

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ÁPAN (1320), ESTADO DE HIDALGO**

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	4
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia fisiográfica.....	6
3.2	Clima.....	6
3.3	Hidrografía	6
3.4	Geomorfología.....	8
4	GEOLOGÍA.....	8
4.1	Estratigrafía.....	10
4.2	Geología estructural	11
4.3	Geología del subsuelo	11
5	HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1	Tipo de acuífero	12
5.2	Parámetros hidráulicos.....	12
5.3	Piezometría	12
5.4	Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	13
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	14
5.4.3	Evolución del nivel estático	15
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	15
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	16
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	17
7.1	Entradas	17
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	18
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	18
7.2	Salidas.....	20
7.2.1	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	20
7.2.2	Bombeo (B).....	20
7.3	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	20
8	DISPONIBILIDAD	21
8.1	Recarga total media anual (R).....	21
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	22
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	22
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	22
9	BIBLIOGRAFÍA	23

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 Ápan, definido con la clave 1320 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del Estado de Hidalgo, en el límite con el Estado de Tlaxcala, entre los paralelos 19°35' y 19°50' latitud norte y los meridianos 98°11' y 98°40' longitud oeste, cubriendo una superficie de 733 km² (figura 1).

Limita al norte con el acuífero Tecocomulco, perteneciente al Estado de Hidalgo; este y sur con el acuífero Soltepec, perteneciente al Estado de Tlaxcala y al oeste con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, perteneciente al Estado de México.

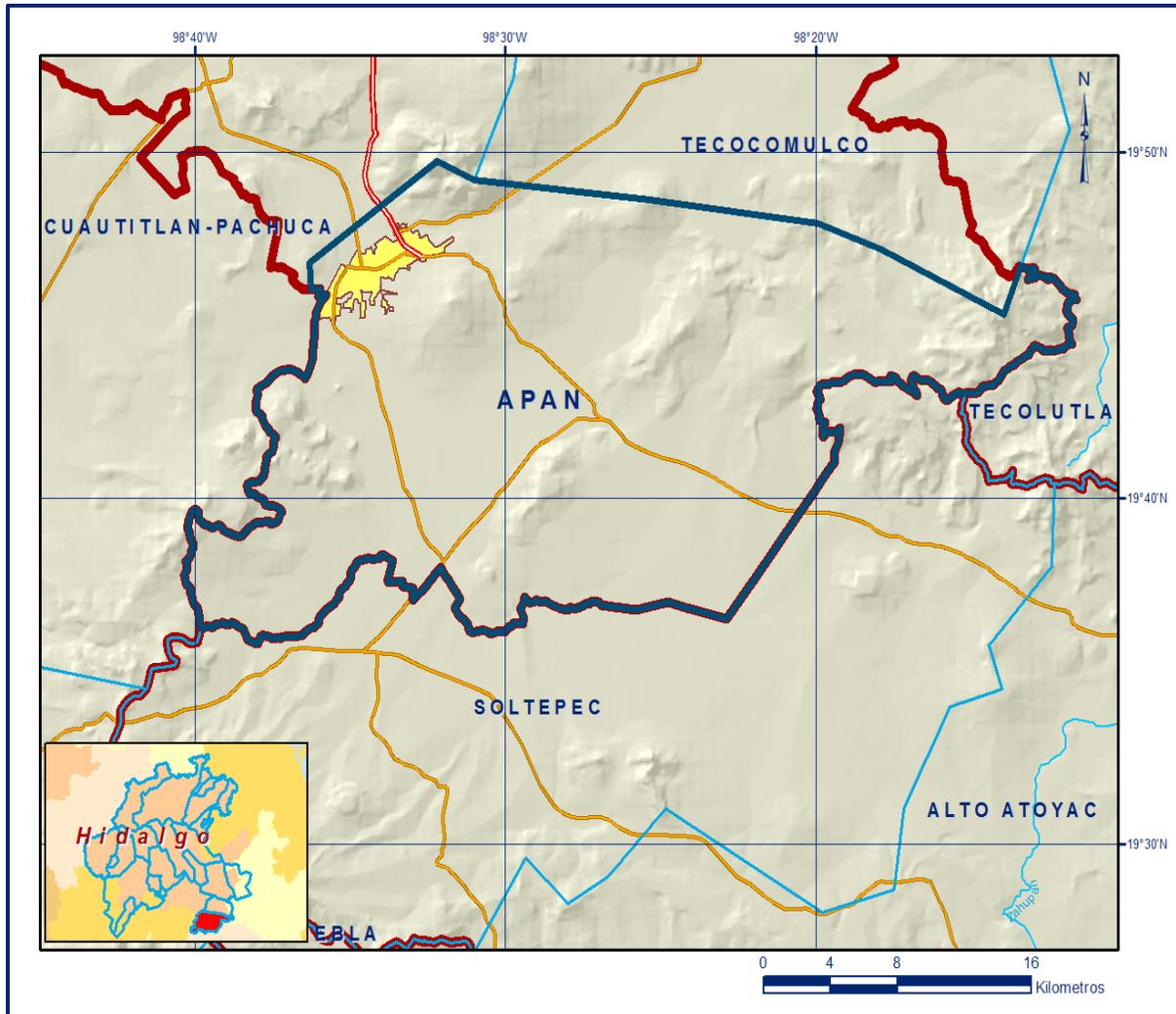


Figura 1. Localización del acuífero

Una pequeña porción de su extremo oriental, limita con el acuífero Tecolutla, perteneciente al Estado de Veracruz. Geopolíticamente comprende la totalidad del municipio Emiliano Zapata, la mayor parte de Apan, Almoloya y Tepeapulco, así como una pequeña porción del municipio Tlanalapa.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1 320 APAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	36	15.3	19	46	2.4	
2	98	36	19.7	19	46	48.8	
3	98	32	11.8	19	49	44.4	
4	98	31	1.2	19	49	12.2	
5	98	25	20.8	19	48	38.3	
6	98	19	55.3	19	47	57.6	
7	98	17	54.1	19	47	11.5	
8	98	13	55.6	19	45	19.4	
9	98	13	22.5	19	46	42.9	DEL 9 AL 10 POR EL LIMITE ESTATAL
10	98	15	17.5	19	43	0.5	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE ESTATAL
11	98	39	50.8	19	36	17.5	DEL 11 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	98	36	15.3	19	46	2.4	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Apan pertenece al Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Hidalgo. Su territorio completo se encuentra vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda cuyos límites dividen su territorio aproximadamente por la mitad. El primero de ellos rige en la porción occidental y 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 sólo se permite el alumbramiento de agua para uso doméstico y en la que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.

El segundo decreto rige en la porción oriental; es el *“Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las cuencas de las lagunas de Tochac y Tecocomulco, en los estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala”*, publicado en el DOF el 17 de junio de 1957. Esta veda se clasifica como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El principal uso es el público-urbano. En la superficie del acuífero no se localiza ningún distrito o unidad de riego, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de cobertura regional. Los únicos estudios que abarcaron la superficie completa del acuífero son los siguientes:

ACTUALIZACIÓN DE CONDICIONES PIEZOMÉTRICAS DEL VALLE DE ÁPAN, EN EL ESTADO DE HIDALGO, realizado por la Secretaría de Agricultura y Recurso Hídricos (SARH) en 1985. Este estudio tuvo como objetivo principal el monitoreo de los niveles del agua subterránea, para determinar su evolución y evitar la sobreexplotación del acuífero.

RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS: 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. para la Comisión Nacional del Agua en 1996. En este estudio se establece la red de monitoreo en los acuíferos Apan y Tecocomulco, constituida por 34 pozos piloto y se realizaron mediciones piezométricas para la elaboración de las correspondientes configuraciones del nivel estático.

LOS RECURSOS HIDRÁULICOS DEL ESTADO DE HIDALGO Y DIAGNÓSTICO SOBRE SU APROVECHAMIENTO, elaborado por Ariel Consultores, S. A. de C.V. para la Comisión Estatal del Agua del Estado de Hidalgo, en 1999. Recopila la información de hidrología superficial y subterránea de los principales acuíferos del estado, con el objeto de hacer un diagnóstico sobre su disponibilidad y aprovechamiento. Respecto al acuífero a Apan, menciona que no se observan conos de abatimiento que denoten sobreexplotación. Se indica que existe un flujo subterráneo con dirección general SE-NW, hacia el acuífero Cuautitlán-Pachuca. Establece que el acuífero muestra una recuperación anual de 0.1 m.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO ÁPAN, HIDALGO, elaborado por la empresa Lesser y Asociados S.A. de C.V. para la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo en 2007. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero y recabar información para calcular la recarga media anual y determinar su disponibilidad. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Este estudio fue 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

La superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Raisz, 1954), que equivale a la provincia que el Ing. Manuel Álvarez Jr. denominó como Zona de Fosas Tectónicas.

El Eje Neovolcánico se caracteriza por presentar una forma alargada que se extiende desde la región del Volcán Ceboruco, en el estado de Nayarit al poniente, hasta el Pico de Orizaba al oriente; está conformado por un gran número de estratovolcanes y conos cineríticos entre los cuales se han formado valles que han sido rellenados por depósitos volcánicos y lacustres. Entre ellos destacan los volcanes 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 a lo largo del paralelo 19°.

3.2 Clima

Con base en la clasificación de climas elaborada por W. Köppen, modificada por E. García para las condiciones de la República Mexicana, se determina que en la superficie del acuífero predominan los tipos de clima $C(w_1)(w)$ y $C(w_0)(w)$, templados subhúmedos con lluvias en verano y una precipitación invernal menor del 5%.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 7 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Presa Golondrinas, Presa Almoloya, Hueyotlipan, Mazapa, San Marcos, Zoquiapan y Benito Juárez.

Con estos datos, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **610 mm** y **14 °C** respectivamente. De igual manera se obtuvo un valor de evaporación potencial promedio de **1413 mm anuales**.

3.3 Hidrografía

El área del acuífero se ubica en la Región Hidrológica No. 26 "Pánuco", Subregión Hidrológica Cuenca del Valle de México, cuenca del Río Moctezuma. La Cuenca del Río Tula-Moctezuma-Pánuco es un sistema fluvial integrado por varios ríos y sus afluentes; nace en las cercanías del Distrito Federal y atraviesa varias entidades hasta desembocar en el Golfo de México entre los estados de Tamaulipas y Veracruz.

El río Tula nace en la Cuenca de México y recibe las aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, mediante las descargas del Túnel de Tequisquiác y el Tajo de Nochistongo, situación que lo convierte en uno de los más contaminados del país. En el estado de Hidalgo, esta corriente cambia su nombre por el de Moctezuma. Sobre su curso, en los límites de Hidalgo y Querétaro, se construyó la presa Zimapán para generar energía eléctrica. Esta corriente tiene una gran importancia para la Huasteca, donde sus aguas se emplean con fines agrícolas.

El Río Moctezuma es un río que representa la cuenca y zona lacustre más importante del país y parte importante de la vertiente oriental. El río forma parte del curso alto del Río Pánuco: la fuente más lejana del Moctezuma es el Río Tepeji o San Jerónimo, que nace en el cerro de La Bufa, en el estado de México, a una altura de unos 3,800 msnm; posteriormente se denomina Río Tula, hasta su confluencia con el Río San Juan, en donde recibe el nombre de Río Moctezuma. Finalmente, al confluir con el Río Tampacán, se conoce como Río Pánuco.

En general, el drenaje es incipiente, sólo se manifiesta con mayor claridad en las zonas de lomeríos que circundan a los valles y en éstos mismos, debido a que las rocas que conforman las primeras capas de las unidades fisiográficas están conformadas por tobas arcillosas de baja permeabilidad.

En las zonas de lomeríos se puede apreciar drenaje de tipo paralelo y de tipo radial, tanto convergente como divergente, en los aparatos volcánicos y en la periferia de las lagunas que se han formado en el centro de los valles endorreicos.

En las extensas planicies denominadas localmente “llanos”, ubicados al oeste de la población Apan, se encuentran algunos arroyos conectados por canales, como el denominado Canal Acopinalco, que auxilia a los escurrimientos superficiales que circulan, en general, de los alrededores de la población de Apan, hacia el oeste. Este canal continúa hacia el noroeste, pasando por Ciudad Sahagún, para conectar con el Río Tecocomulco, que continua en dirección oeste. Por otra parte, los “llanos” ubicados al sur de la población de Apan, presentan escurrimientos provenientes de las elevaciones topográficas del noreste, los cuales al llegar al valle son captados por una serie de canales (canales Mala Yerba y Atocha), que conducen sus aguas; estos escurrimientos desembocan en la laguna San Antonio de Atocha o Tochac. Posteriormente esta laguna descarga sus aguas a través de un arroyo que circula en dirección al sur.

3.4 Geomorfología

En la superficie que cubre el acuífero es posible observar dos etapas del ciclo geomorfológico; la primera indica una etapa de madurez y está representada por los valles intermontanos, donde se acumulan los depósitos de materiales volcánicos y aluviales.

La segunda indica una etapa de rejuvenecimiento, representada por las zonas montañosas y arroyos en forma de “v”; debido al incremento de las pendientes topográficas las corrientes superficiales son torrenciales que erosionan con gran intensidad a las rocas por las que atraviesan.

La presencia de un relieve conformado principalmente por montañas, barrancas y pequeñas llanuras, genera la existencia de microcuencas. Particularmente, el área que ocupa el acuífero se caracteriza por presentar dos valles principales, cuya continuidad es interrumpida por numerosos aparatos volcánicos en extinción y en etapa de erosión. Entre los más importantes destacan los cerros Santa Ana, El Águila, Tlazala, Tompeatillo, Chulco, El Tepozán, Tultengo y La Paila. Los valles denominados Tochac y Apan se encuentran a una elevación media de 2500 msnm, éste último es el más extenso e importante.

Hasta hace algunos años, la cuenca era endorreica, pero fue comunicada artificialmente en su extremo noroccidental con la Cuenca del Valle de México, hacia el acuífero Cuautitlán-Pachuca; de manera superficial descarga hacia la Laguna Tochac.

4 GEOLOGÍA

A nivel regional, las elevaciones topográficas consisten principalmente de derrames de lava basáltica y andesítica, así como depósitos piroclásticos. Predominan los afloramientos de rocas volcánicas de diferente composición: riolitas, andesitas, basaltos, tobas y brechas volcánicas; así como diversas asociaciones de ellas (figura 2). Existen además sedimentos lacustres y brechas sedimentarias.

Al estar ubicada en su totalidad dentro del Eje Neovolcánico, la geología ha sido moldeada por una actividad volcánica, la cual le ha dado al relieve un perfil característico.

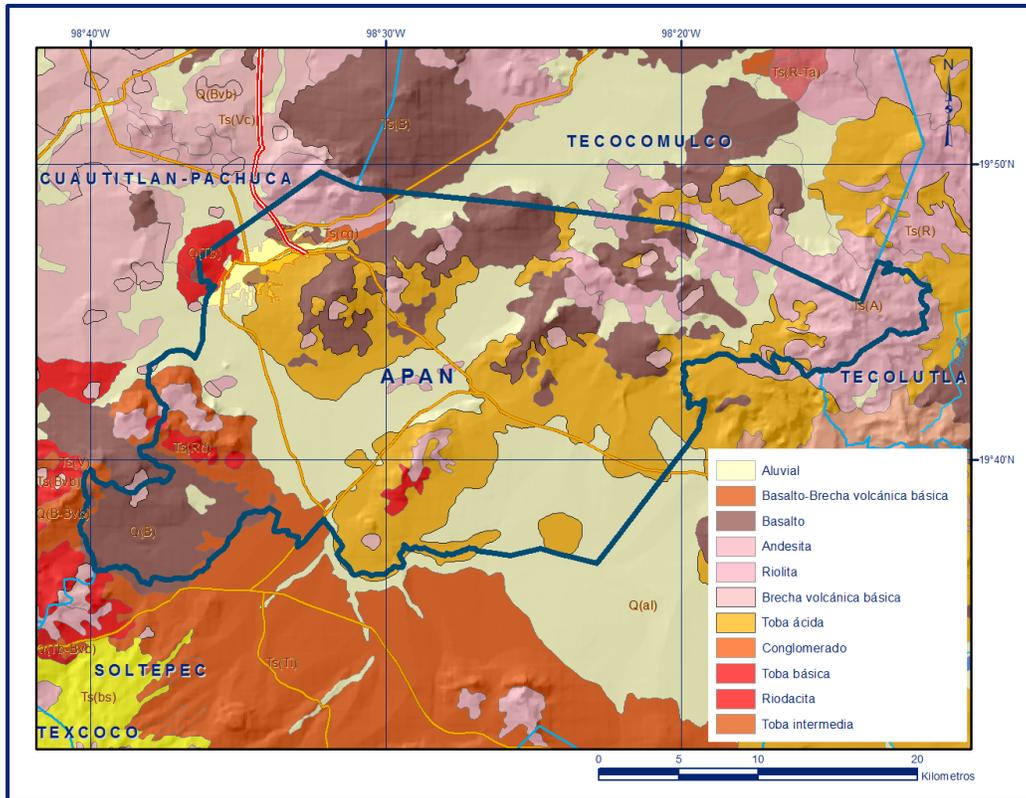


Figura 2. Geología general del acuífero

Es posible que estas rocas correspondan al Cenozoico Inferior ya que se encuentran cubiertas por derrames andesíticos y tobas intermedias del Cenozoico Superior (Mioceno). Las tobas ácidas, que afloran de manera aislada y restringida en la superficie del estado, pertenecen también al Cenozoico Superior (Plioceno). En este mismo periodo, los agentes de denudación fluviales y fluvio-glaciares iniciaron una actividad intensa que condujo a la nivelación de un relieve activo. Así se formaron grandes cuerpos de depósitos fluvio-glaciares (brechas sedimentarias) en las faldas de volcanes andesíticos.

El vulcanismo ocasionó condiciones endorreicas de la cuenca, permitiendo el depósito de materiales producto de la denudación en un medio lacustre. Posteriormente durante el Plioceno-Pleistoceno se presentó el doble fallamiento que provocó el fracturamiento que dio lugar a nuevas emisiones lávicas y cenizas de composición basáltica que formaron conos más recientes, así como tobas arenosas. En el Plioceno Superior las emisiones volcánicas disminuyeron y se depositaron tobas y abanicos aluviales; este fenómeno se presentó nuevamente durante el Cuaternario. Actualmente continúan acumulándose depósitos de origen aluvial y lacustre.

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigrafía de la región está constituida por rocas volcánicas cuya edad varía del Cenozoico Medio al Cuaternario. A continuación, se describen las unidades en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente:

Mioceno

Las dacitas son las rocas más antiguas que afloran en la zona, se presentan fracturadas y erosionadas. Afloran formando la Sierra de Apan. En la porción noroccidental afloran rocas volcánicas no diferenciadas de composición intermedia, que conforman elevaciones de aspecto complejo. Esta Unidad cubre de manera discordante a las dacitas y de la misma manera subyacen a las rocas más jóvenes. Presentan también un grado alto de fracturamiento. A esta misma edad pertenecen las andesitas y dacitas que constituyen la Sierra del Tepozán, ubicada al este del acuífero, sobre la cual se localiza el parteaguas que divide la Cuenca del Valle de México de la cuenca de Puebla. Presentan fracturamiento que en ocasiones está relleno de arcillas.

Plioceno

Formación Tarango

Representada por una alternancia de arenas tobáceas, capas de pómez y lentes de basalto, que descansan discordantemente sobre las rocas del Mioceno; su contacto superior es transicional con los depósitos aluviales. Del Plioceno son también los basaltos, andesitas y lavas basálticas que afloran al occidente, en las inmediaciones del poblado Santa Clara. Estas rocas forman sierras de poca elevación en las que se pueden observar conos cineríticos bien conservados, así como los cerros Tlazala y San Nicolás.

Cuaternario

Pleistoceno

A esta unidad corresponde la mayor superficie de afloramiento. Son producto del intenso vulcanismo del Cuaternario, representado por basaltos y andesitas que conforman conos y domos volcánicos bien conservados. Localmente, los basaltos cubren las mayores superficies de manera discordante sobre las unidades más antiguas. Son de color negro, fracturados y porosos, en ocasiones presentan intercalaciones de pómez. La gran cantidad de conos es la principal característica de la zona en donde afloran estas rocas.

Al sur del acuífero se ubican afloramientos de basaltos de fenocristales, que pertenecen a la Formación Chichinautzin. Son de color negro, muy fracturados y porosos; presentan grandes cristales de olivino y cubren de manera discordante a los depósitos de la Formación Tarango.

Reciente

Depósitos aluviales

Rellenan los valles y las zonas topográficamente más bajas de las sierras; consisten de materiales diferente granulometría; arcillas, arenas y gravas, su espesor es variable e incluye depósitos de sedimentos lacustres.

4.2 Geología estructural

El marco estructural está representado por las estructuras volcánicas. Generalmente la orientación de los principales conjuntos de volcanes es WSW-ENE, ocasionada por los eventos volcánicos ocurridos en los últimos 5 millones de años en los que se han formado estructuras con una orientación W-E, que dieron origen a un sistema de bloques con fosas que presenta un escalonamiento al oeste de la región, es decir hacia el centro de la Cuenca del Valle de México.

Los conos se orientan a lo largo de estos lineamientos formando sierras cuyos fallamientos y fracturamientos definen dos sistemas: SE-NW y SW-NE. Los valles principales corresponden a las fosas o depresiones formadas durante los procesos de fallamiento, que han sido rellenados por depósitos volcánicos y lacustres.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, que constituyen los cauces de los arroyos y los valles, los cuales pueden tener algunos cientos de metros de espesor hacia el centro. Esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas volcánicas, principalmente basaltos, tobas y andesitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento hidrogeológico del acuífero están representadas por las mismas rocas volcánicas al desaparecer el fracturamiento a profundidad. La alternancia de rocas que no presentan fracturamiento con depósitos aluviales, forman acuíferos locales independientes.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, estructurales, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un **acuífero tipo libre** heterogéneo y anisótropo, con presencia de **condiciones de semiconfinamiento** debido a la presencia de depósitos de arcillas; constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, que conforman los cauces de los arroyos y los valles, cuyo espesor puede alcanzar algunos cientos de metros. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas extrusivas, integrada por derrames volcánicos, principalmente basaltos, tobas y andesitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, que en superficie funcionan como zonas de recarga.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2007, se ejecutaron 25 pruebas de bombeo de larga duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizó el método de Hantush.

Los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales indican que los valores de transmisividad varían entre **0.1 y 51.4 x10⁻³ m²/s**, predominando los valores de **0.1 a 6.0 x 10⁻³ m²/s**. Considerando un espesor saturado de 100 m, los valores promedio de conductividad hidráulica varían de **1.0 x10⁻⁵ y 6.0x10⁻⁴ m/s**, que en general se asocian a sedimentos de granulometría fina. Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, por correlación con acuíferos vecinos que tienen la misma constitución geológica, para fines del balance se adoptó un valor de **0.07**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información correspondiente a los años 1996 y 2007.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático en el 2007 muestra que los niveles estáticos varían, de manera general, de 40 a 110 m, incrementándose por efecto de la topografía desde el centro de los valles de Ápan y Tochac hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan.

Las profundidades más someras, de 40 a 60 m, se presentan al oeste de Ápan, en la porción central de este valle y al este de la Laguna de Tochac; en tanto que las mayores se registran hacia las sierras que delimitan el acuífero y en la porción noroccidental, en las inmediaciones del poblado Tepeapulco, hacia el límite con el acuífero Cuautitlán-Pachuca (figura 3).

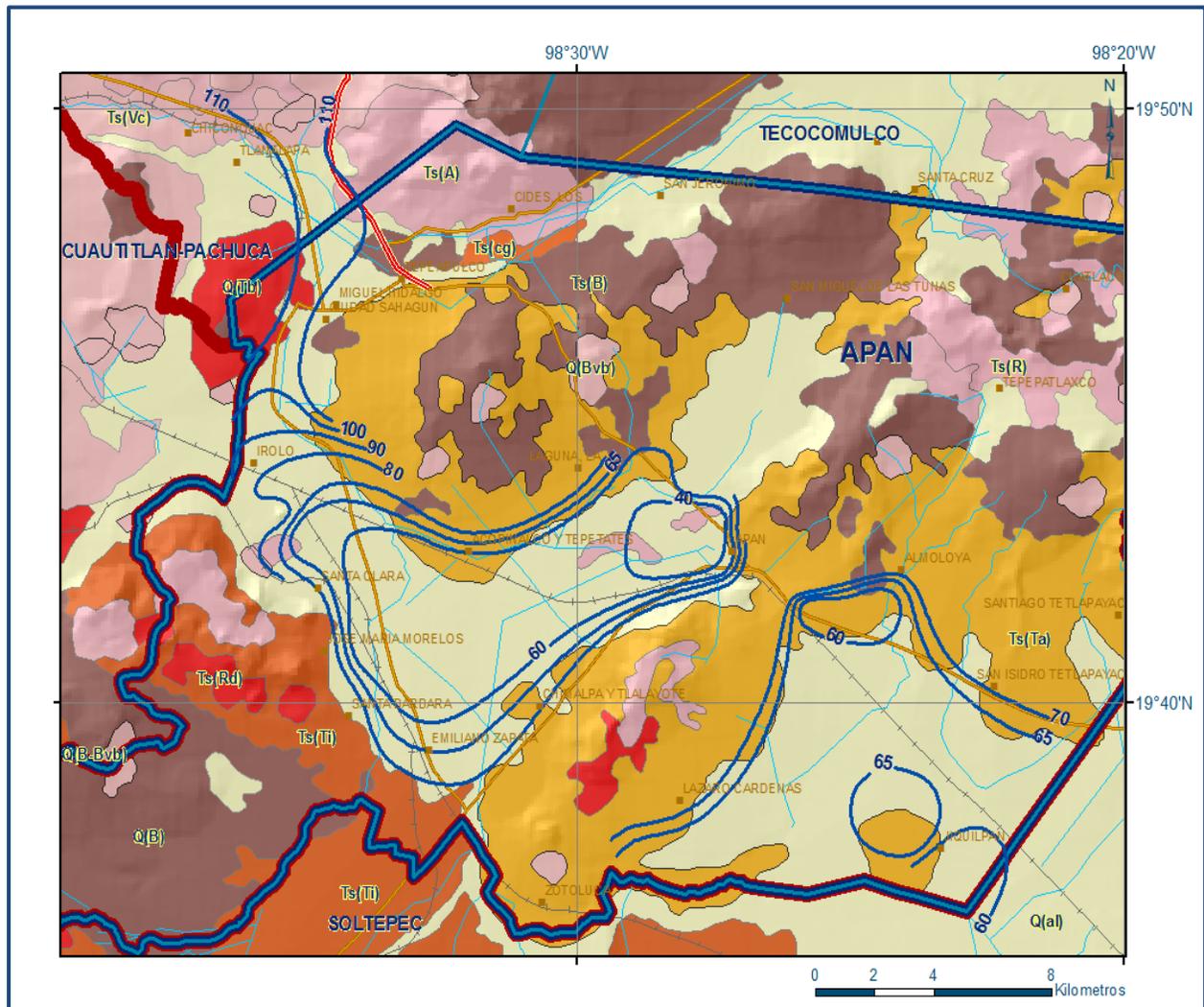


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2007)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático en el periodo 1996-2007, se observa que sólo se registran valores de abatimiento entre 1.0 y 2.0 m al suroeste de Emiliano Zapata, norte de Apan y en las inmediaciones de Almoloya (figura 5), lo que representa un ritmo promedio anual de abatimiento de 0.15 m.

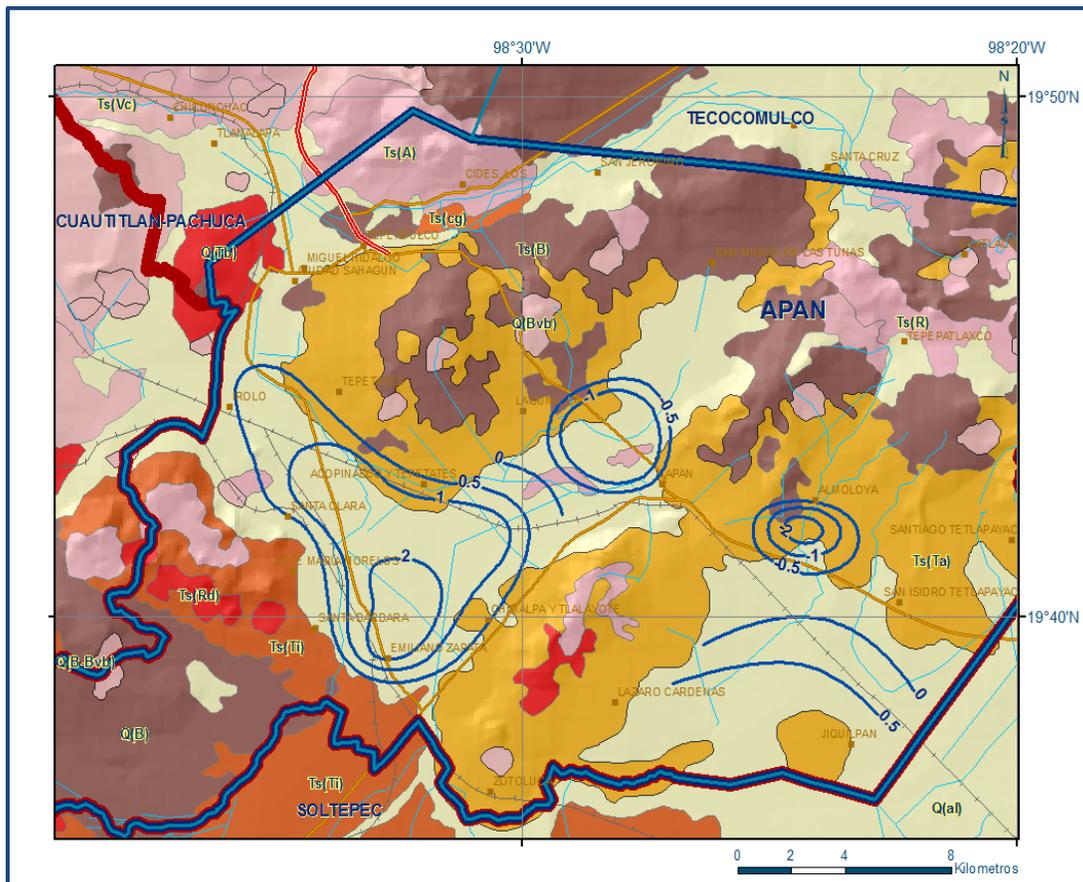


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (1996-2007)

La mayor parte de la superficie del acuífero presenta recuperaciones en la posición de los niveles del agua. De manera general, se puede establecer que los abatimientos son puntuales y casi imperceptibles. Hacia las zonas de recarga se registran recuperaciones promedio de 0.3 m anuales.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2007, se obtuvieron 22 muestras de agua para su análisis fisicoquímico correspondiente y se realizaron las mediciones en campo de pH, temperatura y conductividad eléctrica, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación.

Las determinaciones incluyeron temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, iones mayoritarios, fosfatos, dureza de calcio, dureza total, flúor y metales traza.

De acuerdo con la concentración de sólidos totales disueltos (STD), se registran valores que varían de 300 a 400 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido en la 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 caso de las determinaciones de los metales, en la mayoría de ellos no fueron detectables y en otros su concentración es muy baja. En lo que respecta a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 300 a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predominan las familias mixta-bicarbonatada y sódica-bicarbonatada, en ambos casos se considera que representan agua de reciente infiltración, la diferencia entre ellas es que la primera indica un medio de menor grado de disolución de las rocas volcánicas.

En general, los valores de pH se encuentran entre los límites máximos permisible que marca la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano, ya que registran valores de 6.3 a 7.6, que representan agua neutra.

Los valores de temperatura registrados varían 17.5 a 25.5 °C. Por otra parte, 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 como de salinidad baja (C_1) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), que es apropiada para su uso en riego sin restricciones.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2007, se registraron un total de 58 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 51 son pozos, 4 norias y 3 manantiales; sólo 6 pozos se encontraron inactivos durante la realización del censo.

El volumen total de extracción estimado es de **14.8 hm³/año**, de los cuales 12.1 hm³/año (81.8%) se destinan al uso público-urbano, 1.1 hm³/año (7.4 %) es utilizado para uso agrícola, 0.5 hm³/año (3.4%) para uso doméstico y 1.1 hm³/año (7.4%) para usos múltiples. La descarga a través de los manantiales es muy baja y se considera despreciable para fines del balance.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 1996-2007, en **280 km²** de superficie del acuífero, 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 la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita sobre los depósitos aluviales que conforman los valles, así como por la infiltración que se produce a lo largo de los escurrimientos superficiales (Rv); y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de recarga por flujo horizontal subterráneo (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 las parcelas; de las fugas en los sistemas de agua potable y en la red de alcantarillado, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Debido a que el volumen destinado al uso agrícola es incipiente, a que las poblaciones son pequeñas y dispersas y a la baja permeabilidad del suelo, para el propósito del balance se considera nula la recarga inducida.

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 (ΔV) así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

Rv	= Recarga vertical;
Eh	= Entradas por flujo horizontal subterráneo;
B	= Bombeo;
Sh	= Salidas por flujo horizontal subterráneo;
$\Delta V(S)$	= Cambio en el volumen almacenado;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = Sh + B \pm \Delta V(S) - Eh \quad (2)$$

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 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 el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático en el año 2007 (figura 4).

Con base en esta configuración, 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:

$$Q = B * i * T$$

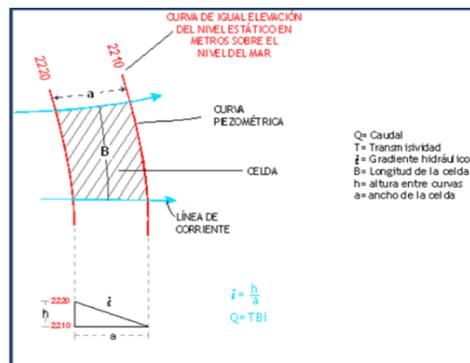
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

T = Transmisividad (m^2/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total del flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **28.0 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas en el 2007, adaptadas al espesor saturado de cada zona.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal (2007)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E1	3470	450	5	0.0111	0.0010	0.0386	1.2
E2	3620	450	5	0.0111	0.0010	0.0402	1.3
E3	2265	380	5	0.0132	0.0010	0.0298	0.9
E4	3470	450	10	0.0222	0.0010	0.0771	2.4
E5	2715	450	5	0.0111	0.0010	0.0302	1.0
E6	3020	380	5	0.0132	0.0010	0.0397	1.3
E7	3020	450	10	0.0222	0.0015	0.1007	3.2
E8	1510	380	10	0.0263	0.0015	0.0596	1.9
E9	2715	530	10	0.0189	0.0002	0.0102	0.3
E10	3620	680	10	0.0147	0.0004	0.0213	0.7
E11	2265	600	10	0.0167	0.0010	0.0378	1.2
E12	4075	1210	10	0.0083	0.0010	0.0337	1.1
E13	4225	600	10	0.0167	0.0010	0.0704	2.2
E14	3925	380	10	0.0263	0.0010	0.1033	3.3
E15	2265	570	10	0.0175	0.0002	0.0079	0.3
E16	3020	600	10	0.0167	0.0005	0.0252	0.8
E17	2265	450	10	0.0222	0.0005	0.0252	0.8
E18	1960	450	10	0.0222	0.0002	0.0087	0.3
E19	1055	600	10	0.0167	0.0002	0.0035	0.1
E20	2265	450	10	0.0222	0.0003	0.0151	0.5
E21	3320	450	10	0.0222	0.0003	0.0221	0.7
E22	4225	380	10	0.0263	0.0003	0.0334	1.1
E23	3620	450	10	0.0222	0.0003	0.0241	0.8
E24	3470	490	10	0.0204	0.0002	0.0142	0.4
E25	1960	450	10	0.0222	0.0002	0.0087	0.3
E26	1960	600	10	0.0167	0.0002	0.0065	0.2
Total entradas							28.0

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero ocurren por las salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) y mediante el bombeo (B). No existen descargas por flujo base, ni evapotranspiración; como se mencionó anteriormente, el volumen de descarga a través de manantiales es despreciable.

7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas por flujo subterráneo se calcularon de la misma manera que las entradas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático (figura 4).

El cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que su valor total es de **5.7 hm³** anuales, que tienden a descargar hacia el acuífero vecino Cuautitlán-Pachuca.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2007)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i (m)	T m ² /s	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	1960	460	10	0.0217	0.0015	0.0639	2.0
S2	1660	530	10	0.0189	0.0015	0.0470	1.5
S3	2415	530	10	0.0189	0.0015	0.0683	2.2
						Total salidas	5.7

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor estimado de la extracción por bombeo es del orden de **14.8 hm³/año**.

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

De acuerdo con la configuración de la evolución del nivel estático, sólo se registran abatimientos puntuales del nivel estático y la configuración de elevación no muestra alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento causados por la concentración del bombeo y/o de aprovechamientos. En la mayor parte de la zona de explotación se registran recuperaciones en la posición del nivel del agua subterránea. Para la evaluación del cambio de almacenamiento se consideró un valor de recuperación de 0.5 m anuales en el área de balance de 280 km² y un coeficiente de almacenamiento de 0.07 (propuesto en el estudio realizado en el 2007).

De esta manera $\Delta V(S) = 0.5 \text{ m} (280 \text{ km}^2) (0.07) = 9.8 \text{ hm}^3$. Por lo tanto, **$\Delta V(S) = 9.8 \text{ hm}^3$ anuales.**

Solución a la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= S_h + B \pm \Delta V(S) - E_h \\ R_v &= 5.7 + 14.8 + 9.8 - 28.0 \\ R_v &= 2.3 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h \\ R &= 28.0 + 2.3 \\ R &= 30.3 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS} \quad \mathbf{(3)}$$

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua subterránea del 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 (R), corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para el caso del acuífero Ápan, su valor es de **$30.3 \text{ hm}^3/\text{año}$.**

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 están comprometidos 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 Ápan no existe descarga natural comprometida.

El volumen de la salida por flujo subterráneo que tiende a descargar hacia el acuífero vecino Cuautitlán-Pachuca, no se considera comprometido porque no existe infraestructura para su aprovechamiento aguas abajo del límite entre los acuíferos. Por lo tanto, **DNC = 0.0 hm³**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **27,543,609 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, de acuerdo con la expresión 3, 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:

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 30.3 - 0.0 - 27.543609 \\ \text{DMA} &= 2.756391 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **2,756,391 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1985. Actualización de Condiciones Piezométricas del Valle de Apan, en el Estado de Hidalgo.