



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO HUAMANTLA (2903), ESTADO DE
TLAXCALA**

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.....	8
3.1	Provincia fisiográfica.....	8
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrografía	9
3.4	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGÍA.....	10
4.1	Estratigrafía	11
4.2	Geología Estructural.....	14
4.3	Geología del subsuelo.....	16
5	HIDROGEOLOGÍA.....	16
5.1	Tipo de Acuífero.....	16
5.2	Parámetros hidráulicos.....	17
5.3	Piezometría	17
5.4	Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1	Profundidad al nivel estático	18
5.4.2	Elevación del nivel estático	19
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	19
5.5	Hidroggeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	22
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	22
7.1	Entradas.....	23
7.1.1	Recarga vertical (Rv)	23
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	24
7.1.3	Recarga incidental.....	25
7.2	Salidas.....	25
7.2.1	Bombeo (B)	26
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	26
7.2.3	Descarga de manantiales (Dm).....	26
7.3	Cambio de almacenamiento (CVA).....	26
8	DISPONIBILIDAD	27
8.1	Recarga total media anual (R)	28
8.2	Descarga natural comprometida (DNC)	28
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	28
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	29
9	BIBLIOGRAFÍA	30

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 Huamantla, definido con la clave 2903 por la Comisión Nacional del Agua se localiza en la porción suroriental del estado de Tlaxcala, en el límite con los estados de Puebla y Veracruz, entre los paralelos 19°09' y 19°31' de latitud norte y entre los meridianos 97°37' y 98°02' de longitud oeste; cubriendo una superficie aproximada de 852 km².

Limita al norte con los acuíferos Emiliano Zapata, del estado de Tlaxcala, y Tecolutla del estado de Veracruz; al este y sureste con el acuífero Libres-Oriental, perteneciente al estado de Puebla; al sur con Valle de Tecamachalco, del estado de Puebla; y al oeste con el acuífero Alto Atoyac del estado de Tlaxcala.

Geopolíticamente el área del acuífero comprende totalmente los municipios de Altzayanca, Cuapixtla, El Carmen Tequexquitla, Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos e Ixtenco, casi la totalidad de Huamantla y parcialmente los municipios de Terrenate, Tocatlán, Xalostoc, todos pertenecientes al Estado de Tlaxcala. (Figura 1)

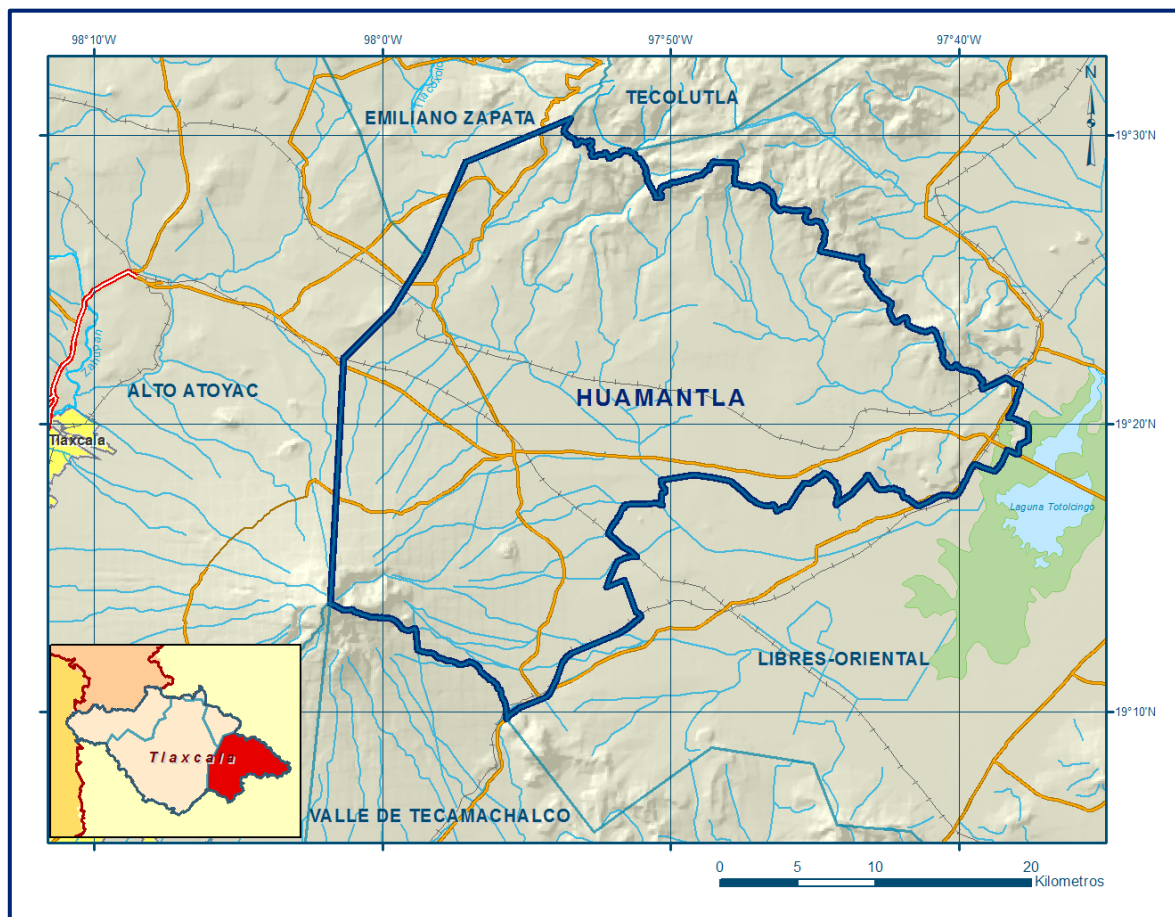


Figura 1. Localización del Acuífero

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

ACUIFERO 2903 HUAMANTLA

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	1	49.7	19	13	45.8	
2	98	1	21.5	19	22	15.5	
3	97	59	43.4	19	23	53.0	
4	97	58	32.6	19	25	47.2	
5	97	57	7.4	19	29	4.6	
6	97	53	29.3	19	30	34.3	DEL 6 AL 7 POR EL LIMITE ESTATAL
7	97	51	31.7	19	29	27.1	DEL 7 AL 8 POR EL LIMITE ESTATAL
8	97	55	41.7	19	9	45.4	DEL 8 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	98	1	49.7	19	13	45.8	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Huamantla pertenece al Organismo de Cuenca IV “Balsas”, al Consejo de Cuenca “Balsas”, instalado el 26 de marzo de 1999 y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Tlaxcala. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del *“DECRETO que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la cuenca cerrada denominada Oriental, en los Estados de Puebla y Tlaxcala”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 Agosto de 1954.

Esta veda es de tipo III la cual permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

La región suroccidental del acuífero se encuentra dentro del Parque *Nacional “Malinche o Matlalcueyatl”*, publicado en el DOF el 06 de octubre de 1938.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos de Materia de Agua 2024, el acuífero Huamantla se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito ni unidad de riego alguna. Los usuarios se encuentran organizados en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero Huamantla-Libres-Oriental-Perote, A.C., instalado el 6 de junio de 2001.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

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

ACTIVIDADES DE CARÁCTER GEOHIDROLÓGICO EN LAS ZONAS DE ALTZAYANCA-HUAMANTLA Y CUAPIAXTLA EN EL ESTADO DE TLAXCALA.

Realizado en 1981 por ACUAPLAN, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). El estudio tuvo como objetivo conocer las condiciones geohidrológicas que prevalecen en los valles de Alzayanca y Cuapiaxtla, y su interconexión hidráulica, así como la calidad del agua subterránea. Realiza el censo de 133 aprovechamientos, toma de 40 muestras para su análisis en laboratorio, nivelación de 51 pozos, 22 sondeos eléctricos verticales a profundidades de exploración de 250 a 375 m y 15 pruebas de bombeo.

Concluye que la calidad del agua es buena en toda el área excepto la porción oriental, en donde se registraron concentraciones de sólidos totales disueltos mayores de 1,000 ppm.

La extracción por bombeo se calculó en 10 hm³/año, pero no se menciona el volumen de recarga total.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA DE HUAMANTLA-CUAPIAXTLA, EN EL ESTADO DE TLAXCALA.

Realizado en 1984 por FOTOIN, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Este estudio tuvo como objetivos actualizar la condición geohidrológica y el grado de explotación del acuífero Huamantla-Cuapiaxtla, estimar la recarga y descarga y emitir recomendaciones para su futura explotación.

Realiza el censo de 206 aprovechamientos, 35 sondeos eléctricos verticales, distribuidos en 5 secciones y 12 pruebas de bombeo.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA CUENCA DE ORIENTAL, PUEBLA. Realizado en 1985 por la Subdirección de Geohidrología de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

Evalúa la extracción en la cada una de partes de la cuenca que pertenece a los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz Concluye que existe una disponibilidad de 50 hm³/año en la subcuenca Huamantla, pero debido a que la evaluación se realizó para un periodo de lluvias extraordinarias, se consideró sobrevalorado, razón por la cual se definió que no era suficiente para satisfacer las demandas proyectadas por el Gobierno del estado de Puebla y la

Comisión de Aguas del Valle de México. La salinidad del agua subterránea era baja, excepto en las proximidades de la Laguna Tepeyahualco y los axalapascos Alchichica, Quechulac y La Preciosa.

TRABAJOS DE PIEZOMETRÍA Y NIVELACIÓN DE BROCALES DE POZOS EN LOS ESTADOS DE TLAXCALA, PUEBLA Y AGUASCALIENTES. Realizado en 1990 por Técnicos Asesores y Constructores S.A. de C.V. (TACSA) para la Comisión Nacional del Agua. Este estudio tuvo como objetivo principal realizar la piezometría y nivelación de brocales de pozos. En lo que respecta al área de Huamantla, confirma que la dirección del flujo subterráneo es NW-SE, ubicando las zonas de recarga al norte de Huamantla, en las inmediaciones de Altzayanca y en el flanco oriental del Volcán La Malinche. Registra niveles estáticos que varían, de acuerdo a la topografía, de 5 a 110 m; y la evolución del nivel estático para el periodo 1985-1990, identificando abatimientos de 1 a 3 m, es decir un promedio de 0.2 a 0.6 m anuales.

ESTUDIO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL EN LA CUENCA DE ORIENTAL, ESTADOS DE PUEBLA, TLAXCALA Y VERACRUZ. Realizado por Federico Mooser en 1996.

El estudio tuvo como objetivo definir el modelo hidrogeológico y la geología estructural de la cuenca para localizar sitios adecuados para la perforación de pozos de abastecimiento complementario a la ciudad de Puebla. Identifica un sistema acuífero formado por dos acuicludos, uno superior y otro medio, constituidos por arcillas lacustres; el primero de escaso espesor que solo se restringe a las zonas lagunares, y el otro de hasta 200 m de espesor en el valle de Huamantla pero que tiende a desaparecer al este, en el centro de la cuenca.

Entre ambas unidades se presenta la unidad acuífera superior constituida por sedimentos aluviales, rocas volcánicas y lahares del Volcán La Malinche. El espesor de los depósitos aluviales es de aproximadamente 200 m en la fosa Malinche-Pico de Orizaba y de 150 m en la fosa Aljojuca.

ESTUDIO DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO PARA EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA EL PROGRAMA DE DESARROLLO REGIONAL ANGELÓPOLIS. Realizado en 1996 por Grupo de Ingeniería en Consultoría y Obras, S.A. de C.V para el Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla (SOAPAP). Identifica 901 captaciones en la cuenca Libres-Oriental, que extraen 150 hm³/año: 103 hm³ en territorio del estado de Puebla, 44 hm³ en el de Tlaxcala y 3 hm³ en la porción que le corresponde al Estado de Veracruz; de los cuales el 80 % se destina al uso agrícola. Calcula una recarga de 210 hm³/año, por lo que concluye que puede incrementarse la extracción de agua

subterránea en unos 90 hm³/año, con la siguiente distribución tentativa por entidad: 65 hm³ en Puebla, 20 hm³ en Tlaxcala y 5 hm³ en Veracruz. Se identifican salidas por evaporación en la Laguna Totolcingo, de aproximadamente 60 hm³ anuales y otro volumen no cuantificado que fluye subterráneamente a través de las calizas que subyacen al relleno aluvial. La evolución de los niveles del agua subterránea no muestra cambios significativos, con excepción del valle de Huamantla.

REACTIVACIÓN DE LA RED DE MONITOREO DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DE ORIENTAL, QUE SE ENCUENTRA EN LOS ESTADOS DE PUEBLA, TLAXCALA Y VERACRUZ. Realizado en 1997 por UNITECNIA S.A. de C.V para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo fue analizar y evaluar los sistemas de monitoreo propuestos en años anteriores para definir una red óptima. En ella se miden los niveles estáticos y se obtiene la elevación. Con esta información traza las configuraciones de profundidad y elevación correspondientes.

MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUÍFEROS DE: VALLE DE PUEBLA, ESTADO DE PUEBLA; ALTO ATOYAC, ESTADO DE TLAXCALA; HUAMANTLA-LIBRES ORIENTA-PEROTE, ESTADOS DE TLAXCALA, PUEBLA Y VERACRUZ Y TECAMACHALCO, ESTADO DE PUEBLA. Realizado en 2002 por Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente, S.C. (SIIMA, S.C.), para la Comisión Nacional del Agua. Actualiza la piezometría en la cuenca Huamantla-Libres Oriental-Perote, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, tomando como base la información piezométrica de los años previos. Se elaboraron configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático para año 2002, así como de evolución para el periodo 1997- 2002.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO DE HUAMANTLA, EN EL ESTADO DE TLAXCALA. Realizado en 2014 por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C. para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo general actualizar el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, generar información hidrogeológica para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea, así como identificar las causales de interés y utilidad públicos para establecer la fundamentación y motivación requeridas para la emisión del ordenamiento procedente que aplique en toda la superficie del acuífero. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, análisis de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizarán en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

Fisiográficamente la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Raisz E., 1964). De acuerdo a la clasificación fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1997), el área que cubre el acuífero se encuentra localizada en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, Subprovincia Fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac.

El Eje Neovolcánico se caracteriza por una serie de cadenas montañosas de origen volcánico y por su complejidad en la composición de las rocas que varía de basáltica a riolítica, producto de eventos lávicos y piroclásticos; las geoformas volcánicas presentan edades que varían desde mediados del Terciario al Reciente. Comprende parte de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, Estado de México, Tlaxcala, Distrito Federal, Hidalgo, Puebla, y Veracruz.

La integran grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas. Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico" integrado por: Volcán de Colima, Tancítaro, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (La Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19°; que representan el trazo de la gran Falla Clarión.

La Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se caracteriza por estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, construidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas a partir de antiguas cuencas lacustres, donde aparecen algunas elevaciones y sierras formadas por estratovolcanes aislados

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en el acuífero predomina el clima templado subhúmedo con invierno frío y régimen de lluvias en verano que representan menos del 5% del total anual, temperatura media anual entre 12 y 18 °C; solamente en una pequeña porción ubicada en el extremo oriental, en las inmediaciones de la localidad de Villa de El Carmen Tequexquitla, se presenta un clima semiseco templado.

En las faldas del Volcán La Malinche se presenta un clima semifrío subhúmedo y en la cumbre del volcán el clima es frío. Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 10 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: 2 ubicadas en territorio del estado de Puebla: Quimixtlán y Libres (SMN) y 8 en territorio del estado de Tlaxcala: Cuapiaxtla, El Carmen, Huamantla, Zitlaltepec, Tocatlán, Toluca de Guadalupe, Terrenate y Altzayanca; con registro histórico que comprende el periodo 1978-2013.

Con ella se generó la configuración de isotermas, isoyetas y de igual valor de evapotranspiración, resultando valores promedio anuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración de **653 mm**, **13.2 °C** y **484 mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El acuífero Soltepec, se localiza en la Región Hidrológica 18 “Río Balsas”, Subregión Hidrológica Alto Balsas, cuenca del Río Atoyac, subcuenca Laguna de Totolcingo.

Las corrientes principales que drenan el área son los arroyos Tecuac, La Caldera, Santa Ana Ríos y San Diego, los cuales son afluentes del Arroyo Xonecuila el cual recibe este nombre fuera de los límites del acuífero, así como el arroyo Altzayanca; todos ellos de carácter intermitente. Ambos arroyos, Altzayanca y Xonecuila, drenan hacia la Laguna Totolcingo.

No existe infraestructura hidráulica para el aprovechamiento de los escurrimientos superficiales.

3.4 Geomorfología

Geomorfológicamente, la zona está considerada como una cuenca del tipo endorreico, cuyos límites naturales están conformados por sierras volcánicas en su mayoría; contiene también grandes llanos cortados por cañadas y barrancas, así como altos volcanes como La Malinche en su región suroccidental, que se eleva hasta alcanzar 4,461 msnm. El patrón de drenaje es del tipo radial centrífugo, con una densidad y profundidad de disección moderada a alta en las zonas con fuerte pendiente y baja o nula a medida que ésta disminuye.

Las topoformas presentes en el acuífero son: Llanura aluvial con lomerío, llanura aluvial con lomerío de piso rocoso o cementado, llanura con lomerío, llanura con piso rocoso o cementado, meseta basáltica escalonada con lomerío, sierra volcánica con estratovolcanes o estratovolcanes aislados y sierra volcánica de laderas escarpadas.

4 GEOLOGÍA

La geología regional ha sido modelada por la actividad volcánica del Eje Neovolcánico, que le imprime su perfil característico. A nivel regional, predominan los afloramientos de rocas volcánicas de diferente composición: riolitas, andesitas, basaltos, tobas y brechas volcánicas; así como diversas asociaciones de ellas. Existen además sedimentos lacustres y brechas sedimentarias

Las unidades estratigráficas más antiguas del estado de Tlaxcala, son las rocas sedimentarias calcáreas cretácicas, seguidas por los depósitos clásticos continentales de ambiente lacustre que, de acuerdo con su litología, son clasificados como asociaciones alternantes de areniscas, calizas y lutitas. Es posible que estas rocas correspondan al Terciario Inferior ya que se encuentran cubiertas por derrames andesíticos y tobas intermedias del Terciario Superior (Mioceno).

Las tobas ácidas, que afloran de manera aislada y restringida en la superficie del estado, pertenecen también al Terciario Superior (Plioceno) (figura 2).

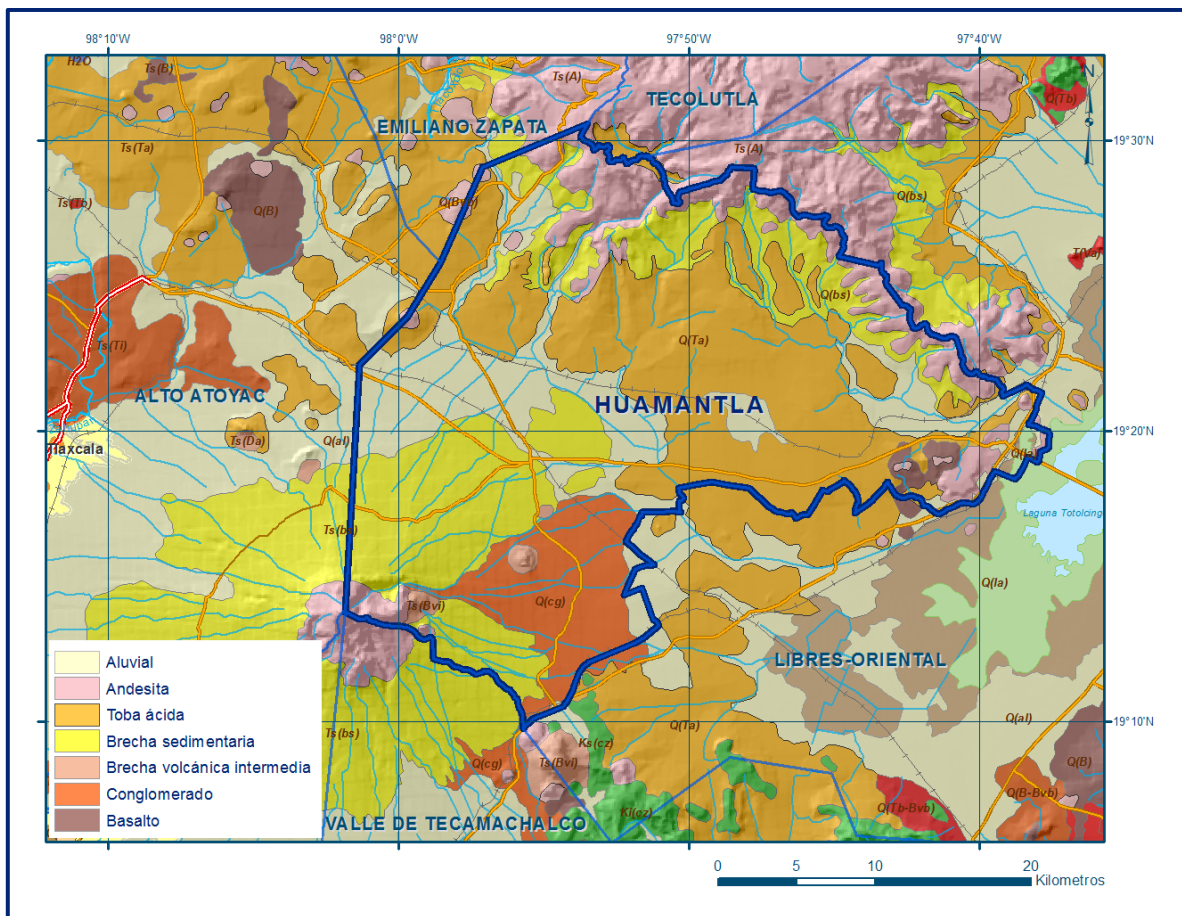


Figura 2. Geología general del acuífero

En este mismo periodo, los agentes de denudación fluviales y fluvio-glaciares iniciaron una actividad intensa que condujo a la nivelación de un relieve activo.

Así se formaron grandes cuerpos de depósitos fluvio-glaciares (brechas sedimentarias) en las faldas de volcanes andesíticos como La Malinche, entre otros. Durante el Cretácico imperó una estabilidad tectónica en la región que propició la precipitación de carbonatos.

A principios del Terciario se interrumpe la sedimentación debido a la fase tectónica intensa de la Orogenia Laramide caracterizada por esfuerzos compresivos, ocasionando que los depósitos se plegaran y emergieran, posteriormente se erosionaran dando lugar al depósito de conglomerados. Durante el Terciario Medio se produjeron emisiones volcánicas de composición riolítica, andesítica y basáltica.

El vulcanismo ocasionó condiciones endorreicas de la cuenca, permitiendo el depósito de materiales producto de la denudación en un medio lacustre. Posteriormente, durante el Plioceno-Pleistoceno, se presentó el doble fallamiento de Tlaxcala y Tetlatlauca.

Lo que provocó el fracturamiento que dio lugar a nuevas emisiones de lava y cenizas de composición basáltica que formaron conos más recientes, así como tobas arenosas.

En el Plioceno Superior las emisiones volcánicas disminuyeron y se depositaron tobas y abanicos aluviales; este fenómeno se presentó nuevamente durante el Cuaternario. Actualmente se siguen acumulando depósitos de origen aluvial y lacustre.

Localmente, la geología de la zona de estudio está dominada por rocas de origen volcánico, entre las cuales destacan tobas dacíticas en las inmediaciones del Volcán La Malinche, tobas andesíticas con intercalaciones de derrames andesíticos muy fracturados en la mayor parte del Valle de Huamantla; lavas andesíticas y dacíticas afloran en la sierra del norte del valle, las cuales a profundidad funcionan como basamento impermeable del acuífero; tobas riolíticas se presentan en una pequeña porción al este de El Carmen Tequexquitla y limos y arenas al sureste de la ciudad de Huamantla.

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica de la región en la que se localiza el acuífero está constituida por rocas volcánicas de diferente composición, de basáltica a riolítica, y sedimentarias, cuya edad varía del Cretácico al Reciente. A continuación, se describen las unidades en orden cronológico de la más antigua a la más reciente:

CRETÁCICO

Aunque no afloran las rocas de esta edad, se conoce su presencia en la Cuenca de Zongolica, aflorando en los acuíferos vecinos Libres-Oriental, en el estado de Puebla, y Perote-Zalayeta del estado de Veracruz.

CRETÁCICO INFERIOR-SUPERIOR

Formación Orizaba

Constituida por calizas arrecifales con abundante fauna bentónica que representan un cambio de facies de cuenca de la Formación Tamaulipas Superior.

Por lo general, se presenta en forma masiva y únicamente en las zonas de transición o cambio de facies se encuentra estratificada; forma grandes bancos con abundantes fragmentos de mega fósiles tales como caprínidos, gasterópodos (turritelas y nerineas), corales y fragmentos de pelecípodos, que le asignan una edad Albiano-Cenomaniano.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Guzmantla

Sobreyace de manera transicional a la Formación Orizaba y está constituida por calizas de color pardo a crema, dispuestas en capas potentes, alteradas por disolución y cubiertas por gruesas capas de caliche que la enmascaran en superficie y que se encuentran parcialmente recristalizadas.

Su clasificación de campo varía de mudstone a capas de packstone y grainstone.

El espesor de las capas varía de 0.4 a 2.2 m; en algunas localidades se aprecian capas de caliza clástica y conglomerática y algunos estratos de pedernal. Al igual que la Formación Orizaba, presenta buenas características de porosidad primaria y secundaria.

Formación Maltrata

Está representada por calizas arcillosas de colores gris oscuro y pardo claro, dispuestas en capas delgadas a medianas que varían de 15 a 40 cm de espesor, con intercalaciones muy delgadas de margas y lutitas arenosas de color gris y gris verdoso.

Está cubierta concordantemente por los sedimentos de la Formación Agua Nueva y cubre a su vez, del mismo modo, los sedimentos de la Formación Orizaba. Se presenta en cambio de facies con los sedimentos de las formaciones Agua Nueva y

Guzmantla. Su contenido fósil de radiolarios y foraminíferos permiten asignarle una edad correspondiente al Cretácico Superior.

Formación Méndez

Está constituida por lutitas calcáreas de colores gris azulado y café, con fractura nodular y concoidal, con aislados estratos de areniscas de grano fino color café, que cubren discordantemente a los conglomerados y depósitos aluviales.

Su fracturamiento es típico por el intemperismo, produciéndose un intenso lajamiento y pizarrosidad, que da origen a montículos con apariencia de dunas; subyace discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales.

Su espesor promedio es de 300 m y se correlaciona con los sedimentos de la Formación Mezcala del sur de México. Aparentemente fue depositada en un fondo marino de aguas relativamente profundas, con abundante aporte de material terrígeno fino.

TERCIARIO

Formación Teziutlán

Esta formación volcánica, que toma su nombre de la ciudad de Teziutlán, está constituida principalmente por andesitas y en menor grado por basaltos, cubre una extensión grande entre las sierras altas, sobre las que se localizan los volcanes Cofre de Perote, Pico de Orizaba, Sierra Negra, Sierra Tlaxco y La Malinche. Su composición varía de andesítica a andesítica basáltica y en algunas localidades se observan rocas dacíticas.

Las andesitas basálticas se distinguen por sus fenocristales de plagioclasa, los basaltos por sus fenocristales de olivino en una masa de microlitos de plagioclasa cálcica.

Generalmente tienen baja permeabilidad, pero debido al fracturamiento poseen permeabilidad secundaria.

TERCIARIO SUPERIOR-PLIOCENO

Depósitos lacustres

Unidad constituida por materiales piroclásticos depositados en lagos o condiciones acuosas, que predominaron en las fosas o depresiones originadas después del plegamiento, con predominio de material arcilloso. Afloran al norte de Huamantla y en las porciones planas de la sierra de Tlaxco.

TERCIARIO SUPERIOR-CUATERNARIO-PLEISTOCENO

Sedimentos lacustres

Están conformados por materiales arcillosos evaporíticos cuyo espesor puede ser hasta de 50 m, en los que en ocasiones es posible identificar conchas de moluscos moderadamente bien conservados, como ocurre al suroeste del lago Totolcingo.

Se localizan en las porciones bajas de la cuenca, en las que existen zonas lacustres de tipo intermitente, como son los lagos Totolcingo o El Carmen y Tepeyahualco o El Salado.

CUATERNARIO

Cuaternario Volcánico Andesítico

Unidad constituida por una secuencia de rocas volcánicas andesíticas, que generalmente poseen baja permeabilidad cuando no muestran alteración, pero que por efectos de los esfuerzos asociados a la actividad volcánica reciente de la región circundante, presenta fracturamiento que le confiere permeabilidad por porosidad secundaria.

Depósitos Aluviales

Constituidos por clastos de textura arenosa, de granulometría media a gruesa y, en menor proporción, gravas, producto de la erosión e intemperismo y la alteración de las rocas circundantes que se han disgregado en clásticos, acarreados y depositados. Localmente, están intercalados con arcillas que crean condiciones de semiconfinamiento o confinamiento. El espesor conjunto varía de 100 a 250 m; en esta unidad están perforados la mayor parte de los aprovechamientos.

4.2 Geología Estructural

La tectónica permite sugerir que las rocas más antiguas de la región son producto de vulcanismo submarino asociado al desarrollo de un arco de islas que probablemente inició a finales del Jurásico y continuó hasta el Cretácico Inferior, relacionado con la margen activa del Océano Pacífico.

El periodo Albiano-Cenomaniano se caracterizó por la estabilidad tectónica, que favoreció la precipitación de carbonatos y permitió el desarrollo de las formaciones calcáreas, sedimentación que culmina con un cambio a terrígenos de la Formación Soyatal-Mezcala.

A principio del Terciario se interrumpe esta sedimentación debido a la fase tectónica más intensa de la Orogenia Laramide, caracterizada por esfuerzos compresivos; originando una deformación continua que imprime a las rocas cretácicas pliegues y anticlinales.

Casi contemporáneamente al levantamiento empieza a actuar una fase erosiva con sedimentación molásica representada por la Formación Balsas, también contemporáneamente se desarrolla el evento magmático de la Sierra Madre del Sur que puede estar relacionada con la migración de arcos magmáticos que se distribuyeron a lo largo de la costa del Pacífico (Moran Z. D. et al., 2000), evidenciado por intrusiones graníticas-granodioríticas (Granito Piedras Blancas) y vulcanismo andesítico.

Durante el Mioceno Medio se inicia el desarrollo del Eje Neovolcánico como una serie de eventos con características vulcanológicas y estructurales muy particulares cuyas rocas, caracterizadas por la abundancia de andesitas y dacitas, son típicas de una provincia calcoalcalina. El Eje Neovolcánico se originó por un proceso de subducción en el que la placa que se introduce en forma oblicua respecto de la fosa, presenta variantes en sus características como espesor, densidad, edad, distancia, ángulo de subducción, composición, etc, además de otros eventos que lo afectaron como son:

El choque de la antigua cresta del Pacífico que influyó en la tectónica de la porción occidental de México o como el cambio de la rotación de la Placa de Cocos, la influencia del sistema de fallas Polochic-Motagua y la rotación de la Placa Norteamericana, causas que generan un campo de fuerzas muy particular que permiten el ascenso de magmas a través de superficies de debilidad (Carta Geológico-Minera “Ciudad de México” E13-2, escala 1:250,000. SGM, 2002).

De manera regional, la zona se encuentra en una fosa tectónica orientada en sentido norte-sur, conocida como “Graben Libres-Oriental”, limitada al norte por el macizo de Teziutlán, al sur por la Sierra Cuesta Blanca, al oriente por el sistema de fallas que cortan la región occidental de la cadena volcánica formada por los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba, y al poniente con La Malinche y la sierra calco-terrágena representada por la Sierra Madre Oriental.

Específicamente en la zona del acuífero, la actividad volcánica se ha presentado en diferentes épocas geológicas, siendo la dinámica volcánica del Mioceno la que formó los paisajes de la zona. Durante el Terciario los agentes de denudación fluvial y fluvio-glaciares iniciaron una actividad intensa que condujo a la nivelación de un relieve activo. De esta manera, se formaron grandes cuerpos de depósitos fluvio-glaciares en las faldas de volcanes como La Malinche, entre otros.

En el período Terciario Superior la actividad volcánica alcanzó una gran intensidad, la cual se repitió en el Cuaternario; los últimos derrames basálticos Cerraron las salidas y se formaron cuencas endorreicas.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, geofísica e hidrogeológica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales, fluviales, brechas de granulometría variada, depósitos vulcanoclásticos y lacustres, que constituyen los cauces de los arroyos y los valles, cuyo espesor puede alcanzar algunas decenas de metros en el centro de las depresiones.

La porción inferior del acuífero se aloja en una secuencia de rocas volcánicas, principalmente tobas andesíticas, andesitas y basaltos, así como rocas calizas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento hidrogeológico del acuífero están representadas por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias al desaparecer el fracturamiento a profundidad. Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas e interestratificados con depósitos arcillosos.

La alternancia de rocas que no presentan fracturamiento con depósitos aluviales, forman acuíferos locales independientes; en las laderas de las sierras se pueden presentar acuíferos colgados en medio el fracturado.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero en general de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, que presenta condiciones locales de semiconfinamiento en la región central debido a la presencia de depósitos lacustres; constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales, brechas de granulometría variada, depósitos vulcanoclásticos y lacustres entremezclados, con nivel profundo de saturación.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas (principalmente tobas, andesitas y riolitas) y sedimentarias marinas (calizas), que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas calcáreas.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por depósitos lacustres. Su espesor saturado

promedio es hasta de 200 m. Forma un mismo sistema hidrogeológico con el acuífero Libres-Oriental.

Las calizas de las formaciones Orizaba y Guzmantla, constituyen un acuífero con potencial hidrogeológico que no ha sido explorado en el acuífero pero que lo ha demostrado en acuíferos vecinos en el estado de Veracruz y que puede presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento, debido a que está sobreyacidos por lutitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

De estudios previos se recopiló información de 27 pruebas de bombeo, en etapas de abatimiento y recuperación, realizadas en el acuífero, así como otras más en los acuíferos vecinos Soltepec y Libres-Oriental, que tienen el mismo origen, constitución y evolución geológica.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad en recuperación que varían de **1.4×10^{-3} a $101.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** y en abatimiento los valores variaron de **1.3×10^{-3} a $145.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores de conductividad hidráulica por su parte varían de **7.6×10^{-6} a $5.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (**0.66 a 43.6 m/d**) en recuperación, mientras que en abatimiento varían de **6.5×10^{-6} a $7.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (**0.56 a 62.6 m/d**)**. Debido a que ninguna prueba contó con pozo de observación, no ha sido posible definir el coeficiente de almacenamiento.**

Sin embargo, debido a la litología tan variada que conforma el acuífero regional, para fines del balance de aguas subterráneas se asignó un valor de rendimiento específico de **0.085**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se cuenta con información piezométrica el periodo 1985-2014.

Se describen las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático correspondiente al año 2014; sin embargo, para el cambio de almacenamiento se eligió el periodo 2002-2013 debido a que presenta mayor información con la mejor cobertura espacial.

Adicionalmente, como el sistema hidrogeológico se extiende a la porción poblana, fue necesario recopilar la información piezométrica histórica tanto del acuífero vecino Libres-Oriental.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático 2014 muestra que valores variaban, de manera general, de 40 a 210 m, incrementándose por efecto de la topografía desde el centro del valle hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero. Las profundidades más someras, de 40 a 60 m, se presentan en dos zonas: en el extremo oriental del acuífero, hacia la población El Carmen Tequexquitla; y en la zona que circunda la porción central, desde Benito Juárez hasta Cuapixtla.

Los niveles más profundos también se presentan en dos zonas, la primera ubicada en la porción centro-norte del acuífero en donde los niveles varían de 120 a 150 m, que se midieron en pozos profundos localizados en las inmediaciones de San José Xicoténcatl y Altzayanca, y la otra zona se localiza hacia las estribaciones del Volcán La Malinche, en donde los niveles del agua subterránea se incrementan de 150 a 210 m por topografía. En la mayor parte de la zona de explotación agrícola las profundidades varían de 40 a 100 m (figura 3).

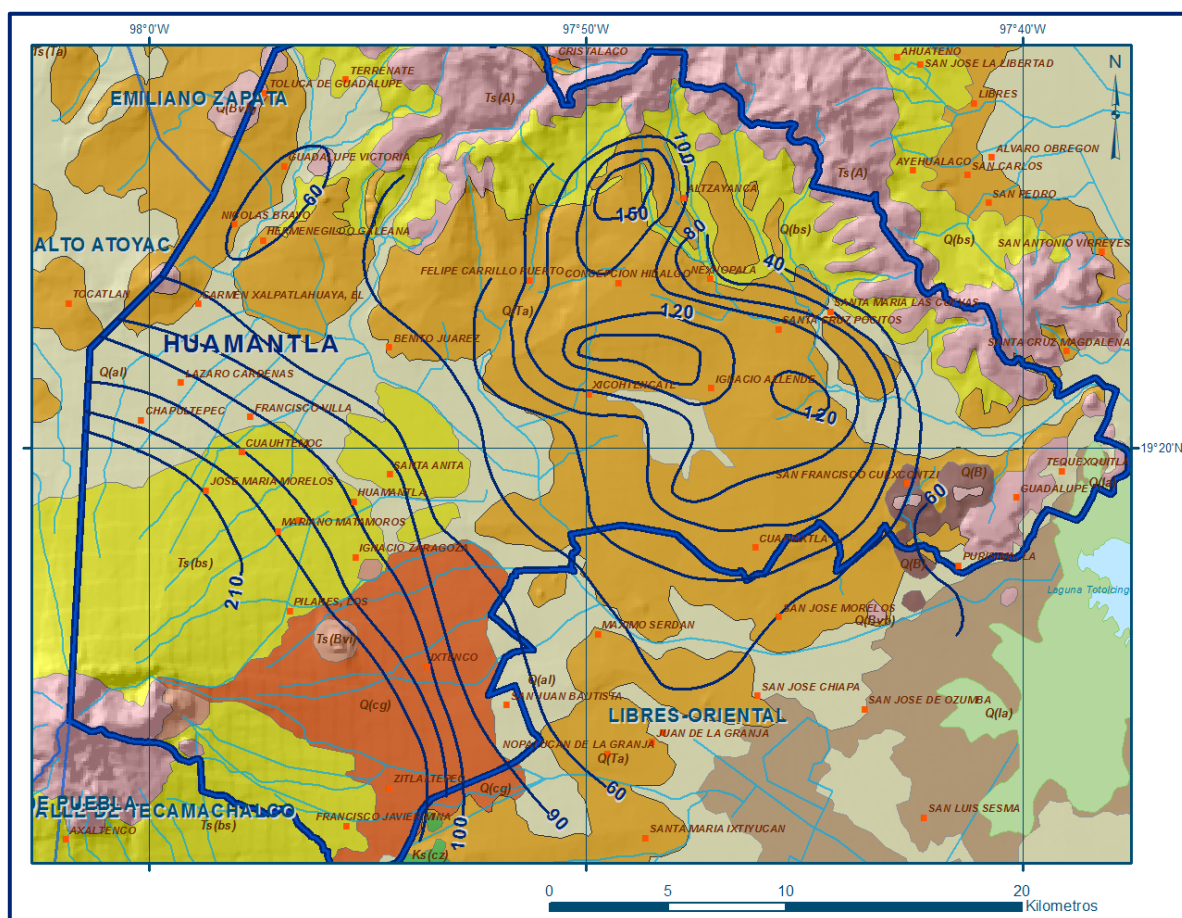


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2014)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2014 se registraron valores que varían 2470 a 2340 msnm, los cuales se incrementan por efecto de la topografía, al igual que la profundidad, desde la porción sur del acuífero, en el límite con el acuífero Libres-Oriental, hacia las elevaciones topográficas que delimitan el acuífero y que representan las principales zonas de recarga. La red de flujo subterráneo muestra una configuración concéntrica hacia esta porción sur, con dirección preferencial norte-sur, alimentada por los flujos provenientes de los extremos oriental y occidental.

En el extremo oriental del acuífero se observa otra dirección de flujo, en sentido noroeste-sureste, que se origina en las inmediaciones del poblado Santa Cruz Pocitos, ubicado al sureste de Alzayanca, hacia el Carmen Tequexquitla y después adopta una dirección oeste-este para salir del acuífero y descargar hacia la Laguna Totolcingo.

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2002-2013, registró abatimientos que variaron de 1.0 a 10.0 m, que representan un ritmo anual que varía de 0.1 a 0.9 m. Los mayores abatimientos, mayores de 4 m, se registran al este de Huamantla, en la zona comprendida entre esta localidad y San José Xicoténcatl.

Es en esta misma zona se presentan abatimientos puntuales de 10 m para el periodo mencionado. En la mayor parte del acuífero los abatimientos varían de 2 a 4 m, es decir un promedio de 3 m, que representan un ritmo de 0.3 m anuales. En la mayor parte del acuífero las variaciones en la posición del nivel del agua no registran cambios significativos durante el periodo analizado (figura 4).

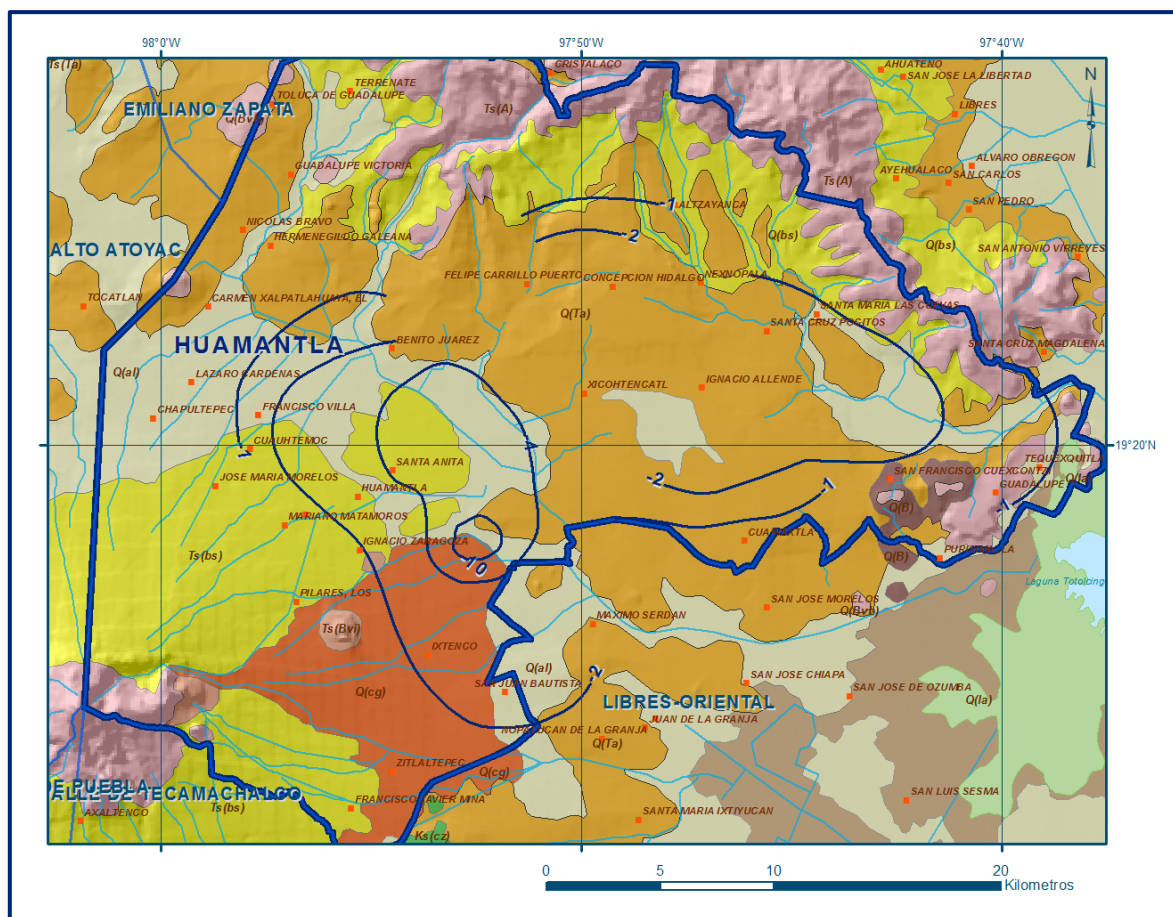


Figura 4. Evolución del nivel estático en m (2002-2013)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2014, se tomaron 30 muestras de agua subterránea en pozos para uso público-urbano distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron 45 parámetros fisicoquímicos y biológicos, entre los que destacan iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, alcalinidad total, dureza total, sólidos totales disueltos, trihalometanos, bencenos, plaguicidas organoclorados, coliformes fecales, fosfatos y nitrógeno amoniacal, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero

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 NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022., para el agua destinada al consumo humano, ya que su concentración varía de 74 a 282 mg/l.

Algunas muestras presentan concentraciones por arriba del límite máximo permisible del nitrógeno amoniacal, manganeso y coliformes totales. Aunque la concentración de fosfatos no es sancionada por la norma mexicana, se detectó su presencia en concentraciones anómalas en las 30 muestras analizadas, lo cual indica que existe un inadecuado uso de fertilizantes por lo que es importante el monitoreo de este compuesto.

Los demás parámetros analizados se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles que señala y sanciona la norma oficial mencionada. 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 147 a 565 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la porción central y sur del acuífero; en tanto que las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican en las estribaciones de las sierras que lo delimitan.

Ambos valores se incrementan gradualmente en la dirección del flujo subterráneo, de manera concéntrica hacia el extremo sur del acuífero. La temperatura de las muestras de agua varía de 17.4 a 27.3 °C y el pH de 6.7 a 8.7.

Por lo que respecta a las familias de aguas, al analizar los resultados con diagramas de Piper se determinó que la mayor parte de las aguas analizadas pertenecen a la familia bicarbonatada magnésica con influencia sódico-potásica y una porción menor pertenece a la familia bicarbonatada sódico-potásica.

El predominio de los carbonatos indica que el agua es de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas. Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la mayor parte de las muestras de agua analizadas se clasifican como C_1S_1 , que representa bajo contenido de sales y baja concentración de sodio intercambiable; un segundo grupo de muestras se clasifica como C_2S_1 , que representa de salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable. Ambos grupos de agua se consideran aptas para la agricultura sin restricción alguna.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado en el 2014, se registraron un total de 324 aprovechamientos ubicados en los límites geográficos del acuífero Huamantla.

Del total de los aprovechamientos censados, 53 son Inactivos y 271 activos temporal o definitivamente; 300 son pozos profundos, 11 norias, 3 pozos a cielo abierto y 10 manantiales. De acuerdo con el uso, de los 271 aprovechamientos activos, 183 se destinan al uso agrícola, 2 al uso doméstico-pecuario, 2 para uso industrial, 78 se destinan al abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región y 6 para servicios.

El volumen estimado de extracción por bombeo es de **86.9 hm³ anuales**, de los cuales 76.5 hm³ (88.0 %) se utilizan en la agricultura, 9.4 hm³ (10.8%), se destina al abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y 1.0 hm³ (1.2%) para usos doméstico-pecuario, industrial y servicios.

Adicionalmente, a través de los **10 manantiales** se descarga caudal de 60 lps, que equivalen a un volumen de **1.9 hm³ anuales**, 1.7 hm³ para uso público-urbano y 0.2 hm³ para uso doméstico-abrevadero.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Como los niveles del agua subterránea no muestran cambios en 2013 y 2014, debido a que para el año 2013 se tiene mayor apoyo piezométrico, el cambio de almacenamiento del balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2002-2013, en una superficie de **420 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual 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 incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y la infiltración de las fugas en los sistemas de distribución de agua potable y de la red de alcantarillado, constituyen otra fuente de recarga al acuífero; estos volúmenes se agrupan en la variable denominada recarga incidental (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo.

Debido a que se cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Ri:** Recarga incidental
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dm:** Descarga a través de manantiales
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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 2014, mostrada en la figura 4. 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:

$$Q = T * B * i$$

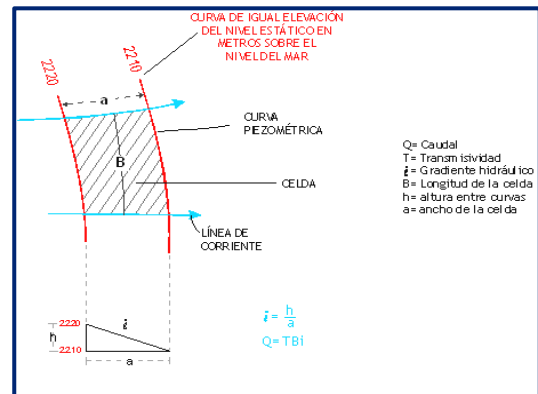
Donde:

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 **49.5 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2014)

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	3410	2500	40	0.01600	0.0025	0.1364	4.3
E2	3865	2725	20	0.00734	0.0025	0.0709	2.2
E3	3070	3635	10	0.00275	0.0005	0.0042	0.1
E4	9090	1135	20	0.01762	0.0010	0.1602	5.1
E5	6135	3410	30	0.00880	0.0080	0.4318	13.6
E6	6480	4090	30	0.00733	0.0080	0.3802	12.0
E7	1930	1705	10	0.00587	0.0030	0.0340	1.1
E8	1135	2500	10	0.00400	0.0030	0.0136	0.4
E9	3635	1480	10	0.00676	0.0050	0.1228	3.9
E10	3410	1590	20	0.01258	0.0050	0.2145	6.8
Total entradas							49.5

7.1.3 Recarga incidental

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 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a los 40 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 82.6 hm³ anuales, de los cuales 76.5 hm³ son de agua subterránea y 6.1 hm³ de agua superficial, el retorno agrícola es de 8.3 hm³ anuales.

Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varía según la zona, para este caso se consideró que el 20 % del volumen destinado al uso público-urbano se convierte en recarga incidental; si el volumen para este uso es de 11.1 hm³ anuales, de los cuales 9.4 hm³ provienen de agua subterránea y 1.7 hm³ de agua de los manantiales, la recarga incidental por infiltración es de **2.2** hm³/año.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh) y través de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **86.9 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2014, mostrada en la figura 4. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **16.0 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2014)

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	7275	1590	10	0.00629	0.0030	0.1373	4.3
S2	2270	3070	10	0.00326	0.0060	0.0444	1.4
S3	8865	1475	20	0.01356	0.0020	0.2404	7.6
S4	3635	1705	20	0.01173	0.0020	0.0853	2.7
Total salidas							16.0

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.

7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

El caudal conjunto que descargan los manantiales es de 60 lps, que representan un volumen anual de 1.9 hm³. **Dm = 1.9 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento (CVA)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2002-2013 (figura 5). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.085, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

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 (km²)

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -97.3 hm^3 , por lo que el promedio anual es de -8.8 hm^3

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento

Evolución (m)	Evolución promedio (m)	Área (km^2)	Sy	$\Delta V(S)$ ($\text{hm}^3/\text{año}$)
-10	-10	2.8	0.085	-2.4
-10 a -4	-7	40.9	0.085	-24.3
-4	-4	2.9	0.085	-1.0
-4 a -2	-3	197.8	0.085	-50.4
-2	-2	5.4	0.085	-0.9
-2 a -1	-1.5	88.1	0.085	-11.2
-1	-1	82.2	0.085	-7.0
Área de Balance		420.0	TOTAL	-97.3
Promedio anual				-8.8

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:

$$\begin{aligned}
 R_v &= B + Sh + D_m \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\
 R_v &= 86.9 + 16.0 + 1.9 - 8.8 - 49.5 - 10.5 \\
 R_v &= 36.0
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 R &= R_v + E_h + R_i \\
 R &= 36.0 + 49.5 + 10.5 \\
 R &= 96.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}
 \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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:

DISPONIBILIDAD
MEDIA ANUAL DE AGUA
DEL SUBSUELO EN UN
ACUÍFERO

RECARGA
TOTAL
MEDIA
ANUAL

DESCARGA
NATURAL
COMPROMETIDA

EXTRACCIÓN DE
AGUAS
SUBTERRÁNEAS

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 **96.0 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de **17.9 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

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 (REPDA), 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 **65,781,599 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 96.0 - 17.9 - 65.781599 \\ \text{DMA} &= 12.318401 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **12,318,401 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua en 2014. Estudio Geohidrológico del Acuífero Huamantla, en el estado de Tlaxcala. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Actividades de Carácter Geohidrológico en las Zonas de Alzayanca-Huamantla y Cuapixtla en el estado de Tlaxcala. Realizado por Acuaplan S.A.