



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO POLOTITLÁN (1503), ESTADO DE  
MÉXICO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación Administrativa del acuífero .....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>5</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>6</b>
3.1 Provincia Fisiográfica .....	6
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía .....	8
3.4 Geomorfología.....	9
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>10</b>
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural .....	14
4.3 Geología del subsuelo .....	15
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>16</b>
5.1 Tipo de acuífero .....	16
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
5.3 Piezometría .....	17
5.4 Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1 Profundidad al nivel estático .....	17
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3 Evolución del nivel estático .....	20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>	<b>21</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>22</b>
7.1 Entradas.....	23
7.1.1 Recarga vertical (Rv) .....	23
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	24
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	25
7.2 Salidas.....	26
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	26
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	26
7.2.3 Descarga de manantiales (Dm) .....	27
7.2.4 Evapotranspiración (ETR).....	27
7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ).....	28
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>29</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	30
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) .....	31
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>32</b>

## **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 Polotitlán, definido con clave 1503 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de México, en el límite con los estados de Querétaro e Hidalgo, entre los paralelos 19° 48' y 20° 17' de latitud norte y los meridianos 99° 35' y 100° 05' de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 1,323 km<sup>2</sup> (figura 1).

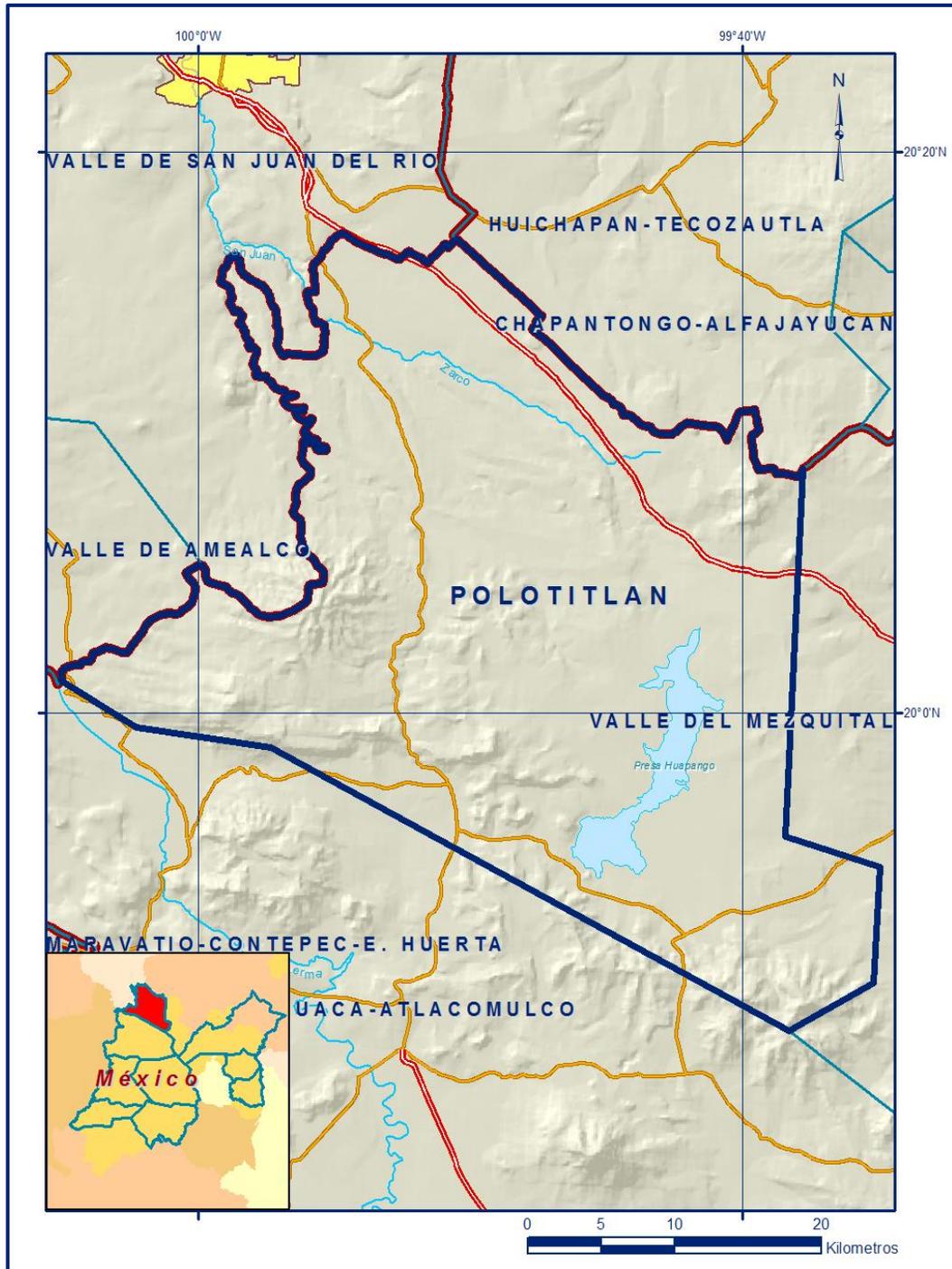


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1503 POLOTITLAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	5	2.2	20	1	8.9	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	99	50	31.2	20	16	53.4	
3	99	37	46.1	20	8	41.0	
4	99	38	25.8	19	55	36.1	
5	99	34	57.4	19	54	30.1	
6	99	35	11.0	19	50	22.8	
7	99	38	18.1	19	48	40.5	
8	99	57	21.0	19	58	46.9	
9	100	2	17.8	19	59	29.3	
1	100	5	2.2	20	1	8.9	

Limita al norte con los acuíferos Huichapan-Tecozautla y Valle de San Juan del Río, pertenecientes a los estados de Hidalgo y Querétaro, respectivamente; al este con Valle del Mezquital del estado de Hidalgo; al sur con Ixtlahuaca-Atzacmulco del estado de México, y al oeste con los acuíferos Valle de San Juan del Río y Valle de Amealco, pertenecientes al estado del Querétaro.

Geopolíticamente, abarca totalmente los municipios Polotitlán y Aculco, la mayor parte de Jilotepec y Acambay, así como porciones menores Timilpan, Chapa de Mota, Morelos y Temascalcingo.

## 1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Polotitlán pertenece al Organismo de Cuenca XIII “Aguas del Valle de México”, al Consejo de Cuenca “Río Pánuco” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de México. Su territorio completo se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos del Estado de México”, que no quedaron en las vedas impuestas mediante Decretos Presidenciales de 7 de diciembre de 1949, 21 de julio de 1954, 10 de agosto de 1965 y 14 abril de 1975 y Acuerdo Presidencial de 11 de julio de 1970”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 10 de julio de 1978; esta veda se clasifica como tipo II en las 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 1.

El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. En la porción norte de su territorio se localiza el Distrito de Riego 096 “Arroyo Zarco”; a la fecha no se ha instalado el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos y de otros tipos, algunos de cobertura regional. A continuación, se mencionan los estudios más recientes e importantes:

**SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA POLOTITLÁN-TECOZAUTLA, ESTADO DE MÉXICO, realizado por GEOPESA,** para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en 1979.

Aunque los resultados del proyecto fueron limitados, aportaron una primera caracterización de la geología y de las condiciones hidrodinámicas de las unidades hidrogeológicas que constituyen el sistema acuífero.

**ESTUDIO PARA EL DIAGNÓSTICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA, PARA IMPLEMENTAR LA REGLAMENTACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V. en 1992, para la Comisión Nacional del Agua.** Amplía el estudio realizado en 1987 por la misma empresa y su objetivo principal fue determinar las condiciones geohidrológicas del acuífero, implementar un modelo matemático simplificado y plantear alternativas de aprovechamiento de agua en zonas conflictivas. Sus resultados muestran un contexto muy completo de la hidrología subterránea, mediante la aplicación del modelo PLASM, derivado de Prickquett y Lonquist, analiza distintas alternativas de reordenación y manejo, que teóricamente permiten recuperaciones piezométricas en el área urbana de Toluca y la zona industrial.

**EXPLORACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN EL VALLE DE AMEALCO Y SAN JUAN DEL RÍO. Realizado para la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro por Geofísica de Exploraciones GUYSA, S.A. de C.V. en 2003.** Su objetivo principal fue analizar la posible comunicación entre los valles de Amealco y San Juan del Río. Mediante la ejecución de 15 sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM) establece que la disposición de las rocas volcánicas en esta zona limítrofe determina que no existe continuidad hidráulica entre los valles mencionados.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO POLOTITLÁN, EN EL ESTADO DE MÉXICO. Realizado en 2013 por la Universidad Autónoma del Estado de México para la Comisión**

**Nacional del Agua.** El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. 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, toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Este trabajo 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**

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se encuentra ubicada totalmente en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en territorio del Eje Neovolcánico, la mayor parte en la Subprovincia Llanuras y Sierra de Querétaro e Hidalgo y la porción sur en la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac.

El Eje Neovolcánico comprende parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y Veracruz, así como todo el estado de Tlaxcala y el Distrito Federal. Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Cenozoico hasta el presente. 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 los volcanes de Colima, Tancítaro, Zináltécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (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 Llanuras y Sierra de Querétaro e Hidalgo se distingue por la edificación de grandes espesores lávicos y piroclásticos característicos del Eje Neovolcánico y la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se caracteriza por estar conformada de

montañas plegadas con orientación casi norte-sur, construidas de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas a partir de antiguas cuencas lacustres, donde aparecen elevaciones aisladas.

### **3.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor superficie del acuífero prevalece el clima templado subhúmedo C(w1) y C(w2) que se torna semifrío subhúmedo Cb'(w2) hacia la región de mayor elevación topográfica, localizada en la porción occidental del acuífero.

El clima dominante es el de menor precipitación de la categoría de los templados, con verano largo y un porcentaje de lluvia invernal menor de 5.

El clima semifrío subhúmedo no presenta una estación invernal bien definida. La precipitación media anual varía de 600 a 1000 mm, que disminuye a 750 hacia el municipio de Jilotepec, en tanto que la temperatura promedio fluctúa entre 14 y 16 °C, con valores extremos de 27 y 5 °C.

La temporada de lluvias se presenta de mayo a septiembre, en la que los meses más lluviosos son julio, agosto y septiembre.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 24 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero, 21 ubicadas en territorio del Estado de México: Acambay, Aculco (SMN), Presa Danxho, Polotitlán, Presa El Tigre, San Andrés Timilpan, Aculco (DGE), Tultepec, Presa El Molina, Presa Huapango, La Concepción, Presa San Ildefonso, Taxhie, San Juan Acazuchitlán, San Antonio Trojes, Presa Juanacatlán, Muyeje, San Lucas Totolmaloya, El Jazmín, Presa Ñadó y Pozo Ocho; dos en el Estado de Querétaro: San Pablo y Presa El Capulín y 1 en el Estado de Michoacán: Temascalas. Con los registros obtenidos para el periodo 1999-2007 y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anual de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **720 mm, 14.5 °C y 1,655 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 noviembre a enero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 26 “Río Pánuco”, Subregión Hidrológica San Juan Querétaro, en la cuenca del Río Moctezuma, subcuenca del Río San Juan, la cual constituye, junto con las cuencas del Río Tula y Metztitlán, la región del Alto Río Pánuco que colinda al norte con la cuenca del Río Extórax, afluente izquierdo del Río Moctezuma, al oriente limita con la cuenca del Río Tula, al sur y oeste con la cuenca del Río Lerma, de la Región Hidrológica No. 12.

El origen de la corriente del río San Juan tiene lugar en el estado de México, con el nombre de Arroyo Zarco, iniciándose en la parte más extrema al sur de la zona, a 2.5 km al oeste de la población de San Andrés Timilpan; los escurrimientos que le dan origen forman pequeños almacenamientos como las presas San Lucas, Huaracha, Cerro Palos y San Juanico; esta última se localiza sobre el cauce del Arroyo Zarco. Aguas debajo de ella se localiza el embalse de la presa Huapango.

El efluente que se origina en esta presa escurre en dirección noroeste, llegando aguas abajo a la cortina de la presa San Antonio, y posteriormente, en la misma dirección aguas abajo se encuentra la presa El Molino. Posteriormente, la corriente superficial recibe aportaciones de menor importancia por ambas márgenes hasta internarse al Estado de Querétaro y constituir el Río Blanco, el cual confluye en el Río San Juan fuera de los límites del acuífero.

Otra red de escurrimientos se localiza en la porción occidental del acuífero y está representada por el Río Prieto, el cual tiene su origen en el cerro Peña Larga, localizado al norte de Acambay, con el nombre de arroyo Ñadó, cuyos aportes sumados con otros escurrimientos confluyen en la presa Ñadó. El Río Prieto recibe por su margen derecha los aportes del Río Aculco, que posteriormente descarga sus aguas en la presa San Ildefonso, cuyo curso confluye en el Río San Juan en la intersección con el Río Blanco.

En resumen, el sistema hidrográfico de la cuenca del acuífero Polotitlán está constituido por dos sistemas hidrográficos, que definen la subcuenca del Río San Juan. La infraestructura hidráulica del acuífero consta de varias pequeñas presas, entre las que destacan El Molino, San Antonio Chapala, Taxhingú, Los Ailes, La Cofradía, Los Cerritos, La Nueva, Ñadó, San Ildefonso y Huapango; así como una gran cantidad de bordos y algunos acueductos que conducen agua de manantiales para uso doméstico.

### **3.4 Geomorfología**

Las distintas formas de relieve en el área son reflejo y consecuencia de la historia geológica de la región. En este sector del Eje Neovolcánico, la acción de los agentes erosivos, que incluyen procesos magmáticos, tectónicos, erosivos y de relleno, han definido las variaciones del relieve.

Estos eventos dieron origen a la formación de cuencas endorreicas rellenas de materiales piroclásticos y lacustres con cenizas volcánicas, además de facturas y fallas. A nivel local, se presentan afloramientos de rocas andesíticas, basaltos, piroclásticos, lahares y materiales aluviales, de edades que varían del Cenozoico al Cuaternario.

En función de sus rasgos geomorfológicos, la región norte del acuífero presenta montañas volcánicas distribuidas en la zona, que constituyen las principales formas de relieve, formadas por una serie de aparatos volcánicos asociados con derrames de composición intermedia y ácida principalmente. La región norte del área está representada por una planicie piroclástica de composición riolítica, con disecciones en forma de “U” y “V”; en la que se localizan dispersos aparatos volcánicos de composición básica y una pequeña meseta lávica; toda esta región presenta etapa geomorfológica de juventud.

La porción oriental está representada por volcanes dómicos de composición básica y andesítica, que también presentan derrames basálticos, formando geoformas de lomeríos y mesetas erosionadas, originando cañadas poco profundas; su estado geomorfológico corresponde a una etapa de madurez. Al sur y norte del área se encuentra una serie de lomeríos y una planicie formada por tobas y sedimentos lacustres, con escaso drenaje. Su estado geomorfológico corresponde al de juventud.

En la porción suroccidental se observan algunas fallas que se originaron en una depresión estructural formada por una secuencia de tobas, sedimentos lacustres y suelos aluviales. Su estado geomorfológico se encuentra en la etapa de juventud. La porción sur del acuífero se caracteriza por una cadena montañosa que forma parte de la Sierra de San Andrés Timilpan, donde se posicionan antiguos conos volcánicos constituidos por derrames de lavas y materiales piroclásticos basálticos, que están en etapa geomorfológica de juventud.

En el sector Polotitlán-Tula destacan importantes elevaciones que constituyen aparatos volcánicos con derrames asociados de composición mixta, entre ellas destacan los

volcanes Bonxhi (2,700 msnm), El Comal (2,650 msnm) y Santa Rosa (2,550 msnm).

En la misma región existen elevaciones topográficas de importancia, constituidas por productos andesíticos principalmente, sobresaliendo entre otros los cerros Pelón (3,300 msnm), El Gallo (3,000 msnm), El Rosal (3,000 msnm), Grande (2,750 msnm) y Las Cabras (2,500 msnm). Finalmente, hacia la región de San Juan del Río, existen extensas llanuras del tipo construccional, entre las que destaca el valle de Polotitlán.

#### **4. GEOLOGÍA**

La geología de la zona está representada por rocas ígneas extrusivas de composición ácida e intermedia que afloran en las sierras de topografía abrupta, mientras que en los valles y pie de monte existen rocas sedimentarias y depósitos de origen aluvial (figura 2).

Las rocas más antiguas corresponden a la secuencia volcánica constituida por rocas riolíticas y derrames de andesita cuya edad se ha asignado al Oligoceno-Mioceno por su posición estratigráfica. Las secuencias volcánicas forman parte de la cubierta del Eje Neovolcánico.

La actividad ígnea del Oligoceno-Mioceno produjo derrames volcánicos de composición félsica constituidos por riolitas de estructura fluidal y textura porfídica, así como tobas líticas y piroclásticos riolíticos. El vulcanismo máfico-intermedio inicia con el emplazamiento de rocas andesíticas, así como con derrames de andesita-basalto con textura afanítica, que puede variar a porfídica y vesicular, expuestos como oleadas de delgados flujos bien definidos, cubiertos a su vez por depósitos de tobas andesíticas que se erosionan fácilmente, originando afloramientos irregulares.

En el Mioceno Tardío la actividad volcánica persiste y ocurre la emisión de ignimbritas medianamente soldadas y estructura tabular de dacitas-andesitas de color negro a café oscuro, marrón y naranja ocre, con abundantes líticos de roca de composición máfica a intermedia.

En el Plioceno Temprano continúa la actividad volcánica explosiva representada por la formación y evolución de las calderas de Amealco y Huichapan, que expulsaron grandes volúmenes de ignimbritas de composición andesítica y riolítica, respectivamente. Consideradas por diferentes autores como vulcanismo post-caldera, se identificaron rocas de composición máfica e intermedia que cubren discordantemente a paquetes ignimbriticos y depósitos de tefra, conformadas por andesitas y basaltos-andesitas del

Plioceno Tardío.

En el Cuaternario, los productos piroclásticos son predominantemente de composición félsica, contemporáneos a depósitos lacustres, que cubren de forma indistinta a las unidades de rocas preexistentes. Los delgados y aislados remanentes de arenas, limos y gravas, tienen un espesor muy pequeño y de escasa extensión que no son cartografiables a esta escala (Carta Geológico-Minera San Juan del Río F14-C77. SGM, 2012. Escala 1:50,000).

#### 4.1 Estratigrafía

En la región afloran rocas cuya edad varía de Cenozoico Superior al Reciente y corresponden, en orden de abundancia, a las rocas ácidas, seguidas de las intermedias, básicas y depósitos vulcanosedimentarios. A continuación, se describen las unidades geológicas de la más antigua a la más reciente, cuya distribución geográfica se observa en la figura 2.

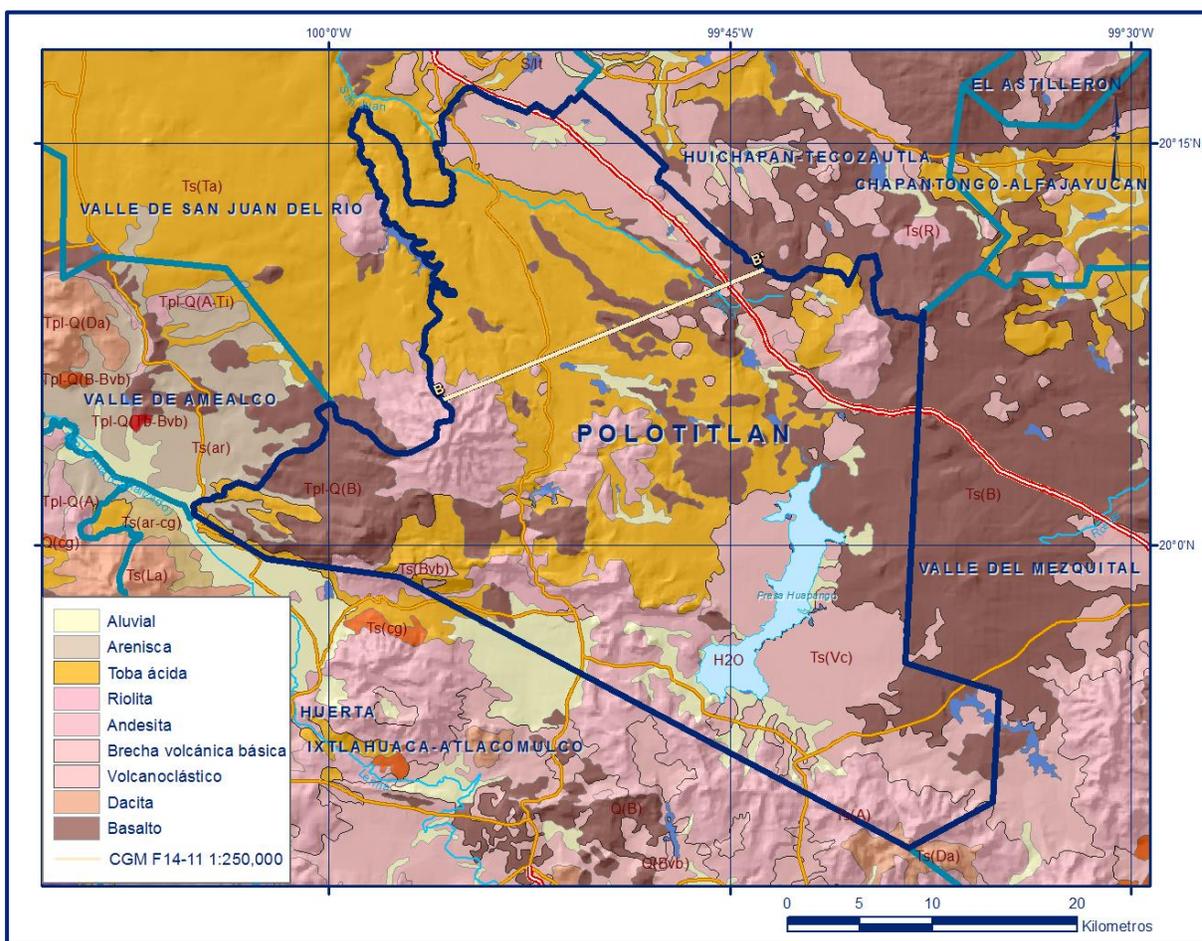


Figura 2. Geología general del acuífero

## **CENOZOICO**

### **Grupo Pachuca**

El nombre fue propuesto por Segerstrom en 1961 para referirse a rocas volcánicas, cuya composición varía de basalto a riolita, que sobreyacen en discordancia erosional al Grupo El Morro y en algunos lugares en discordancia angular. 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, subyaciendo a corrientes de riolita.

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 discordancias erosionales dentro del grupo, son de tal magnitud que una de las formaciones más recientes puede descansar directamente sobre una de las más antiguas.

En el área del acuífero Polotitlán afloran las siguientes unidades litológicas de este Grupo, cuya base de la secuencia tiene su origen en la región de Pachuca.

### **Andesitas**

Rocas de texturas afanítica a porfídica que se emitieron a partir de fracturas cuyos flujos formaron una serie de estratovolcanes y volcanes dómicos, con derrames masivos; las rocas sufrieron posteriormente fracturamiento y fallamiento normal cuyas direcciones preferenciales son noroeste-sureste y noreste-suroeste. Estratigráficamente subyace a riolita-toba riolítica, toba dacítica y suelos residuales, indistintamente. Aflora al noroeste y sur de Acambay, al oriente y occidente de Temascalcingo y al oriente de Arroyo Zarco.

### **Basaltos**

Su origen es similar al de las andesitas, es decir, a partir de reactivación de fallas antiguas a través de las cuales se expulsó el material volcánico que formó una serie de estratovolcanes, volcanes dómicos y derrames; estos últimos tiene una expresión morfológica de lomeríos y mesetas erosionadas.

La unidad presenta estructuras masivas en bloques, con fracturamiento moderado y fallas normales. Presentan textura afanítica y ocasionalmente porfídica; subyace a las unidades riolita-toba riolítica, toba ácida y suelos residuales indistintamente. Aflora al norte y noroeste de Acambay, al norte y sur de Juando y en la porción noroccidental del acuífero área.

### **Tobas Riolíticas**

Está constituida por una toba riolítica de color café rojiza a blanco rosado, que petrográficamente se clasifica como ignimbrita, aunque también presenta variaciones a toba pumicítica y arenosa, de composición riolítica y dacítica. Presentan estructuras masivas de comportamiento columnar, cuyo espesor se ha calculado es de 80 m, disminuyendo hacia el sur. Sobreyace a derrames andesíticos, basálticos y a riolita-toba riolítica indistintamente, subyace a aparatos volcánicos derrames básicos y a tobas híbridas.

Aflora ampliamente en la porción noroccidental de la zona, en los alrededores de los poblados San Lucas, Aculco de Espinosa y Arroyo Zarco. En los mapas geológicos generalmente no se hace la distinción entre la toba riolítica y la toba híbrida, utilizando en lugar de ello el nombre genérico de toba ácida para toda la unidad.

### **Tobas híbridas**

Unidad compuesta por tobas deleznable y arenosas con pequeños fragmentos de pómez y lentes de arenisca, que afloran en las márgenes de la Presa Huapango y en los alrededores de Polotitlán, dispuestas en estratos horizontales con pequeños buzamientos, cuyo espesor promedio es de 30 m.

Presenta textura arenosa aunque su composición es difícil de determinar debido al intenso intemperismo que las afectan; la identificación de fragmentos de pómez, permitió clasificarla como toba intermedia a ácida. Por su posición estratigráfica se le asigna una edad correspondiente al Plioceno; sobreyace a derrames andesíticos y tobas riolíticas y subyace a basaltos y suelos aluviales.

## **CUATERNARIO**

### **Brecha Volcánica Básica**

Unidad representada por una serie de aparatos volcánicos formados por aglomerados, tobas de ceniza, arena y lapilli de composición básica, principalmente de estructura masiva, pero en ocasiones las tobas forman pseudoestratos.

Aflora de manera local al occidente de San Miguel de La Victoria y al noroeste de Aculco de Espinosa, sobreyaciendo a las tobas riolíticas.

### **Basaltos**

Son basaltos de olivino que presentan estructura fluidal y en ocasiones forman bloques que alcanzan algunas decenas de metros de espesor; su fracturamiento es moderado y de textura afanítica con pequeñas vesículas. Aflora al sur de Polotitlán, sobreyaciendo a las tobas riolíticas y a las tobas dacíticas indistintamente.

### **Residual**

Unidad conformada por los materiales producto de la alteración in situ de los basaltos, presenta compactación moderada y composición arcillosa con manifestaciones de materia orgánica y suelto. Su presencia se restringe a algunas laderas de montañas y cerros principales. Incluye sedimentos lacustres que se depositaron en las zonas más bajas de los valles.

### **Aluvial**

Depósitos clásticos de origen aluvial constituidos por sedimentos areno-arcillosos y en menor proporción arenas y gravas, de baja compactación, cuyo espesor máximo alcanza 100 m en el centro de los valles de Acambay y Aculco. Sobreyacen indistintamente a tobas ácidas y riolíticas, así como a derrames básicos y andesíticos.

## **4.2 Geología estructural**

En la región se observa una gran diversidad de estructuras volcánicas, producto del constante vulcanismo a que ha estado sujeta dicha región; la base de la secuencia está representada por una serie de derrames de composición andesítica, seguido de un vulcanismo explosivo representado por tobas arenosas, pumicíticas e ignimbríticas así como derrames ácidos y tobas.

El arreglo estructural de la zona es el resultado del tectonismo regional que provocó dislocaciones causadas por esfuerzos distensivos, que modelaron la antigua topografía, generando una nueva conformación del terreno, mediante separación, levantamiento y hundimiento de grandes masas rocosas, en el marco de los eventos tectónicos y volcánicos que originaron el Eje Neovolcánico.

Regionalmente, en el área existe la falla denominada Chapala-Acambay, que provocó la disección y hundimiento del aparato volcánico principal de la zona.

La zona donde se encuentra el acuífero de Polotitlán corresponde a una zona volcánica que sufrió reactivaciones volcánicas durante el Cenozoico Superior que mediante esfuerzos compresivos dio origen a fallas normales con dirección oeste-este con ligera tendencia hacia el noreste; durante este período y por medio de estas fallas regionales se extravasaron grandes volúmenes de material volcánico, que formaron aparatos volcánicos alineados con las fallas regionales.

En este mismo contexto, existen otros volcanes con dirección secundaria con sentido noreste-noroeste, principalmente. Los recientes fracturamientos de Acambay y Atlacomulco, provocaron otros fallamientos que influyeron al desarrollo de una serie de aparatos volcánicos y derrames básicos, que cubren a unidades terciarias.

En el Cuaternario se suscitó una etapa de tensión que produjo fallamientos normales, paralelos a las fallas anteriormente mencionadas, de las cuales la más representativa es el fracturamiento de Acambay, ubicado entre el límite de la Región Hidrológica 26 Pánuco y la población de Atlacomulco.

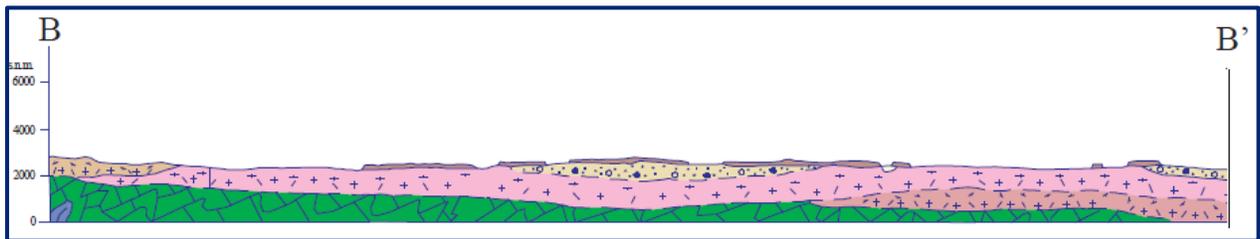
Por otra parte, al sur de dicho fracturamiento, fuera de la cuenca del Pánuco, se encuentra la falla Atlacomulco, que, combinada con el fracturamiento de Acambay, propiciaron el desarrollo de una depresión tectónica en la que actualmente se alojan los valles de San Miguel Solís y Acambay. Por otra parte, en la porción norte se presenta una serie de alineamientos de fracturas con dirección este-oeste, evidenciados por pequeños volcanes cuaternarios; las fracturas y fallas tienen algunos kilómetros de longitud.

### **4.3 Geología del subsuelo**

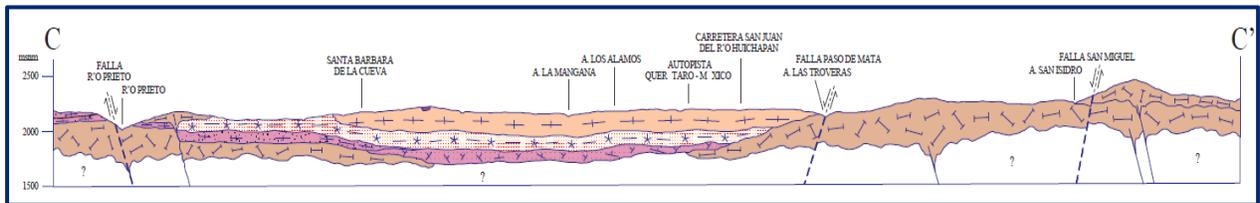
De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, podemos afirmar que el acuífero se encuentra constituido por dos medios hidráulicamente conectados; en su parte superior, por un medio granular conformado por depósitos vulcanoclásticos, lacustres, sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados polimícticos que rellenan los valles; la porción inferior por un medio fracturado que se aloja en las rocas volcánicas de composición de andesítica y basáltica principalmente, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El acuífero fracturado aflora principalmente en la Sierra de San Andrés Timilpan y en unidades volcánicas terciarias que están dispuestas en los estratos inferiores.

El acuífero granular sobreyace al acuífero fracturado en los valles, donde el espesor del relleno aumenta de la periferia hacia el centro y norte del valle, en el que los pozos perforados en la zona de Polotitlán alcanzan 400 m, sin llegar a las rocas volcánicas cristalinas que forman el basamento y las fronteras laterales del acuífero al sur, al oriente y al poniente (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera F14-11 "Pachuca". Esc. 1:250,000 (SGM, 1997)



Fuente: Carta Geológico-Minera F14-C77 "San Juan del Río". Esc. 1:50,000 (SGM, 2012)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento.

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, conformado por dos medios: uno de tipo fracturado y el otro de tipo granular, con interconexión hidráulica entre ellos. La porción superior está constituida por sedimentos aluviales de granulometría variada, depósitos vulcanoclásticos y conglomerados; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El espesor de los depósitos granulares supera los 400 m y se incrementa a medida que se acerca al centro y norte del valle.

De manera local, la presencia de sedimentos lacustres y piroclásticos muy finos pueden ocasionar condiciones de semiconfinamiento. De igual manera, los derrames de lavas fracturas, de permeabilidad alta, intercalados con otras rocas volcánicas poco permeables, forman acuíferos “colgados” que transmiten volúmenes significativos de agua a poca profundidad y originan manantiales estacionales o permanentes, que recargan al acuífero regional.

## **5.2 Parámetros hidráulicos**

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2013, se realizaron 4 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Adicionalmente, se cuenta con información de otras pruebas ejecutadas en los acuíferos vecinos Ixtlahuaca-Atlacomulco, Huichapan-Tecozautla y Valle de Amealco, que tienen la misma constitución, origen y evolución geológica.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad que varían de  **$8.5 \times 10^{-6}$  a  $74.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (0.7 a 6393.6  $\text{m}^2/\text{d}$ )**. En las 5 pruebas realizadas en el acuífero Polotitlán los valores varían de **1.5 a 3.6  $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (129.6 a 311.0  $\text{m}^2/\text{d}$ )**.

Los valores de conductividad hidráulica varían de  **$7.5 \times 10^{-6}$  a  $1.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  (0.65 a 1.55  $\text{m/d}$ )**.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que se desconoce el valor del cambio de almacenamiento y rendimiento específico. Sin embargo, por la constitución geológica del acuífero se le asigna valores promedio de coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico de 0.008 y 0.10, respectivamente.

## **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información piezométrica correspondiente al año 2013. La información de estudios previos es muy escasa y puntual.

## **5.4 Comportamiento hidráulico**

### **5.4.1 Profundidad al nivel estático**

La configuración de profundidad al nivel estático en el año 2013 mostró valores que variaban de 5 a 270 m.

Las menores profundidades, de 5 a 10 m, se registraron en la zona comprendida entre la presa Ñadó y el poblado Aculco, y de 10 a 20 m, que se registran en torno al vaso de la presa Huapango, los cuales se incrementan gradualmente hacia las estribaciones de las sierras que delimitan la cuenca en su porción sur.

Los niveles más profundos, de 150 a 270 m, se presentan en la zona topográficamente más baja de la cuenca, ubicada en el extremo norte del acuífero.

Esta condición atípica difiere del comportamiento de la profundidad en la superficie restante del acuífero, pero está apoyada en la medición de los niveles del agua subterránea en las inmediaciones del poblado Polotitlán, en donde los pozos son más profundos y posiblemente estén extrayendo agua de las rocas volcánicas (figura 4).

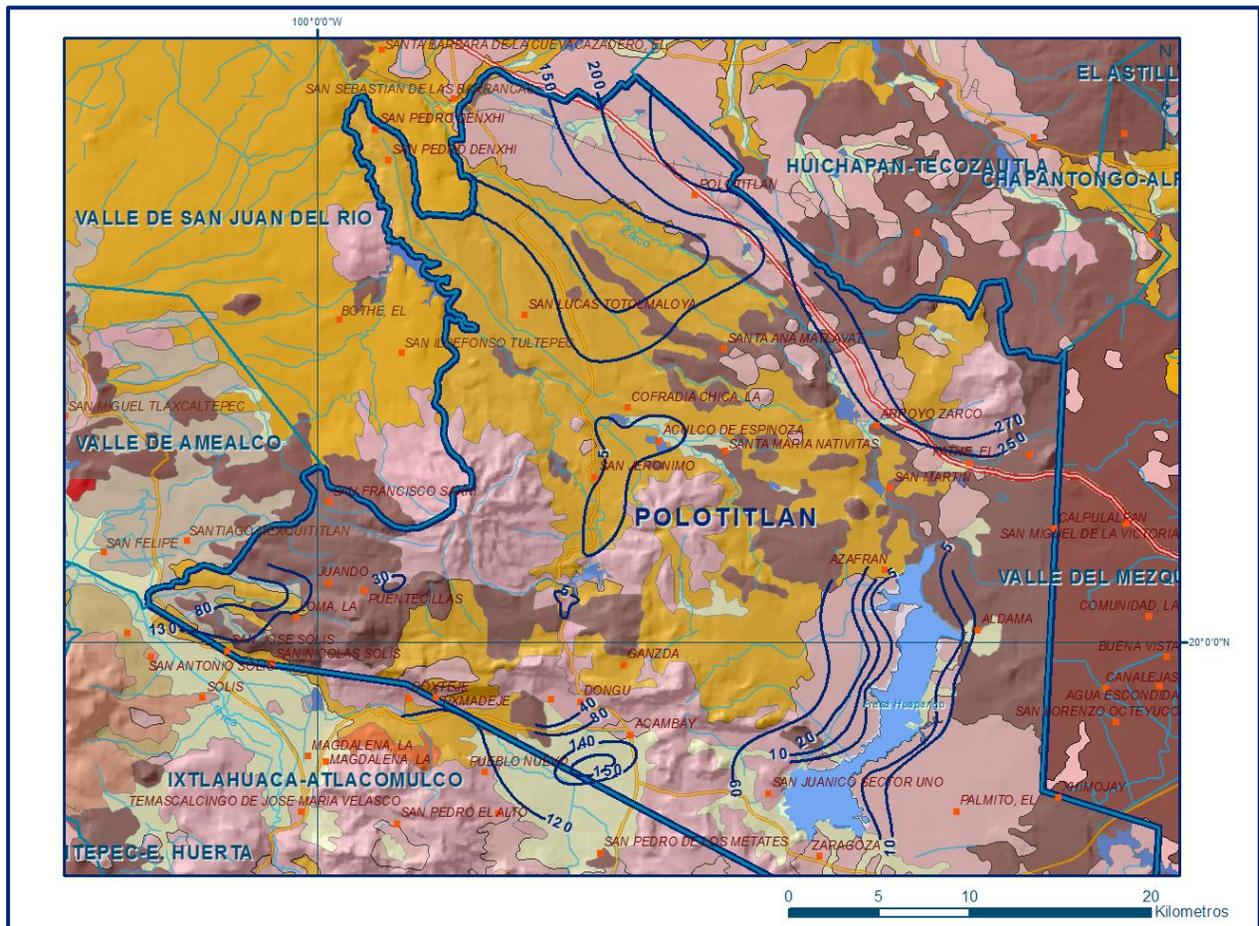


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2013 mostró valores que variaron de 2640 a 2030 msnm, los valores de mayor carga hidráulica, de 2600 a 2640 msnm, se registran en la porción suroriental y central del acuífero, desde donde descienden hacia el norte y noroccidente, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo sur-norte en la porción suroriental del acuífero, hacia la presa Huapango, y posteriormente sureste-noroeste, hacia el límite con el acuífero vecino Valle de San Juan del Río, en el estado de Querétaro.

Los valores menores de elevación, de 2030 a 2050 msnm, se presentan en la porción noroccidental del acuífero hacia el poblado Polotitlán.

En las porciones sur y suroccidental del acuífero, se presentan flujos de salida hacia el acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco, con dirección preferencial norte-sur y noreste-suroeste (figura 5).

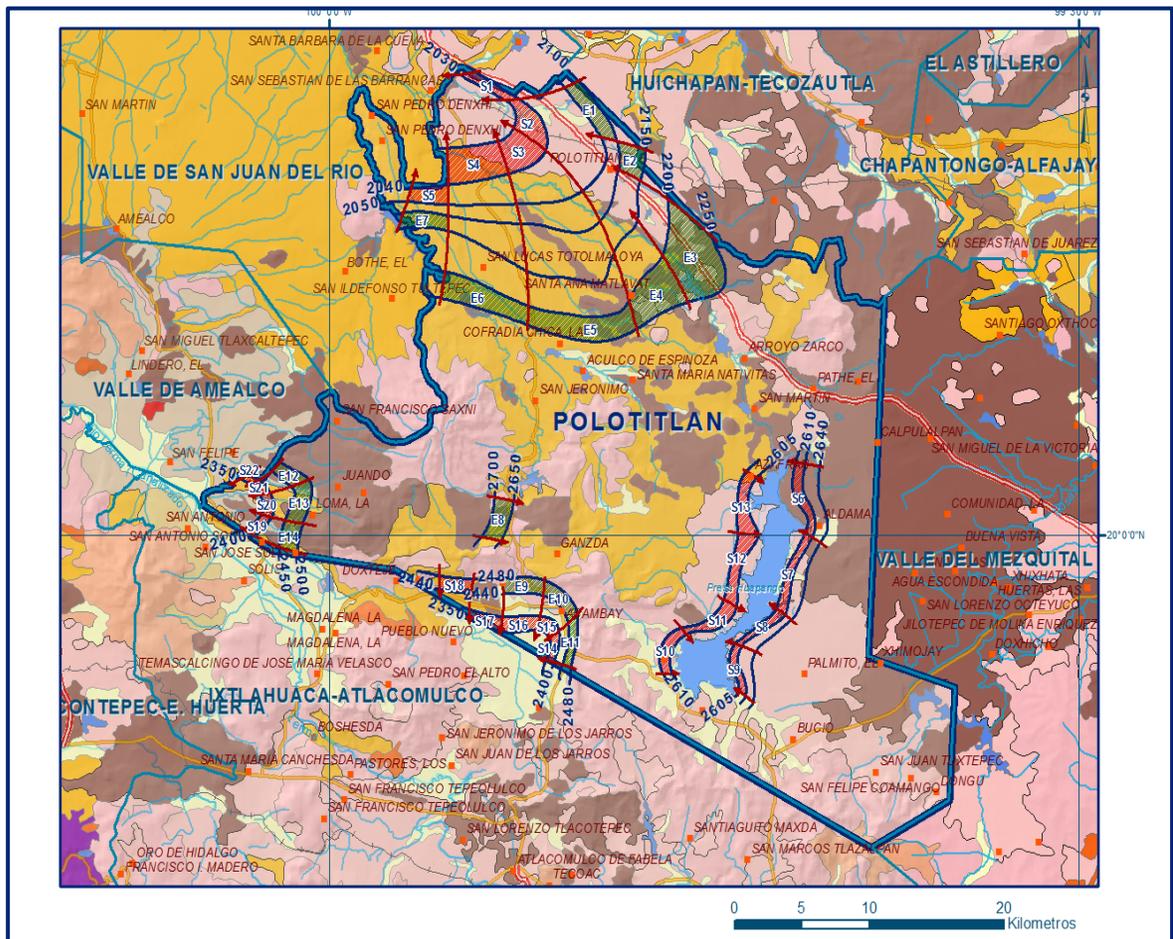


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

### **5.4.3 Evolución del nivel estático**

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en algunos recorridos de campo y estudios previos son puntuales y se encuentran dispersas en tiempo y espacio.

Además, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción. Por estas razones, se infiere que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Las mediciones realizadas en el año 2013 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

## **5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2013, se tomaron 10 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 y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de Hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio; además de los elementos traza arsénico, flúor y boro.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, en todos los aprovechamientos no se sobrepasa el límite de sólidos totales disueltos (STD) que es de 1000 mg/l, establecido por la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, ya que su concentración varía de 79 a 381 mg/l.

En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 123 a 596  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la porción norte del acuífero; en tanto que las menores se localizan hacia la región sur y suroriental, donde se localizan las principales zonas de recarga. Ambos valores se incrementan gradualmente de sur a norte en la dirección del flujo subterráneo. La temperatura varía de 11.0 a 27.4 °C y el pH de 7.2 a 8.3.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, predomina la familia bicarbonatada-cálcica que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas y sedimentarias carbonatadas. Se observa una evolución a cálcica-sódica-bicarbonatada en la dirección del flujo subterráneo de sur a norte.

La concentración de arsénico inorgánico disuelto (*iAs*) es un parámetro importante para la evaluación de la contaminación de los acuíferos, la cual puede ser provocada por la incorporación de contaminantes de origen antropogénico desde la superficie y/o por los procesos naturales de interacción agua-roca en medios geológicos específicos. La norma define concentraciones límite que varían de 0.025 mg/l para uso doméstico (NOM, 1994) a 0.100 mg/l para uso agrícola (SEDUE, 1989).

La normatividad mexicana establece el LMP de concentración de 1.5 mg/l de flúor en el agua de abastecimiento público. Para el boro la norma mexicana no establece un límite máximo permisible (LMP), sin embargo, los criterios ecológicos de calidad del agua (SEDUE, 1989) indican un LMP de 1 mg/l, aunque la OMS lo sitúa en 500 µg/l (WHO, 2004), mientras que para uso agrícola y pecuario se han definido límites entre 0.7 y 5 mg/l (SEDUE, 1989), respectivamente.

En todas las muestras de agua analizadas no se excede el LMP de concentración de arsénico, flúor y boro que establece las normas mexicanas y la OMS. El arsénico presenta una concentración que varía de 5 a 9.14 µg/l, con un promedio de 5.4 µg/l. El flúor presenta concentraciones de 0.06 a 0.65 mg/l, con un promedio de 0.31 mg/l; en tanto que para el boro se registraron concentraciones de 0.2 a 0.3 mg/l, con un promedio de 0.23 mg/l.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2013, se registraron un total de 96 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 72 son pozos y 24 norias; de ellos 91 se consideran activos y 5 inactivos.

De las obras activas, 19 (20.9 %) se destinan al uso agrícola, 44 (48.3%) para uso público-urbano, 1 (1.1%) para uso industrial y 27 (29.7%) para otros usos.

El volumen de extracción calculado es de **11.4 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 4.9 hm<sup>3</sup> (43.0 %) son para uso público-urbano, 4.1 hm<sup>3</sup> (36.0 %) para uso agrícola, 0.4 hm<sup>3</sup> (3.5 %) para uso industrial y 2.0 hm<sup>3</sup> (17.5 %) para otros usos.

Adicionalmente, a través de 17 manantiales que reportan los organismos operadores municipales (El Ruano, San Francisco, Ojo de Agua, Las Fuentes, Los Pericos, Toluquilla, Los Chorritos, El Pocito, El Ahuehuete, La Atajea, El Sauz, El Baño, El Aile, Agua Bendita, Petigá, Los Ocotes y Nagunda), se descarga un volumen de 3.7 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 2.8 hm<sup>3</sup> se destinan al uso doméstico-abrevadero y 0.9 hm<sup>3</sup> a los usos pecuario, servicios y múltiples.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2013, en una superficie de 500 km<sup>2</sup>, 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:

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

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

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

## 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 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 inducida, 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 inducida (Ri).

### 7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

**Rv** = Recarga vertical;

**Eh** = Recarga por flujo subterráneo horizontal;

**Ri** = Recarga inducida por retorno agrícola;

**B** = Bombeo;

**Sh** = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

**Dm** = Descarga por manantiales;

**ETR** = Evapotranspiración;

**$\Delta V(S)$**  = Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área 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.

Las entradas al acuífero, tienen su origen en las zonas de recarga localizadas en las sierras que rodean al valle.

Para el cálculo de entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, 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:

$$Q = T * B * i$$

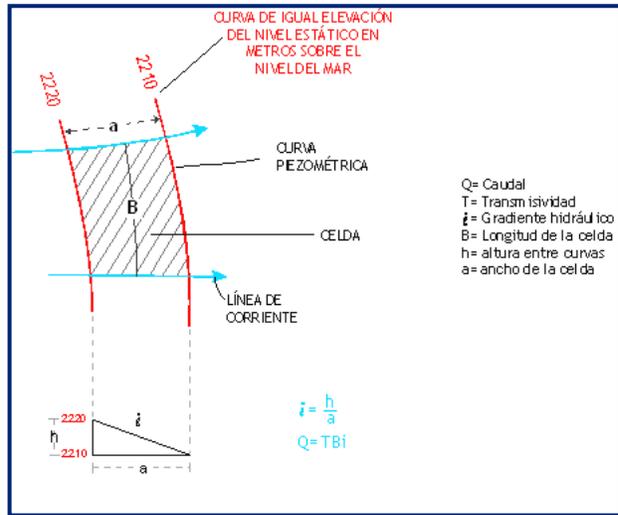
Donde:

**Q** = Gasto;

**T** = Transmisividad;

**B** = Longitud de la celda;

**i** = Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada 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 **42.4 hm<sup>3</sup>/año**.

Los valores de T utilizados corresponden al promedio de los obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas tanto en este acuífero como en otros acuíferos vecinos, adaptados al espesor saturado de las celdas de flujo.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2013)

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	4380	1505	50	0.03322	0.0008	0.1164	3.7
E2	1915	1645	50	0.03040	0.0008	0.0466	1.5
E3	4110	2740	50	0.01825	0.0008	0.0600	1.9
E4	4930	1915	50	0.02611	0.0008	0.1030	3.2
E5	7395	1230	50	0.04065	0.0008	0.2405	7.6
E6	7670	960	50	0.05208	0.0008	0.3196	10.1
E7	3285	1780	50	0.02809	0.0008	0.0738	2.3
E8	2600	1370	50	0.03650	0.0005	0.0474	1.5
E9	2740	1230	40	0.03252	0.0005	0.0446	1.4
E10	3015	960	40	0.04167	0.0005	0.0628	2.0
E11	3835	765	40	0.05229	0.0005	0.1003	3.2
E12	2190	960	50	0.05208	0.0005	0.0570	1.8
E13	2465	1505	50	0.03322	0.0005	0.0409	1.3
E14	1645	1370	50	0.03650	0.0005	0.0300	0.9
<b>Total entradas</b>							<b>42.4</b>

### 7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga inducida, tomando en cuenta la profundidad somera al nivel del agua subterránea en la zona agrícola.

El volumen de agua destinada a la agricultura es  $4.1 \text{ hm}^3$  anuales, si consideramos que el 20 % retorna como recarga efectiva al acuífero, su valor es de  $0.8 \text{ hm}^3/año$ .

Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varía en un amplio rango de 20 a 45%; para este caso se consideró también un promedio de 20 %, que aplicado al volumen del uso público-urbano de  $4.9 \text{ hm}^3/año$ , arroja un valor de infiltración de  $1.0 \text{ hm}^3/año$ .

Por lo tanto,  **$R_i = 1.8 \text{ hm}^3/año$** .

## 7.2 Salidas

La descarga del acuífero de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las zonas de niveles freáticos someros y a través de manantiales (Dm).

### 7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **11.4 hm<sup>3</sup> 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 del 2013, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal es **21.4 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2013)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	3285	1505	10	0.00664	0.0015	0.0327	1.0
S2	2465	1780	10	0.00562	0.0015	0.0208	0.7
S3	3285	3015	10	0.00332	0.0015	0.0163	0.5
S4	4385	2055	10	0.00487	0.0015	0.0320	1.0
S5	2740	1230	10	0.00813	0.0015	0.0334	1.1
S6	4930	960	5	0.00521	0.0005	0.0128	0.4
S7	6025	685	5	0.00730	0.0005	0.0220	0.7
S8	3560	545	5	0.00917	0.0005	0.0163	0.5
S9	3835	820	5	0.00610	0.0005	0.0117	0.4
S10	4930	765	5	0.00654	0.0005	0.0161	0.5
S11	3835	1095	5	0.00457	0.0005	0.0088	0.3
S12	4930	1230	5	0.00407	0.0005	0.0100	0.3
S13	4655	820	5	0.00610	0.0005	0.0142	0.4
S14	2190	685	50	0.07299	0.0005	0.0799	2.5
S15	1645	1230	50	0.04065	0.0005	0.0334	1.1
S16	2465	1370	50	0.03650	0.0005	0.0450	1.4
S17	2330	1095	50	0.04566	0.0005	0.0532	1.7
S18	3150	1230	40	0.03252	0.0005	0.0512	1.6
S19	1370	820	50	0.06098	0.0005	0.0418	1.3
S20	1095	905	50	0.05525	0.0005	0.0302	1.0
S21	1645	960	50	0.05208	0.0005	0.0428	1.4
S22	1505	685	50	0.07299	0.0005	0.0549	1.7
<b>Total salidas</b>							<b>21.4</b>

### 7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

El caudal conjunto que descargan los 17 manantiales identificados es de 11.7 lps, que representan un volumen anual de 3.7 hm<sup>3</sup>. **Dm = 3.7 hm<sup>3</sup>/año.**

### 7.2.4 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 14.5 °C y precipitación = 720 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 555.4 mm.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

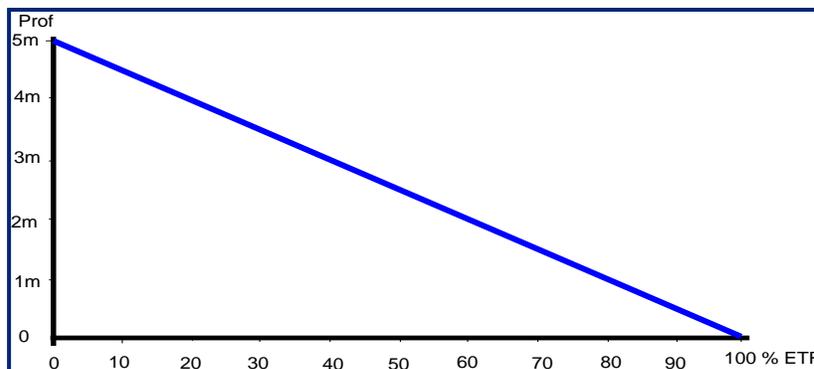
$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	14.5		
P (mm) =	720	P <sup>2</sup> =	518400
L =	814.93125	L <sup>2</sup> =	664112.942
ETR (mm)	555.4		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno, por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior.

Tomando en cuenta que en una superficie de 50 km<sup>2</sup>, en donde la profundidad promedio al nivel del agua subterránea es de 3 m, le corresponde el 40% de la lámina de ETR. Esto es: (50 km<sup>2</sup>) (0.5554 m) (0.4) = 11.1 hm<sup>3</sup> anuales.

Por lo tanto, **ETR = 11.1 hm<sup>3</sup>/año.**

### 7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ )

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los registros existentes recabados en algunos recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Adicionalmente, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, se considera que no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir,  $\Delta V(S) = 0$ .

### Solución de la ecuación de balance

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

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

$$R_v = 11.4 + 21.4 + 3.7 + 11.1 - 0.0 - 42.4 - 1.8$$

$$R_v = 3.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 3.4 + 42.4 + 1.8$$

$$R = 47.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 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:

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R** = Recarga total media anual
- DNC** = Descarga natural comprometida
- VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### **8.1 Recarga total media anual (R)**

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **47.6 hm<sup>3</sup>/año**, todos ellos son de recarga natural.

### **8.2 Descarga natural comprometida (DNC)**

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso de este acuífero la descarga natural comprometida corresponde a las salidas subterráneas hacia los acuíferos vecinos Valle de San Juan del Río e Ixtlahuaca-Atacomulco, así como hacia la presa Huapango, a la descarga a través de manantiales y al volumen de evapotranspiración real. Por lo que, **DNC= 36.2 hm<sup>3</sup> 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 **15,243,618 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

#### **8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)**

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 47.6 - 36.2 - 15.243618 \\ \text{DMA} &= -3.843618 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **3,843,618 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 1992. Estudio para el Diagnóstico del Acuífero del Valle de Toluca, ara Implementar la Reglamentación de la Extracción del Agua Subterránea. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Polotitlán, estado de México.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1979. Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la Zona de Polotitlán-Tecoautla, estado de México. Realizado por GEOPESA,