



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE TULANCINGO (1317),
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	5
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia Fisiográfica	6
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrografía	8
3.4	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGÍA.....	9
4.1	Estratigrafía.....	10
4.2	Geología estructural	13
4.3	Geología del subsuelo	14
5	HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1	Tipo de acuífero	15
5.2	Parámetros hidráulicos.....	16
5.3	Piezometría	17
5.4	Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1	Profundidad al nivel estático	17
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3	Evolución del nivel estático	19
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA	20
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1	Entradas	21
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	22
7.1.3	Recarga inducida (Ri)	23
7.2	Salidas.....	24
7.2.1	Bombeo (B).....	24
7.2.2	Descarga a través de manantiales (Dm)	24
7.2.3	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	25
8	DISPONIBILIDAD	26
8.1	Recarga total media anual (R).....	26
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	26
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	26
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	27
9	BIBLIOGRAFÍA	28

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 Valle de Tulancingo, definido con la clave 1317 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del Estado de Hidalgo, en el límite con el Estado de Puebla, entre los paralelos 19° 55´ y 20° 19' de latitud norte y entre los meridianos 98°10' y 98° 33' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1,054 km². (figura 1).

Limita al norte con el acuífero Meztlán, del Estado de Hidalgo; al noreste con el acuífero Álamo-Tuxpan, del Estado de Veracruz; al este con Acaxochitlán; al oeste con Huasca-Zoquital; al sur con el acuífero Tecocomulco, pertenecientes al Estado de Hidalgo; al suroeste con el acuífero Cuautitlán-Pachuca del Estado de México, y al sureste con el acuífero Tecolutla, perteneciente al Estado de Veracruz

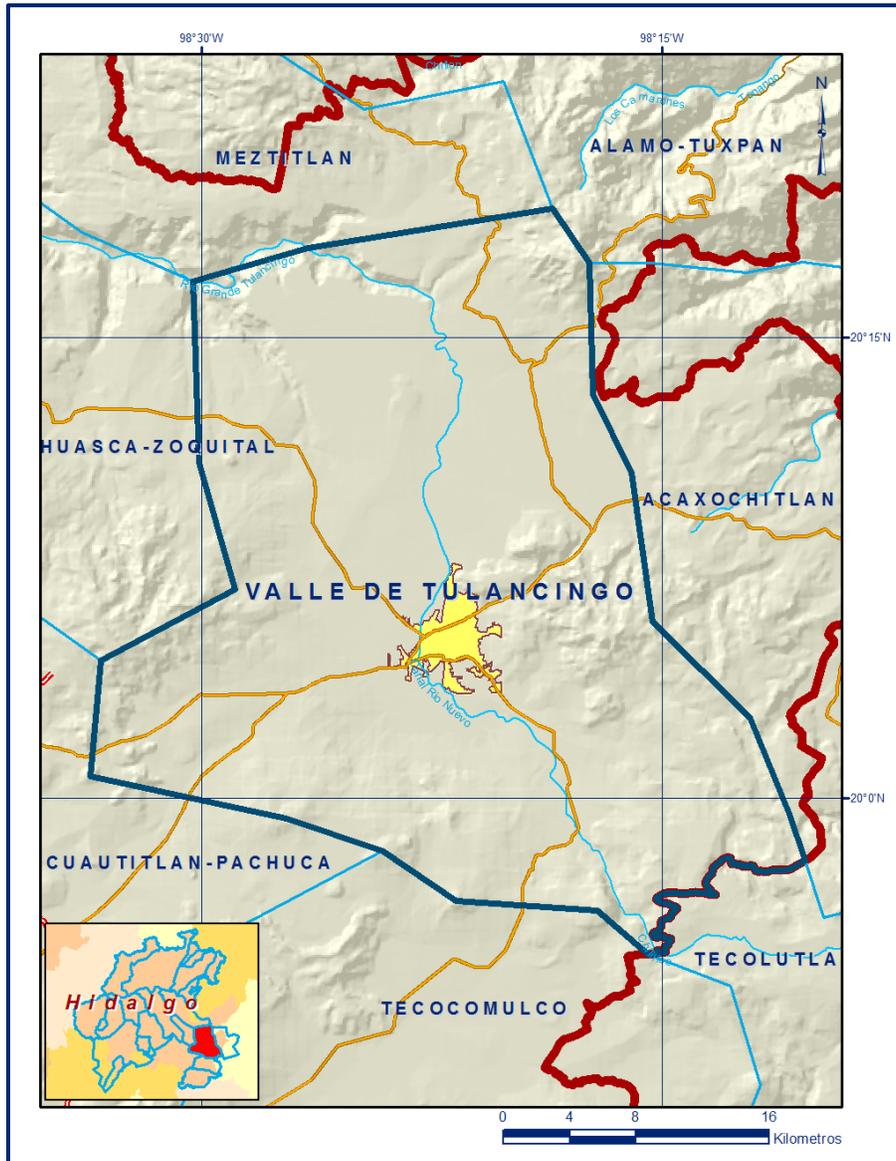


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el acuífero comprende la totalidad del municipio Santiago Tulantepec de Lugo; casi la totalidad de los municipios Acatlán, Cuautepec de Hinojosa, Metepec, Tulancingo de Bravo; parcialmente los municipios Huasca de Ocampo y Singuilucan; así como pequeñas porciones de los Municipios Acaxochitlán, Agua Blanca de Iturbide y Tenango de Doria; todos ellos del Estado de Hidalgo.

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

ACUIFERO 1317 VALLE DE TULANCINGO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	26	33.6	20	17	54	
2	98	18	35.2	20	19	12	
3	98	17	23.1	20	17	25.1	
4	98	17	16	20	13	9.4	
5	98	16	0.1	20	10	36.2	
6	98	15	20.5	20	5	44.3	
7	98	12	9	20	2	38.8	
8	98	10	52.4	19	59	29.6	
9	98	10	22.1	19	57	58.2	DEL 9 AL 10 POR EL LIMITE ESTATAL
10	98	15	28.5	19	54	55.9	
11	98	17	8.5	19	56	20.8	
12	98	21	43.8	19	56	39.7	
13	98	24	7	19	58	17.4	
14	98	27	15.2	19	59	21.1	
15	98	33	37.1	20	0	43.4	
16	98	33	17	20	4	29.9	
17	98	28	55.5	20	6	48.1	
18	98	30	5.5	20	10	54.4	
19	98	30	16.8	20	16	50	
1	98	26	33.6	20	17	54	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Valle de Tulancingo pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Norte y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Hidalgo. El 87 % de su superficie se encuentra vedada y sujeta a las disposiciones del “*DECRETO por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida como Valle de Tulancingo, en el Estado de Hidalgo*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 23 de septiembre de 1965. Esta veda se clasifica como tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. Sólo su extremo nororiental, que representa el 13% restante, no está sujeto a ningún decreto de veda, sin embargo se encuentra sujeto a las disposiciones del “*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 21 acuíferos que se indican*”, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero Valle de Tulancingo, clave 1317, se prohíbe la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, y el incremento de volúmenes autorizados o registrados, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El principal uso del agua es el agrícola. El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Río Pánuco. En su territorio se localiza el Distrito de Riego 028 Tulancingo. El 25 de julio de 2002 se constituyó el Comité Técnico de Aguas Subterráneas del acuífero del Valle de Tulancingo, A.C.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios geohidrológicos de evaluación. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DEL VALLE DE TULANCIGO EN EL ESTADO DE HIDALGO, elaborado en 1973 por Servicios Geológicos, S.A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos. Este estudio describe aspectos geológicos, de hidrología superficial, subterránea y calidad del agua; incluye un censo de aprovechamientos de 265 captaciones, evalúa los manantiales y los escurrimientos superficiales que son drenados a través del Río Grande de Tulancingo. Identifica la existencia de dos unidades acuíferas, una somera alojada en basaltos y material piroclástico areno-arcilloso, poco consolidado, y una segunda inferior o profunda en la que se concentra la explotación, cuyo nivel estático variaba de 30 a 90 m de profundidad. Se realizaron 24 pruebas de bombeo de cuya interpretación se definió un valor de transmisividad media de $2.19 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. El acuífero presentaba un abatimiento medio anual de 1.5 m.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN EL VALLE DE TULANCIGO, ESTADO DE HIDALGO, elaborado por THORSA, S.A. en 1991, para la Comisión Nacional del Agua. Realiza un censo de 164 aprovechamientos, 15 pruebas de bombeo y 26 sondeos eléctricos verticales, a partir de los cuales se detecta una falla normal que cruza todo el valle y que intercepta el flujo regional, dando origen al manantial de la Laguna de Zupitlán. Este estudio confirma la presencia de dos unidades que conforman el acuífero; la profunda corresponde en general a un acuífero libre, aunque localmente se comporta como semiconfinado.

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA COMPLEMENTARIA EN DIVERSAS ZONAS DEL ESTADO DE HIDALGO COMO APOYO AL CONVENIO DE PERFORACIÓN, elaborado por Exploraciones Coordinadas, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua, en 1991.

Su objetivo fue facilitar la localización de los sitios más adecuados para la perforación de pozos. Se realizaron sondeos eléctricos verticales, elabora secciones geológicas y recomienda la perforación en la unidad I, conformada por aluviones, tobas y depósitos lacustres, a una profundidad de 150 a 200 m.

ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO DE TULANCINGO, HGO., elaborado por Ingeniería de Evaluación y Prospección, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua, en 2003. Recopila y procesa la información geohidrológica existente, establece el marco geológico conceptual del acuífero y construye un modelo de flujo hidrodinámico, con el que simula tres escenarios de extracción. Identifica dos medios en los que se desplaza el agua subterránea:

Un medio granular que incluye al material de relleno superior y al material piroclástico, con algunas intercalaciones de basalto vesicular, que constituye el acuífero principal de la región, y otro alojado en rocas volcánicas fracturadas.

Reinterpreta pruebas de bombeo obteniendo valores de conductividad hidráulica de entre 1 y 20 m/d. Recomienda la actualización del censo y la revisión de la información hidrogeológica disponible, entre ella la que se refiere a la composición química del agua subterránea. Estima un abatimiento medio anual de 0.9 m.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN EL MUNICIPIO DE TULANCINGO DE BRAVO, HIDALGO, elaborado en 2006 por Lesser y Asociados para la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo.

Este estudio hidrogeológico incluye censo de 313 aprovechamientos, nivelación topográfica, exploración geofísica mediante sondeos electromagnéticos y gravimetría, piezometría, muestreo de agua subterránea para análisis químico e isotópico, pruebas de bombeo, definición del modelo conceptual, determinación del balance de aguas subterráneas y elaboración del modelo matemático del acuífero.

Estos dos estudios fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

La superficie que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, (Raisz, 1954), Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac del Sistema Volcánico Transversal.

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°.

En la región comprendida por el acuífero existen sierras volcánicas o grandes aparatos volcánicos individuales que alternan con amplias llanuras conformadas en su mayoría por sedimentos lacustres, donde predominan las topoformas de lomerío y llanura. Al este de la Subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo del Sistema Volcánico Transversal, se encuentra la llanura de Tulancingo.

El oriente, poniente y sur del Valle de Tulancingo, se encuentra constituido por elevaciones topográficas constituidas de productos volcánicos del Cenozoico que dan origen a sierras volcánicas de fuertes pendientes. Sobresalen el Cerro La Cantera al oriente de Tulancingo, dos conos volcánicos conocidos como cerros El Abra y Napateco al noreste, que presentan forma cónica y se elevan a 300 m sobre el nivel del valle.

En la porción occidental se encuentra el Cerro El Milagro, el cual forma parte de una sierra volcánica que se eleva en sus picos más altos a 3,400 msnm y a más de 1,000 m sobre el Valle de Tulancingo, disectada por arroyos que forman cañadas de pendientes abruptas.

En la porción sur del acuífero se encuentra una sierra volcánica constituida por conos cineríticos y derrames lávicos del Cuaternario; en sus flancos presenta fuerte pendiente, mientras que hacia la parte alta se hace suave y sobre ella destacan varios conos cineríticos que forman las partes más altas de la sierra, con una elevación de 2,750 msnm. Al noreste de Santa Ana Hueytlalpan existe una serie de lomeríos constituidos por conos cineríticos y derrames de lava basáltica. Los lomeríos presentan formas redondeadas y se elevan entre 100 y 200 m sobre el nivel del valle. En la región centro-norte del valle se encuentran conos cineríticos de suave pendiente.

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 porción central del Valle de Tulancingo el clima es semiseco, templado y hacia sus bordes el clima es templado, subhúmedo, con lluvias en verano.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de tres estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Alcholoya, Presa La Esperanza y Tulancingo, para el periodo de análisis de 1950 a 2008. Con estos datos, se determinaron valores promedio anuales de temperatura, precipitación y evaporación potencial de **15 °C, 532.1 mm y 1541.8 mm**, respectivamente.

La temperatura media anual oscila entre 14.8 y 15.7 °C, en tanto que la precipitación media anual varía de 514.5 mm en la Estación Tulancingo, a 546.4 mm en Presa La Esperanza.

3.3 Hidrografía

El área del acuífero se ubica en la Región Hidrológica RH 26 “Río Pánuco”, Subregión Hidrológica Alto Pánuco del Río Moctezuma, cuenca alta del Río Metztitlán, subcuenca Río Grande de Tulancingo. Una de las corrientes principales de esta cuenca es el río Grande Tulancingo que cambia su nombre aguas abajo por Río Alcholoya y posteriormente por el de Río Metztitlán. Se origina al sur del valle, al pie del Cerro Tlacholoya, localizado al sureste de la zona de estudio, a partir de la confluencia de los ríos Chico y San Lorenzo. El agua de esta corriente se utiliza para riego mediante canales paralelos al río.

El sistema de drenaje en la región es del tipo dendrítico y las corrientes más importantes que lo forman son los ríos Huitzongo, San Lorenzo, Grande de Tulancingo, Chico y Tortugas, que junto con los arroyos Camarones, La Cueva y Acocul, forman parte de la Cuenca Hidrográfica Alta del Río Metztitlán. El Río Grande de Tulancingo es de régimen perenne, mientras que el resto de las corrientes en la región, son del tipo intermitente. En la región sur del acuífero existen pequeños manantiales intermitentes, cuyo caudal disminuye paulatinamente después de que concluye la temporada de lluvias. Más al norte, existen varios manantiales perennes de mayor caudal, como los de Ventoquipa, Hueyapan y los que dan origen al Lago de Zupitlán, que descargan 612 lps.

Estos manantiales son utilizados por los habitantes de la región para diversos usos y corresponden a descargas de agua subterránea de sistemas de flujo local e intermedio.

En el Valle de Tulancingo se han construido obras de control de avenidas, como la presa La Esperanza, que se localiza al sureste del valle, cuyas aguas son utilizadas en el Distrito de Riego 28 Tulancingo. Al norte se localiza otro embalse importante que es la Laguna de Zupitlán.

Otros cuerpos superficiales de agua, de menor tamaño, están distribuidos en el todo el valle, entre ellos destaca la Laguna de Hueyapan que se utiliza para abastecimiento de agua potable a la región.

3.4 Geomorfología

El acuífero está alojado en un valle bordeado por sierras, dentro del cual se presentan cerros y lomeríos. Existen varios tipos de relieve de la superficie del terreno, entre los que destacan sierras volcánicas, elevaciones aisladas, conos volcánicos menores, mesetas, elevaciones de poca extensión asociadas a derrames de lava y valles.

El Valle de Tulancingo se caracteriza por conformar una extensa altiplanicie rodeada por sierras volcánicas, con innumerables abanicos y llanuras aluviales; localmente está constituida por un amplio valle intermontano, con elevación media sobre el nivel del mar de 2,150 m, con una ligera pendiente hacia el norte y de forma burdamente triangular, que se encuentra surcada de sur a norte por el Río Grande de Tulancingo.

4 GEOLOGÍA

En la superficie que cubre el acuífero afloran principalmente rocas volcánicas del Paleógeno y Cuaternario, sedimentarias del Cretácico y sedimentos aluviales y fluviales que rellenan el valle y se interdigitan con materiales volcánicos (figura 2).

Las rocas volcánicas más antiguas, que conforman las sierras del oriente y poniente respectivamente, están constituidas por derrames lávicos, tobas y brechas de tipo riolítico, así como lavas dacíticas y derrames de riolita masiva, del Mioceno-Oligoceno. En el subsuelo del valle se encuentran capas de pómez, cenizas, material piroclástico poco consolidado de textura gruesa que incluyen fragmentos de obsidiana e intercalaciones de lavas basálticas, con un espesor aproximado de 100 m.

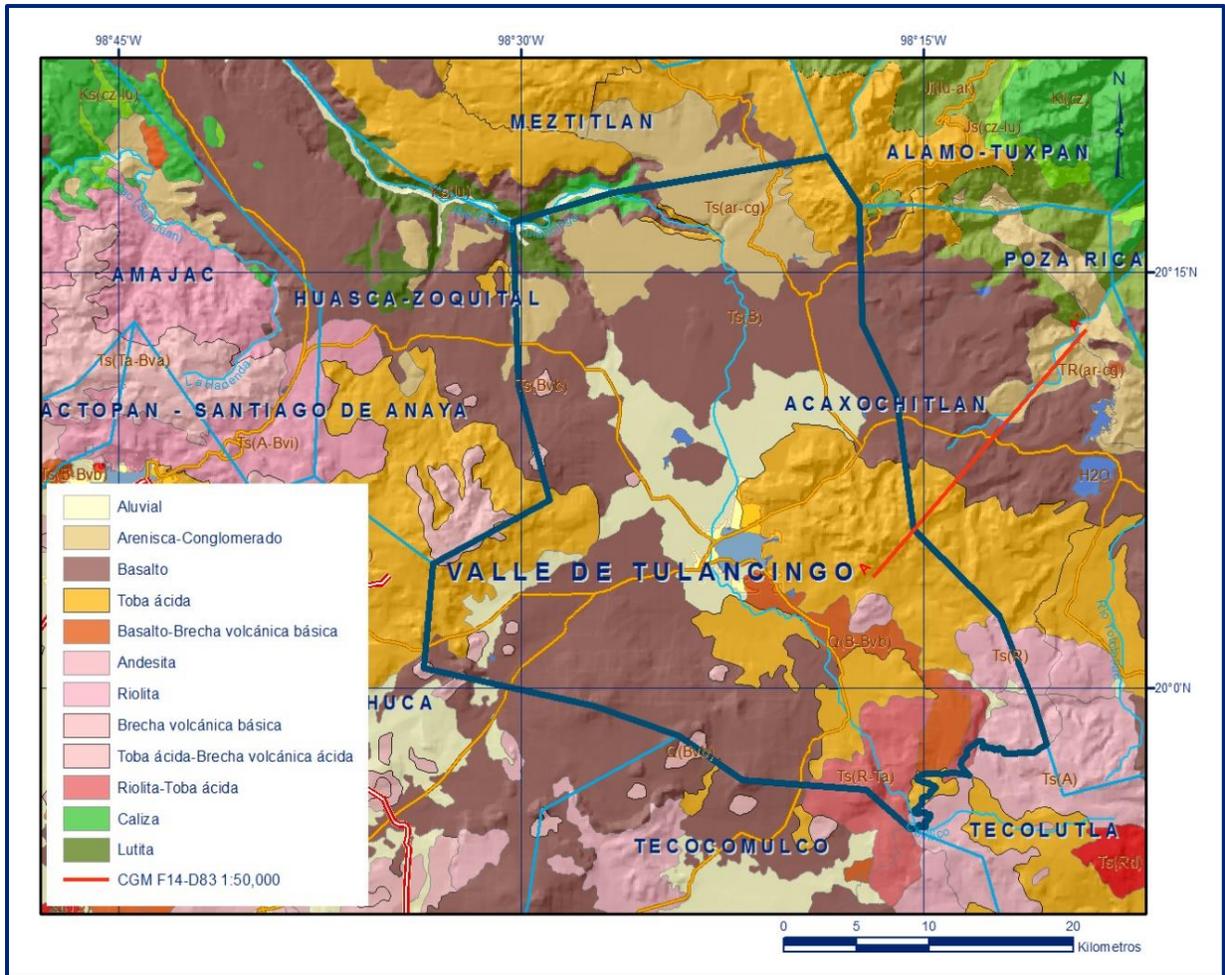


Figura 2. Geología general del acuífero

Los materiales volcánicos del Cuaternario que descansan sobre las formaciones anteriores, están representados por basaltos y cenizas volcánicas, derrames basálticos que forman las sierras del sur y noreste; y basaltos y cenizas que afloran en la porción norte y noroeste.

Los materiales sedimentarios aluviales del Cuaternario que rellenan la fosa tectónica del Valle de Tulancingo incluyen clásticos arcillosos, arenosos y conglomeráticos y aluviones; que presentan un reducido espesor. Los materiales aluviales cubren a una colada de basaltos de alrededor de 50 m de espesor.

4.1 Estratigrafía

En la región cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias y volcánicas cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico Superior al Reciente. A continuación, se describen las unidades en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente.

CRETÁCICO

Formación Tamaulipas Superior

Está constituida por rocas calcáreas de estratificación delgada que varía de 10 a 20 cm, con textura predominante mudstone. Contiene algunas bandas de pedernal negro que varían de 3 a 5 cm de espesor y presenta fracturamiento casi perpendicular al rumbo de las capas, con espaciamiento promedio de 0.80 m. Aflora el oriente del acuífero, en la cañada Metztlán.

Formación Soyatal

Aflora en el extremo noroccidental del acuífero y está constituida por calizas dispuestas en estratos delgados a medianos que raras veces exceden de 30 cm de espesor, es común una laminación fina, con capas de lutitas calcáreas hacia la cima. Los fósiles encontrados constan principalmente de bivalvos del género *Inoceramus*, indicando edad turoniana, por lo que puede correlacionarse con la Formación Agua Nueva (Stephenson, 1921). Su contacto con la Formación Tamaulipas Superior es transicional. Por su composición litológica, funciona como unidad de baja permeabilidad debido a que los horizontes arcillosos que contiene, excepto cuando está afectada por fracturas.

Formación Méndez

Está constituida por una secuencia de lutitas calcáreas de color gris, que por efectos del intemperismo adquieren una coloración verde amarillenta. Presenta fracturamiento en bloques pequeños y estratificación de tipo laminar con espesores de apenas unos cuantos centímetros que se agrupan en capas que varían de 10 a 20 cm de espesor. Aflora al noroccidente del acuífero.

CENOZOICO

Grupo Pachuca

Representado por una serie de rocas volcánicas de composición variada entre las que predominan andesitas y dacitas, cuya edad varía del Oligoceno al Mioceno. En la zona de estudio las rocas que constituyen al Grupo Pachuca forman las elevaciones topográficas del límite oriental y están constituidas por derrames lávicos, tobas y brechas de tipo riolítico, así como lavas dacíticas, las cuales han sido asignadas al Mioceno.

Existen derrames de composición riolítica que conforman el Cerro Viejo, localizado al noreste del valle, y las elevaciones topográficas ubicadas al oriente de la Ciudad de Tulancingo, entre las que destacan los cerros El Abra, Napateco y La Cantera.

Estas rocas de composición riolítica son masivas y presentan un color rosa pardo, estructura fluidal, que están frecuentemente asociadas con brechas constituidas por fragmentos angulosos de material riolítico.

Llegan a incluir intercalaciones de tobas de color café claro con textura arenosa, así como derrames de dacitas masivas de color gris. Se le asigna una edad del Mioceno-Oligoceno y se estima que presentan un espesor mayor de 400 m.

Formación Riolita Navajas

Se encuentra constituida por derrames de riolita fluidal de color rosa claro y pardo, masiva, dispuesta sobre la unidad anterior. Aflora en el Cerro El Milagro, ubicado en la porción poniente del valle de Tulancingo, donde los potentes derrames riolíticos se encuentran morfológicamente bien conservados. Presenta un espesor de alrededor de 500 m y se asigna al Plioceno.

Formación Atotonilco El Grande

Corresponde a capas delgadas de pómez con un espesor entre 5 y 35 cm, las cuales se encuentran pseudoestratificadas o intercaladas con material piroclástico poco consolidado, de textura gruesa, que incluyen fragmentos de obsidiana de textura gruesa, de dimensiones variables, así como piroclásticos de textura arenosa de composición riolítica y basáltica que en algunas localidades presenta clastos de mayor tamaño. Se intercala con capas de cenizas finas, de pómez y derrames de basalto. Aflora en la porción sur del Cerro El Abra y se encuentra intercalada con materiales granulares que rellenan el valle. Tiene un espesor de 40 a 60 m y se asigna al Plioceno, correlacionable con la Formación Riolita Navajas, de la cual se distingue por su litología, en especial por la presencia de horizontes de pómez.

CUATERNARIO

Derrames basálticos y clásticos asociados

Los basaltos y material cinerítico corresponden a potentes derrames de lava de composición basáltica, caracterizada por la presencia de olivino, por contener un gran número de vesículas y en algunas zonas encontrarse muy fracturada. Corresponden a flujos de lava eyectados por aparatos volcánicos ubicados en el sur del valle, así como en la porción noreste. Incluye horizontes de material piroclástico de color gris oscuro, en algunas zonas de color rojizo, provenientes de conos cineríticos que se extienden principalmente sobre la sierra del sur del valle, destacando entre ellos por su elevación el Cerro El Águila.

En general, corresponde a una intercalación de corrientes de lava basáltica con piroclásticos, asociados a la eyección de las lavas que se acumularon formando varios conos volcánicos que dieron origen a las sierras del sur y noreste.

La unidad descrita como derrames basálticos incluye intercalaciones de piroclásticos y basaltos. Los piroclásticos presentan diferente textura, predominando la arenosa pero en algunos sitios incluye piroclásticos de mayor tamaño y en otras zonas capas de cenizas finas. Aflora en la porción norte y noroeste del valle, donde constituye aparatos volcánicos que se consideran más jóvenes que las sierras del sur. Los basaltos presentan color oscuro, corresponden a basaltos de olivino y su espesor alcanza hasta 60 m. Se asignan al Cuaternario por lo que se consideran más recientes que la unidad de derrames basálticos y clásticos asociados.

Por lo que se refiere a los clásticos arcillosos, arenosos y conglomeráticos, corresponden a piroclásticos de textura arenosa y arcillosa, poco consolidados, con intercalaciones de materiales aluviales de textura variada, desde fina hasta clastos de varios centímetros de diámetro. Corresponde al material más superficial que constituye el valle, el cual se encuentra interdigitado con sedimentos aluviales de granulometría variada. Representa los depósitos de las últimas emanaciones volcánicas de los conos cineríticos que se encuentran rodeando prácticamente todo el valle. La unidad más reciente son los aluviones del Cuaternario, constituidos por sedimentos areno-arcillosos, acarreados por las corrientes superficiales, acumulados en depresiones localizadas principalmente al sureste y oeste de la Ciudad de Tulancingo. Su espesor varía de 3 a 15 m.

4.2 Geología estructural

El basamento sobre el que descansan las rocas volcánicas y sedimentos que conforman el acuífero, está constituido por lutitas y rocas calcáreas del Mesozoico, que fueron plegadas intensamente durante la Orogenia Laramide; estas rocas sólo afloran en la Cañada de Alcholoya, localizada en la porción noroeste del acuífero. Durante el inicio del Cenozoico y una vez que cesaron los esfuerzos de compresión que dieron lugar al plegamiento, se comenzó a desarrollar un fallamiento normal provocado por los esfuerzos de tensión, que dio lugar a la formación de fosas tectónicas. El Valle de Tulancingo corresponde con una fosa tectónica, que fue rellenada primero por materiales clásticos de origen continental y posteriormente por depósitos piroclásticos y rocas volcánicas cuya extrusión se originó a través de fracturas y fallas.

En la región existe una gran cantidad de fallas y fracturas, que afectan principalmente a las rocas volcánicas. En términos generales, es posible diferenciar dos sistemas de fracturas y fallas, el principal con una orientación promedio de N30°E al cual corresponde la falla de mayores dimensiones (32 km de longitud), que se manifiesta en la superficie por una persistente alineación de aparatos volcánicos. Asociado con esta discontinuidad, se presenta otro patrón de fallas con esta tendencia y buzamiento entre 45° y 70° al NW y SE, principalmente sobre rocas volcánicas pertenecientes al Grupo Pachuca, con saltos hasta de 7 m y longitudes que varían de 300 a 1000 m.

El segundo sistema de fracturamiento, que presenta una orientación general N50°W, tiene su manifestación más importante en la falla localizada al NW del valle, donde se observa sobre una longitud aproximadamente de 12 km, que representa el conducto por el cual fluyeron los derrames lávicos basálticos más recientes que afloran sobre el valle. Fracturas y fallas de menores dimensiones afectaron las rocas del Grupo Pachuca y a la Formación Atotonilco El Grande; en un afloramiento de esta última unidad, situado al NE de Tulancingo, actualmente en explotación para material de construcción, es posible observar que las capas de pómez han sido desplazadas entre 0.30 a 7 m, por una familia de fallas que tienen longitudes superiores a 70 m.

4.3 Geología del subsuelo

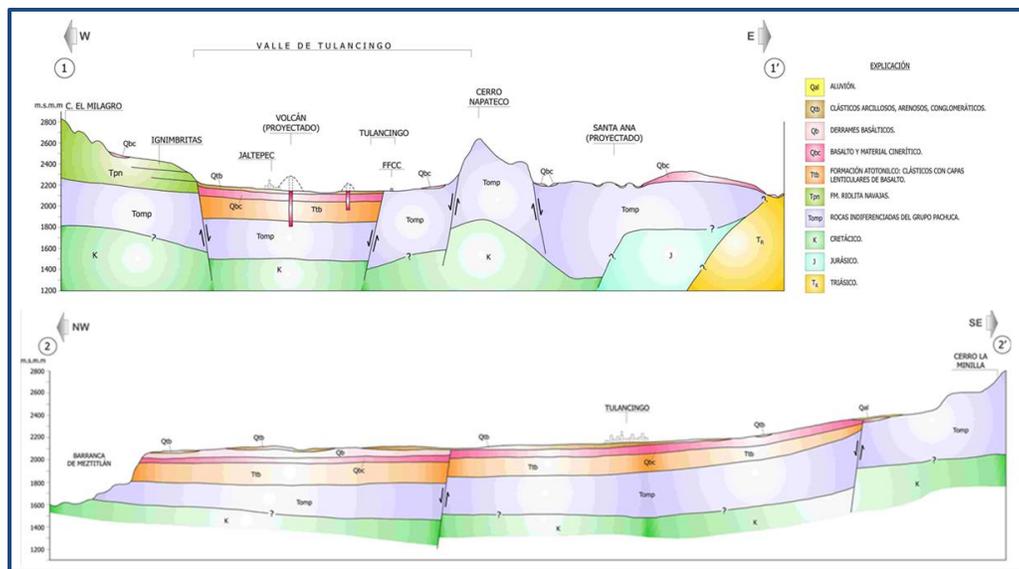
De acuerdo con la información de la geología superficial y del subsuelo recabada, es posible definir que el acuífero está conformado, en su porción superior, por un medio granular, integrado por materiales clásticos sedimentarios de granulometría variada y piroclásticos; y en su porción inferior por un medio fracturado, conformado por las rocas volcánicas. La secuencia geológica se observa en capas horizontales únicamente afectadas en la región central por las fallas normales. Materiales clásticos arcillo-arenosos y conglomeráticos, cubren a derrames basálticos y piroclásticos.

Dichos materiales descansan sobre las rocas volcánicas de la Formación Atotonilco El Grande, con un espesor aproximado de 100 m y sobre las rocas volcánicas del Grupo Pachuca. Bajo los materiales anteriores se encuentran las rocas calcáreas del Cretácico, Jurásico y Triásico, que afloran en el extremo nororiental (figura 3).

Los materiales permeables corresponden a los depósitos aluviales y clásticos arcilloso-arenosos y conglomeráticos que constituyen el valle, con un espesor mínimo de 200 m, estos materiales presentan intercalaciones de lavas basálticas; ambos constituyen la principal unidad en explotación.

Otro tipo de materiales permeables corresponden a basaltos y cenizas volcánicas que forman principalmente las sierras del sur y noreste, constituidas por lavas fracturadas y piroclásticos permeables, que permiten la infiltración del agua de lluvia al subsuelo, por lo que funcionan principalmente como zonas de recarga.

Las rocas de muy baja permeabilidad corresponden a la Riolita Navajas y al Grupo Pachuca que están constituidas principalmente por rocas masivas de composición riolítica, que en general al desaparecer el fracturamiento a profundidad, constituyen las fronteras laterales y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento hidrogeológico del acuífero.



Fuente: CEEA Hidalgo 2006)
 Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, estructurales, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un sistema acuífero de **tipo libre** conformado por dos unidades hidrogeológicas, heterogéneas y anisótropas, constituidas por un medio granular integrado por sedimentos fluvio-aluviales y materiales piroclásticos, y un medio fracturado, conformado por rocas volcánicas, que presentan condiciones locales de **semiconfinamiento** debido a la existencia de depósitos arcillosos y una colada de basalto muy compacta de 50 metros de espesor que localmente se comporta como acuitardo.

La unidad somera o colgada, tiene una extensión restringida a la porción sur del valle y un espesor limitado, de 20 a 40 m, está constituida por material volcánico-sedimentario de granulometría variable, que se explota mediante norias y algunos pozos de poca profundidad. La base de esta unidad somera corresponde a una colada muy compacta de basaltos.

La unidad acuífera profunda abarca la totalidad del valle y se encuentra conformada por capas de depósitos piroclásticos intercaladas con tobas, aluviones de diferente granulometría e intercalaciones de derrames de basalto, cuyo espesor conjunto en ocasiones superior a 300 m, de acuerdo a los resultados de la exploración geofísica. La mayor parte de la extracción de agua subterránea se realiza a través de los pozos perforados en esta unidad acuífera profunda.

Las fronteras, barreras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece su fracturamiento y por las rocas volcánicas compactas que constituyen la Riolita Navajas y El Grupo Pachuca. A mayor profundidad las rocas calcáreas constituyen un acuífero que no ha sido explorado y que puede presentar confinamiento debido a que está sobreyacido por lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 2006, se ejecutaron 44 pruebas de bombeo de larga duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, en el estudio llevado a cabo en 2003 se reinterpretaron 21 pruebas. De los resultados de su interpretación tanto por métodos analíticos convencionales como por el modelo de dos capas de Rathod y Rushton (1991), se determina que los valores de transmisividad varían de **1.2×10^{-5} a $32.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , para la mayor parte del acuífero. En algunas zonas se presentan valores extremos de 35.0 a $610 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Los valores de conductividad hidráulica varían de **0.2 a 140.0 m/d (2.3×10^{-6} a $1.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)**, (CONAGUA, 2003).

Con respecto a los valores del rendimiento específico y del coeficiente de almacenamiento, muy pocas pruebas contaron con pozos de observación; sin embargo mediante el modelo numérico de Rathod y Rushton se obtuvieron valores. Para el rendimiento específico varían de **0.0015 a 0.15** y de **0.00015 a 0.000005** para el coeficiente de almacenamiento.

Los valores más bajos de los parámetros hidráulicos se asocian a los sedimentos aluviales arcillosos y a los depósitos piroclásticos finos, en tanto que los más altos se registran en los aprovechamientos localizados en los sedimentos granulares de granulometría gruesa y/o a la presencia local de facturas en las rocas volcánicas.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se analizó la información piezométrica correspondiente a los años 2000 y 2006.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático muestra que los niveles estáticos en el año 2006 variaban de 50 a 180 m, incrementándose por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el valle y el acuífero. Las profundidades más someras se registran en la porción norte del acuífero y al oeste de Metepec; mientras que las más profundas se presentan en la porción noroeste y sur, en donde alcanzan 180 y 120 m, respectivamente (figura 4).

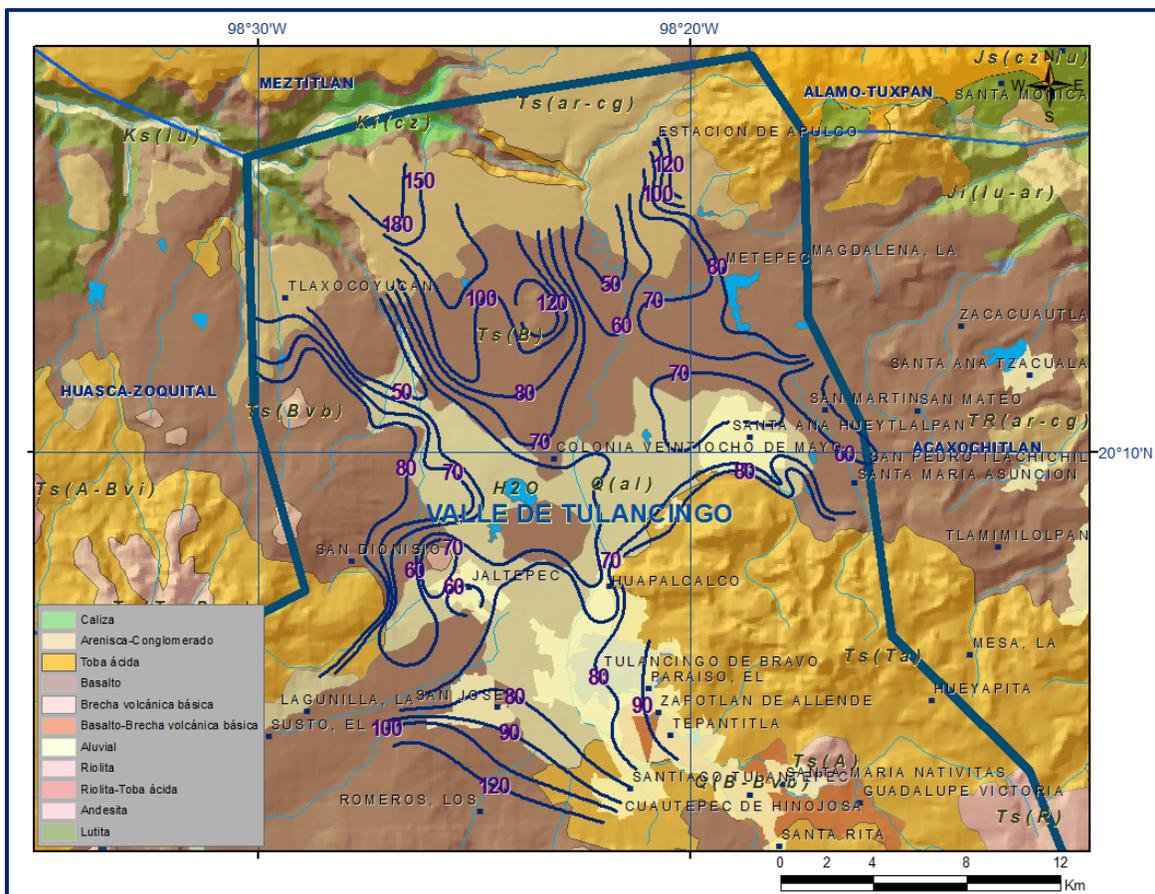


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m, (2006)

En la Ciudad de Tulancingo y el centro del valle, la profundidad del nivel estático varía entre 70 y 80 m. Hacia la sierra del sur se profundizan a 120 m debido a la elevación de la superficie del terreno. Del poblado Veintiocho de Mayo hacia el norte de Alcholoaya, el nivel se profundiza de 70 hasta 180 metros, debido a la presencia de la barranca de Metztlán que drena al acuífero.

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para el 2006, se observa que los valores variaban de 2,200 msnm, que se registraban en la porción suroeste y sur del valle, desde donde desciende gradualmente, al igual que la profundidad por efecto de la topografía, a 2,020 msnm rumbo a Alcholoaya (figura 5).

En la Ciudad de Tulancingo el nivel estático se ubica a 2,070 msnm. La dirección preferencial del flujo subterráneo es de sur hacia el noroeste, alimentada por flujos provenientes de los extremos oriental y occidental. En el extremo noroeste se presenta una salida subterránea hacia la zona de la barranca de Metztlán.

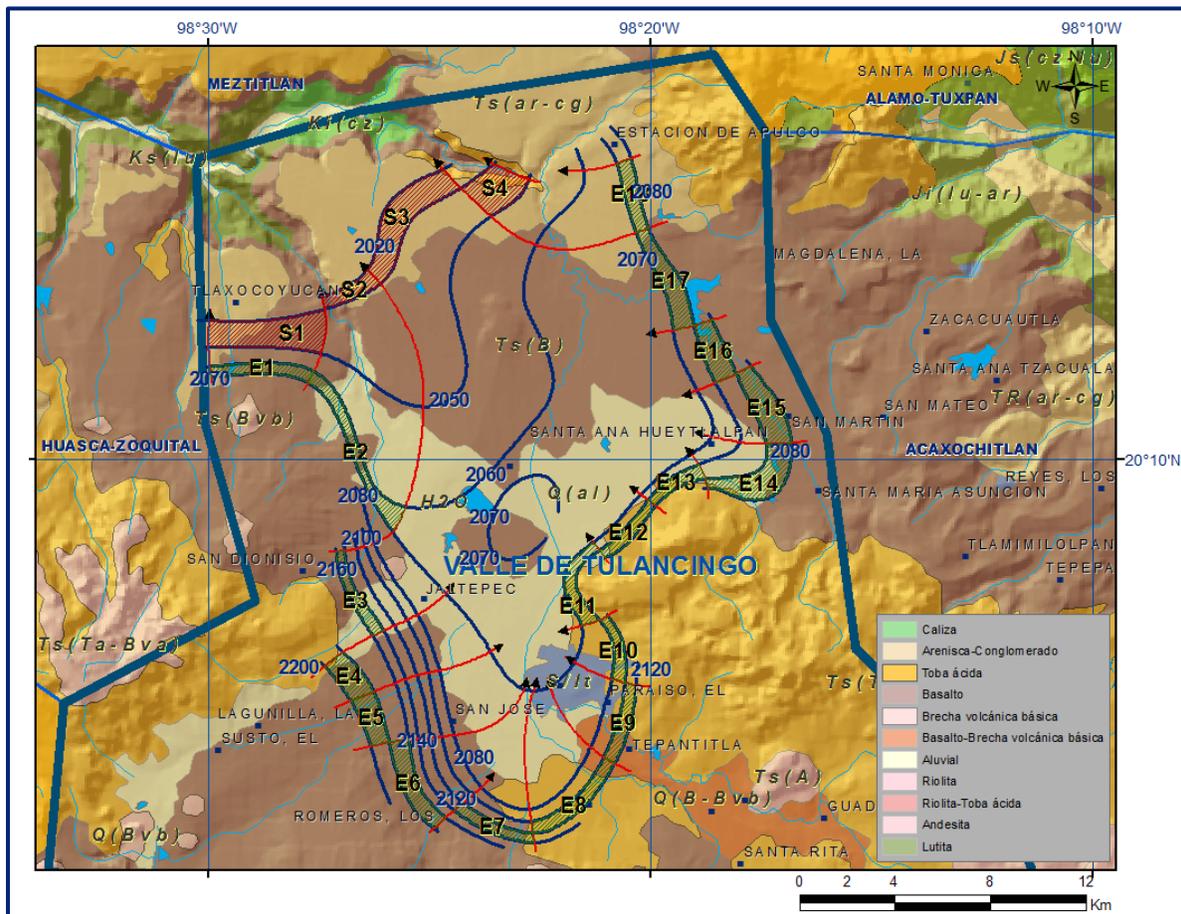


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2006)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático en el periodo 2000 al 2006, se observa que se registran abatimientos que varían de 2 a 6 m. Los mayores abatimientos se registran al norte del valle, entre los poblados Veintiocho de Mayo y Metepec, mientras que en la porción sur del valle la variación del nivel del agua subterránea es de tan sólo algunos centímetros, prácticamente no presenta fluctuaciones (figura 6).

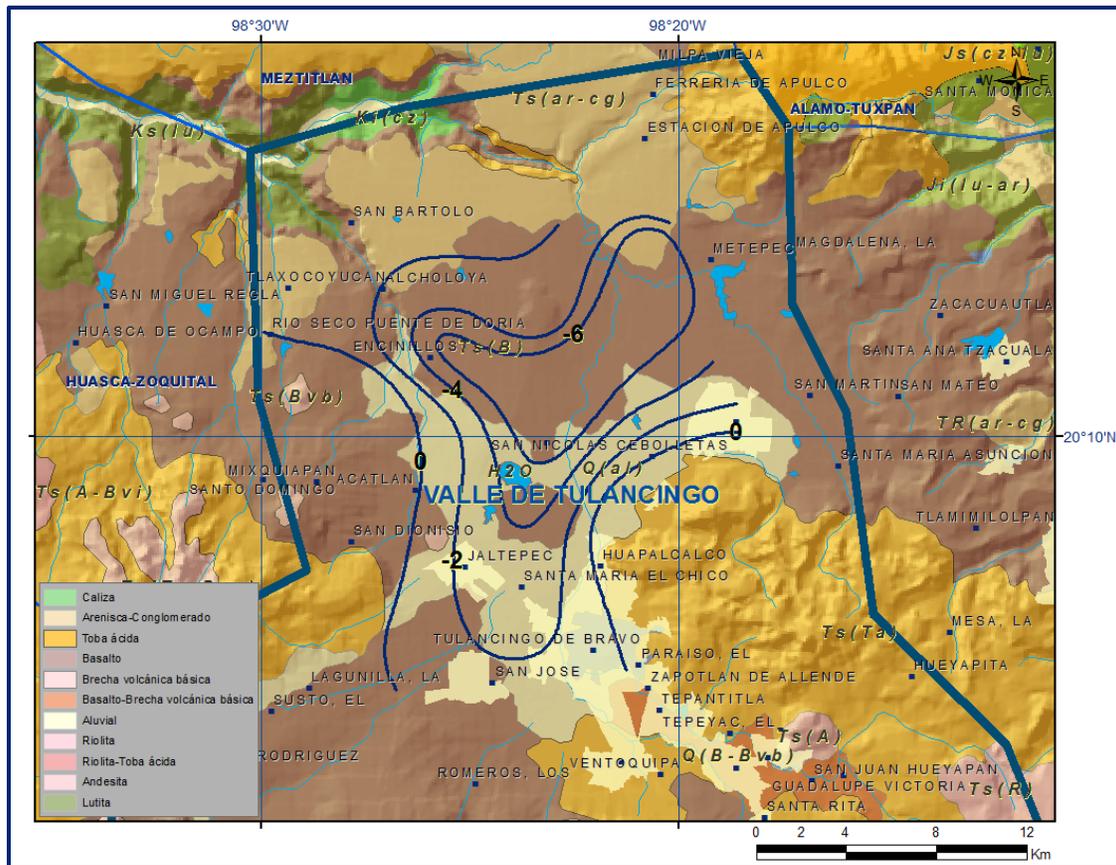


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2000–2006)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En el estudio realizado en 2006, se recolectaron 51 muestras de agua subterránea y de manantiales, distribuidas en la superficie del acuífero, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos como temperatura, conductividad eléctrica, pH, dureza total, iones principales: Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{+2} , F^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{-3} , hierro, manganeso, arsénico, SiO_2 , coliformes fecales y totales y Sólidos Totales Disueltos (STD), para conocer las condiciones de calidad del agua subterránea y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, el agua subterránea del Valle de Tulancingo es apta para consumo humano en cuanto a su salinidad total y a las concentraciones de elementos principales y traza, ya que no rebasan los límites máximos permisibles establecidos en la Modificación de 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. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

La concentración de STD presenta valores que varían de 58 a 526 mg/l, que se incrementan de sur a norte, confirmando la dirección preferencial del flujo subterráneo. Sólo la concentración del hierro de algunas muestras rebasa el límite máximo permisible de 0.3 mg/l, en el manantial de la localidad Zupitlán, por ejemplo; sin embargo, la concentración reportada no ocasiona problemas a la salud de la población, sólo provoca manchas en la ropa e incrustación en las tuberías. También se detectaron concentraciones altas de coliformes fecales y totales que indican contaminación con agua residual.

Las concentraciones de cloruro y sodio son bajas, varían de 0.9 a 53.1 y menores de 29.5 mg/l, respectivamente. El fluoruro también presenta concentraciones bajas, de 0.04 a 0.83 mg/l, inferior al límite máximo permisible que establece la norma mencionada.

Con respecto a las familias del agua de acuerdo a los iones dominantes, predomina la bicarbonatada- sódica, que representa agua de reciente infiltración con tiempo corto de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas.

En cuanto a la calidad del agua para uso agrícola, la mayor parte del agua subterránea corresponde a agua de buena calidad, apropiada para su uso en riego sin restricción alguna.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio realizado en 2006, se registró la existencia de un total de 313 captaciones de agua subterránea, de las cuales 65 están inactivas y 248 activas. Del total de captaciones 272 son pozos, 11 norias, 2 galerías filtrantes y 28 manantiales. Del total de aprovechamientos activos, 143 están destinados al uso agrícola, 60 al público-urbano, 27 al doméstico y abrevadero, 4 al uso industrial y 14 sin uso.

El volumen total de extracción de agua subterránea a través de pozos, norias y galerías filtrantes es de **64.1 hm³/año**.

El principal uso del agua subterránea es el agrícola con 38.1 hm³/año, que representa el 59.4 % de la extracción total, seguido del uso público urbano con 24.0 hm³/año, que corresponde al 37.5 %; para uso industrial se extraen 0.4 hm³/año, que representa el 0.6 % y 1.6 hm³/año, es decir 2.5% para uso doméstico- abrevadero.

Adicionalmente, a través de **manantiales** se descargan **44.8 hm³/año** que se utilizan principalmente para usos agrícola y doméstico.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2000-2006, en una superficie aproximada de **350 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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:

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

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 directamente sobre el valle (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de recarga por flujo subterráneo (Eh). De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas y de la red de abastecimiento de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

Para este caso, debido a que los centros de población, excepto Tulancingo, son pequeños y se encuentran dispersos en todo el valle, para el propósito del balance, únicamente se considera la recarga por retornos de riego.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

La recarga vertical 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:

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

Donde:

R_v =	Recarga vertical;
E_h =	Entradas por flujo horizontal subterráneo;
R_i =	Recarga inducida;
S_h =	Salidas por flujo horizontal subterráneo;
B =	Bombeo;
D_m =	Descarga a través de manantiales;
$\Delta V(S)$ =	Cambio en el volumen almacenado;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, 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 para el año 2006 (figura 5). 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 (m³/s)

T = Transmisividad (m²/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

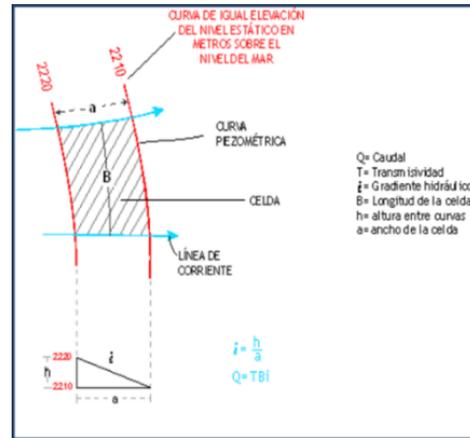


Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal (2006)

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	4002.00	441.00	10	0.0227	0.0005	0.0454	1.43
E2	7077.00	396.00	10	0.0253	0.0005	0.0894	2.82
E3	3764.00	379.00	20	0.0528	0.0030	0.5959	18.79
E4	1933.00	1037.00	20	0.0193	0.0020	0.0746	2.35
E5	2095.00	845.00	20	0.0237	0.0010	0.0496	1.56
E6	3890.00	659.00	20	0.0303	0.0005	0.0590	1.86
E7	3330.00	456.00	20	0.0439	0.0010	0.1461	4.61
E8	4296.00	537.00	20	0.0372	0.0010	0.1600	5.05
E9	3100.00	644.00	20	0.0311	0.0010	0.0963	3.04
E10	2787.00	454.00	20	0.0441	0.0050	0.6139	19.36
E11	3792.00	544.00	10	0.0184	0.0050	0.3485	10.99
E12	2801.00	410.00	10	0.0244	0.0005	0.0342	1.08
E13	2434.00	487.00	20	0.0411	0.0005	0.0500	1.58
E14	4090.00	1057.00	20	0.0189	0.0005	0.0387	1.22
E15	3447.00	1045.00	20	0.0191	0.0005	0.0330	1.04
E16	2496.00	968.00	20	0.0207	0.0005	0.0258	0.81
E17	4444.00	742.00	10	0.0135	0.0005	0.0299	0.94
E18	2979.00	587.00	10	0.0170	0.0005	0.0254	0.80
Total entradas							79.3

La recarga total por flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se puede observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **79.3 hm³/año**. Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los valores obtenidos de la interpretación de las pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de cada zona.

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

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 las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

A esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego. Su valor se calculó estimando un coeficiente de infiltración de 15 % del volumen de agua utilizada para la agricultura.

Considerando que este volumen es de 44.4 hm³ anuales, de los cuales 38.1 hm³ corresponden a agua subterránea y 6.3 hm³ aguas superficiales, la recarga por retornos de riego es de 6.7 hm³ anuales. **Ri = 6.7 hm³ anuales.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo (B), descarga a través de manantiales (Dm) y salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh). No existen descargas por evapotranspiración (ETR) ni flujo base (Dfb).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción de agua subterránea por bombeo es de **64.1 hm³/año.**

7.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)

El caudal estimado de las descargas a través de los 28 manantiales es de 1420 lps, que representan un volumen de **44.8 hm³/año.**

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas por flujo subterráneo se calcularon de la misma manera que las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático (figura 5).

El cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que su valor es de **4.6 hm³ anuales**, que descargan hacia la Barranca de Meztlán, ubicada al noroeste del acuífero.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2006)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	4625.00	1177.00	10	0.0085	0.0005	0.0196	0.62
S2	2277.00	627.00	20	0.0319	0.0010	0.0726	2.29
S3	5407.00	1096.00	20	0.0182	0.0005	0.0493	1.56
S4	1930.00	1693.00	10	0.0059	0.0005	0.0057	0.18
Total entradas							4.6

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático en el periodo 2000-2006 (figura 6). Con base en ella y considerando un rendimiento específico promedio $S_y = 0.07$, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 350 km^2 , mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km^2);

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

Considerando que en la zona de balance el abatimiento promedio calculado es de 0.43 m , entonces: $\Delta VS = (350 \text{ km}^2) (- 0.43 \text{ m}) (0.07) = -10.5 \text{ hm}^3$

Por lo tanto **$\Delta V(S) = -10.5 \text{ hm}^3$ anuales.**

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se procedió a evaluar la recarga vertical por lluvia y por las infiltraciones a lo largo del cauce de ríos y arroyos, mediante la expresión (2) que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned} R_v &= \pm \Delta V(S) + B + S_h + D_m - E_h - R_i \\ R_v &= - 10.5 + 64.1 + 4.6 + 44.8 - 79.3 - 6.7 \\ R_v &= 17.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, las entradas horizontales subterráneas y la recarga inducida.

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 17.0 + 79.3 + 6.7 \\ R &= 103.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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, que, en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua subterránea;
- 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 a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para el caso del acuífero Valle de Tulancingo, su valor es de **103.0 hm³/año**, que corresponden a la recarga natural y recarga inducida.

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 Valle de Tulancingo, el volumen de las descargas naturales comprometidas corresponde a la descarga a través de manantiales que está comprometida como agua superficial y las salidas por flujo subterráneo hacia la Barranca de Meztlán. Por lo tanto, **DNC = 49.4 hm³/año**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **76,191,802 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 Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, 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.

Por lo tanto, la disponibilidad de aguas subterráneas, de acuerdo a la expresión (3), es:

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 103.0 - 49.4 - 76.191802 \\ \text{DMA} &= -22.591802 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **22,591,802 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1991. Exploración Geofísica Complementaria en diversas zonas del Estado de Hidalgo como apoyo al convenio de perforación. Elaborado por Exploraciones Coordinadas, S.A. de C.V.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1973. Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Tulancingo en el Estado de Hidalgo. Realizado por Servicios Geológicos, S.A.