20 a 30 m, es decir de 2.0 a 3.0 m anuales, de registraron en la porción central del acuífero, entre Cerro de la Estrella y Chapultepec, desde donde descienden gradualmente, hacia las estribaciones de las sierras, hasta desaparecer. En la mayor parte del acuífero el valor promedio del abatimiento es de 1.0 m anuales (figura 6).

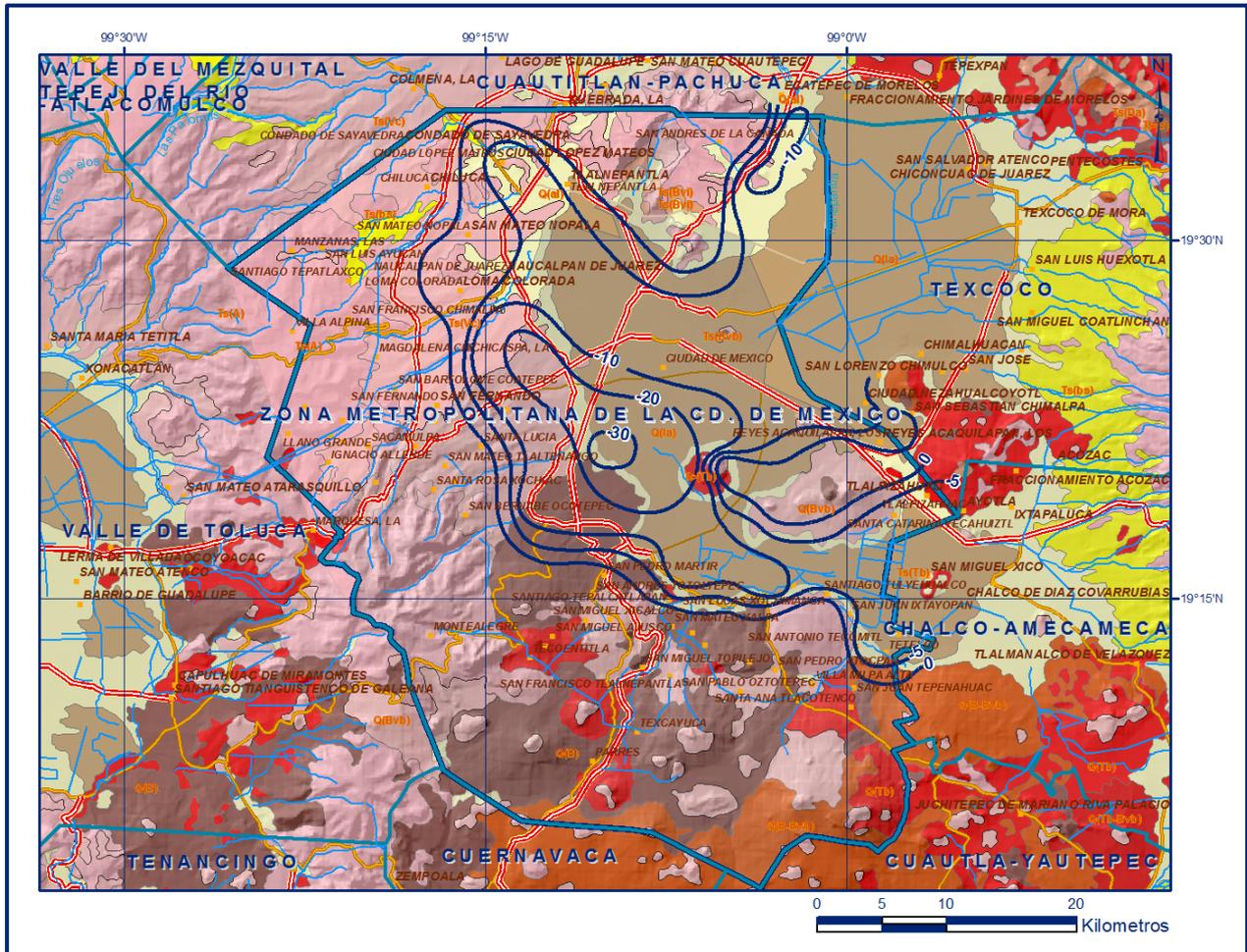


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo del periodo estudio realizado en 2007, por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, se tomaron 283 muestras de agua subterránea, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, iones principales, sílice, aluminio, fierro, manganeso, nitratos, coliformes totales y fecales. Así mismo se tomaron 4 muestras de agua subterránea en el año 2018 y 3 muestras en el año 2020, como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018-2020). Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, para identificar los procesos

geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De los resultados obtenidos a los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos disueltos totales (SDT) variaban de 114 a 4052 mg/l, 12 muestras superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por 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, para el agua destinada al consumo humano. En general, el agua subterránea es de buena calidad en las zonas de recarga y de menor calidad en la planicie; sin embargo, se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma referida, con excepción de la porción oriente del acuífero, en la zona de Iztapalapa, en la que las concentraciones de hierro y magnesio superan las máximas concentraciones permitidas para consumo humano.

En cuanto a la conductividad eléctrica, de acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), de manera general, el agua del acuífero se clasifica como dulce a salobre, con predominio de agua dulce, ya que con excepción de 13 muestras, los valores de conductividad eléctrica son inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; se registraron valores extremos de 136 a 7250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores de temperatura varían de 11.6 a 46.0°C, esta última registrada en un pozo en la zona de El Peñón; y el pH varía de 6.3 a 10.5.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica de manera general como de salinidad baja (C1) y media (C2) y contenido bajo de sodio intercambiable (S1), lo que indica que es apropiada para su uso en riego sin restricciones. Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la bicarbonatada-sódica, que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), se tiene registrado un volumen de extracción de **623.8 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022. De los cuales 558.7hm³ (89.6%) son para abastecimiento de agua potable, 63.7 hm³ (10.2%) para uso industrial, 1.2 hm³ (0.2%) para uso agrícola y 0.2 hm³ (0.0%) para uso doméstico-pecuario.

Adicionalmente, a través de algunos manantiales ubicados en las alcaldías Álvaro

Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras y Tlalpan, se descarga un caudal de 792 lps, que equivalen a **25.0 hm³ anuales**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2009-2019, en un área de balance de **987 km²**, que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos.

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 la 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 en el acuífero:

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Para este caso, debido a que el volumen de aguas subterránea para uso agrícola es muy pequeño, sólo se considera la recarga inducida causada por opal la infiltración de las fugas en las redes de abastecimiento y del alcantarillado.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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

$$R_v + R_i + E_h - B - S_h - D_m = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v: Recarga vertical

R_i: Recarga incidental

E_h: Entradas por flujo subterráneo horizontal

B: Bombeo

S_h: Entradas por flujo subterráneo horizontal

D_m: Descarga a través de manantiales

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene lo siguiente:

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, 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.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

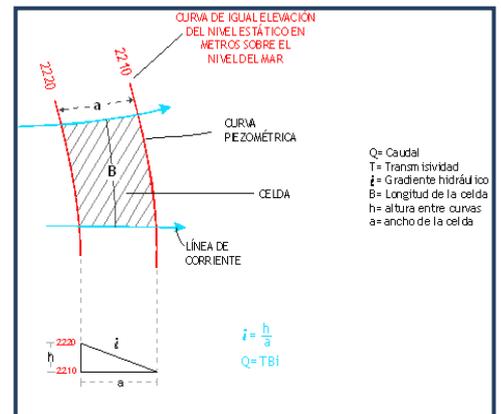
Donde:

Q: Caudal (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



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 es de **306.1 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	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	4167	1200	20	0.01667	0.0035	0.2431	7.7
E2	4000	1050	10	0.00952	0.0060	0.2286	7.2
E3	4050	670	10	0.01493	0.0040	0.2418	7.6
E4	2300	730	20	0.02740	0.0040	0.2521	7.9
E5	7800	950	20	0.02105	0.0050	0.8211	25.9
E6	4360	900	40	0.04444	0.0060	1.1627	36.7
E7	6300	2590	40	0.01544	0.0080	0.7784	24.5
E8	7550	1650	40	0.02424	0.0080	1.4642	46.2
E9	9990	1875	50	0.02667	0.0040	1.0656	33.6
E10	7970	2230	50	0.02242	0.0040	0.7148	22.5
E11	5530	2300	50	0.02174	0.0040	0.4809	15.2
E12	9850	1870	50	0.02674	0.0045	1.1852	37.4
E13	5530	1300	20	0.01538	0.0050	0.4254	13.4
E14	6870	1550	20	0.01290	0.0040	0.3546	11.2
E15	6000	1450	20	0.01379	0.0035	0.2897	9.1
TOTAL							306.1

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, adaptados al espesor saturado.

7.1.3. Recarga incidental (R_i)

Las fugas de la red de abastecimiento de agua potable y del sistema de alcantarillado varían en función del estado físico y antigüedad de las líneas de conducción, así como de la eficiencia en el sistema de distribución. Para el caso de este acuífero, se considera que, de manera general, del volumen para uso público-urbano, el 15% recarga de manera efectiva al acuífero.

El volumen promedio anual de agua que se utiliza para dotación de agua potable y servicios en la zona metropolitana es de 1425.7 hm³ (45.2 m³/s), desglosados de la siguiente manera; 558.7 hm³ (17.7 m³/s) de agua subterránea extraída mediante pozos localizados dentro del acuífero, la importación de 387.9 hm³ (5.1 m³/s) provenientes del Sistema Lerma y 7.2 m³/s de las siete baterías de pozos que integran el Plan de Acción Inmediata PAI), localizados en los acuíferos vecinos

Ixtlahuaca-Atlahcomulco, Texcoco y Cuautitlán-Pachuca; así como 454.1 hm³ (14.4 m³/s) de agua superficial proveniente del Sistema Cutzamala y 25 hm³ (0.8 m³/s) procedentes de manantiales. Si consideramos que el 15% de este volumen total, recarga de manera efectiva al acuífero, entonces **Ri = 213.9 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero a través del bombeo (B) y salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **623.8 hm³ anuales**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen de salidas por flujo horizontal subterráneo es de **3.4 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2019)

CELDA	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)
S1	4850	1350	30	0.02222	0.0010	0.1078	3.4
TOTAL							3.4

7.2.3. Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron algunos manantiales importantes, que en conjunto descargan un caudal de 792 lps, que equivalen a un volumen anuales 25.0 hm³. Por lo tanto, **Dm = 25.0 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy = 0.12 se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

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

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -1003.4 hm^3 , es decir, un promedio anual de **-100.3 hm^3** .

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-10	-10.0	10.9	0.12	-13.1
-30	-30.0	7.8	0.12	-28.1
-20 a -30	-25.0	82.0	0.12	-246.0
-10 a -20	-15.0	161.9	0.12	-291.4
-5 a -10	-7.5	403.4	0.12	-363.1
0 a -5	-2.5	167.9	0.12	-50.4
0 a -5	-2.5	37.6	0.12	-11.3
	TOTAL	871.5	TOTAL	-1003.4
		Promedio anual		-100.3

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se procede a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión 2, que fue establecida con anterioridad:

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

$$R_v = 623.8 + 3.4 + 25.0 - 306.1 - 213.9 - 100.3$$

$$R_v = 31.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 31.9 + 306.1 + 213.9$$

$$R = 551.9 \text{ hm}^3/\text{anuales}$$

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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **551.9 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprendida (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 el caso del acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México su valor es de **28.3 hm³ anuales**, de los cuales 3.3 hm³ corresponden a las salidas que aún se presentan hacia la zona de El Caracol, en el acuífero Texcoco, y 25.0 hm³ a la descarga de los manantiales que está comprometida para abastecimiento de agua potable. Por lo tanto, **DNC = 28.3 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 **993'229,914 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 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 551.9 - 28.3 - 993.229914 \\ \text{DMA} &= - 469.629914 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones. Por el contrario, el déficit es de **469'629,914 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1996. Diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de Pachuca-Tizayuca, Texcoco, Chalco-Amecameca y la Ciudad de México. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Aguas del Valle de México, 1997. Diagnóstico de la Región XIII Valle de México. Realizado por DEMM Consultores S.A de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2000. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Distrito Federal.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. 2007. 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).

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. 2007 (b). Estudio hidrogeoquímico, así como de evolución de la calidad del agua subterránea en la Cuenca del Valle de México. Realizado por Ariel Consultores, S.A.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. 2009. Procesamiento de información de niveles piezométricos de la Cuenca del Valle de México, años 2008 y 2009. Realizado por Grupo Dan Servicios de Ingeniería y Construcciones, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2019, Información piezométrica, calidad del agua y fuentes de abastecimiento de agua potable del acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México.

Modelo Geoquímico Conceptual de la Evolución del Agua Subterránea en el Valle de México, 1995. A. Cardona y N. Hernández. Ingeniería Hidráulica de México. Vol. X, Núm. 3, pags.71-90, septiembre-diciembre de 1995.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológico-Minera "Ciudad de México" E14-2. Escala 1:250,000.

Vázquez-Sánchez E., Jaimes-Palomera R., 1989. Geología de la Cuenca de México, Geofísica Internacional. Vol. 28. No. 2 (1989).

Vázquez-Sánchez E., 1995. Modelo Conceptual Hidrológico y Características Hidráulicas del Acuífero en Explotación en la Parte Meridional de la Cuenca de México. Tesis de Maestría, UNAM México.