

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE PUEBLA (2104), ESTADO
DE PUEBLA**

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.....	9
3.3. Hidrografía.....	10
3.4. Geomorfología.....	11
4. GEOLOGÍA.....	12
4.1. Estratigrafía.....	13
4.2. Geología estructural.....	21
4.3. Geología del subsuelo.....	23
5. HIDROGEOLOGÍA.....	24
5.1. Tipo de acuífero.....	24
5.2. Parámetros hidráulicos.....	25
5.3. Piezometría.....	26
5.4. Comportamiento hidráulico.....	26
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	26
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	27
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	28
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	29
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	30
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	31
7.1. Entradas.....	31
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	31
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	32
7.1.3 Recarga inducida (Ri).....	33
7.2. Salidas.....	34
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	34
7.2.2 Extracción por bombeo (B).....	34
7.2.3 Descarga de manantiales (Dm).....	34
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	35
8. DISPONIBILIDAD.....	36
8.1 Recarga total media anual (R).....	37
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	37
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	37
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	38
9. BIBLIOGRAFÍA.....	39

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 Valle de Puebla, definido con la clave 2104 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en el extremo occidental del estado de Puebla, en los límites con el Estado de México y Tlaxcala, entre los paralelos 18° 54' y 19° 28' de latitud norte y los meridianos 98° 01' y 98° 40' de longitud oeste; abarcando una superficie aproximada de 2,025 km². Limita al norte con el acuífero Alto Atoyac; al noroeste con Soltepec, ambos del estado de Tlaxcala; al este con el acuífero Valle de Tecamachalco, al sur con los acuíferos Ixcaquixtla y Atlixco-Izúcar de Matamoros; todos ellos pertenecientes al estado de Puebla; al oeste con el acuífero Chalco-Amecameca, perteneciente al Estado de México (figura 1).

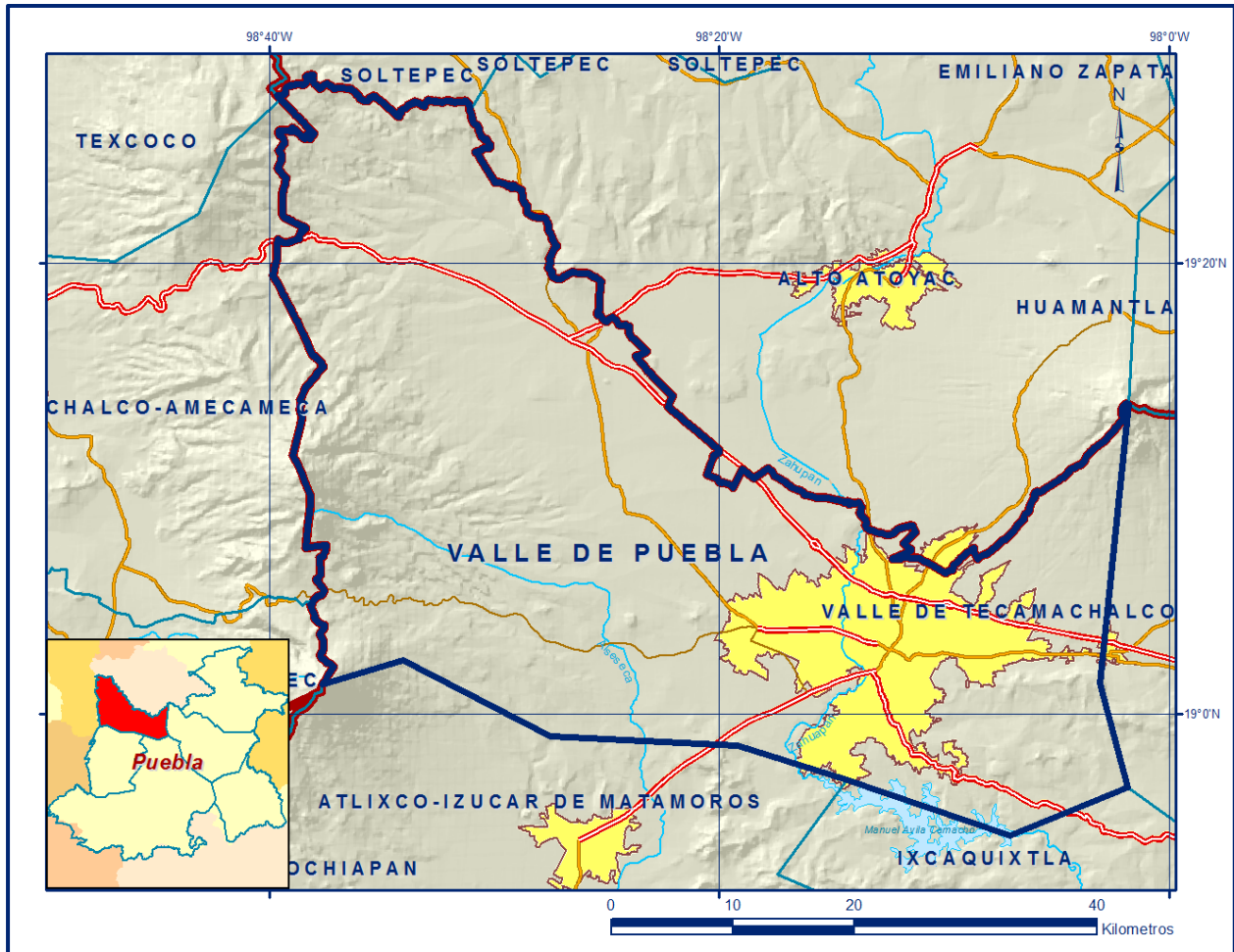


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el área del acuífero comprende en su totalidad los municipios Calpan, Chiahautzingo, Coronango, Cuautlancingo, Domingo Arenas, Huejotzingo, Juan C. Bonilla, Nealtican, San Andrés Cholula, San Felipe Teotlancingo, San Gregorio Atzompa, San Jerónimo Tecuanipan, San Martín Texmelucan, San Matías Tlalancaleca, San Miguel Xoxtla, San Nicolás de los Ranchos, San Pedro Cholula, San Salvador El Verde, Tlahuapan y Tlaltenango; parcialmente los municipios Amozoc, Cuautinchan, Ocoyucan, Puebla, Santa Isabel Cholula y Tianguismanalco.

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan el acuífero

ACUIFERO 2104 VALLE DE PUEBLA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	14	21.2	18	57	4.3	
2	98	19	13.0	18	58	34.9	
3	98	27	31.9	18	59	1.3	
4	98	34	5.1	19	2	22.2	
5	98	37	38.7	19	1	18.8	DEL 5 AL 6 POR EL LIMITE ESTATAL
6	98	39	39.3	19	27	27.6	DEL 6 AL 7 POR EL LIMITE ESTATAL
7	98	31	4.9	19	26	45.7	DEL 7 AL 8 POR EL LIMITE ESTATAL
8	98	1	49.7	19	13	45.8	
9	98	3	6.2	19	1	21.6	
10	98	1	50.8	18	56	44.5	
11	98	7	6.2	18	54	35.4	
1	98	14	21.2	18	57	4.3	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Valle de Puebla pertenece al Organismo de Cuenca IV “Balsas” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Puebla. Su territorio se encuentra parcialmente vedado, casi la totalidad está sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda; en la mayor parte de su superficie rige el “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Zona Meridional del Estado de Puebla”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de noviembre de 1967.

En la porción oriental rige el “Decreto que amplía por tiempo indefinido la veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo establecida para la Zona Meridional del Estado de Puebla”, publicado en el DOF el 30 de agosto de 1969. Ambos decretos son de tipo III, en los que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El extremo suroccidental, que corresponde al municipio San Nicolás de Los Ranchos, no está sujeto a ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Valle de Puebla, clave 2104, se encuentra sujeta a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013.

A través de este, en dicha porción del acuífero, no se permite 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, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, 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 2.

El uso principal del agua es el público-urbano.

El acuífero pertenece al Consejo de Cuencas del Río Balsas decretado el 26 de marzo de 1999. En el territorio que cubre el acuífero se localiza una pequeña parte de Distrito de Riego 056 "Atoyac-Zahuapan". A la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación y prospección, entre los más recientes e importantes, se mencionan los siguientes:

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN EL VALLE DE PUEBLA, realizado por Perforaciones y Estudios Geológicos, S. A. (PEGSA) en 1981 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Este estudio tuvo como objetivos actualizar el censo de aprovechamientos y analizar la posibilidad de extraer 4 m³/s adicionales de agua subterránea para complementar el suministro de agua potable a la ciudad de Puebla. Censaron 1026 aprovechamientos de agua subterránea de los cuales 641 eran pozos 371 norias y 14 manantiales; se nivelaron 45 pozos pilotos; se ejecutaron 28 pruebas de bombeo de corta duración; se obtuvieron 45 muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente y se realizaron 35 sondeos eléctricos verticales en sitios que se recomendaron para perforar pozos.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA DEL RÍO ATOYAC, ESTADO DE PUEBLA, realizado por Lesser y Asociados, S. A. de C.V. en 1982 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Los objetivos principales fueron determinar la condición geohidrológica del acuífero Valle de Puebla y recomendar nuevos sitios para extraer agua del subsuelo; sugiere las zonas de San Martín Texmelucan, San Miguel Xoxtla, Huejotzingo y Tlaltenango. Señala la existencia de dos sistemas acuíferos, el primero presenta espesores variables entre 100 y 200 m, contiene agua de buena calidad con baja concentración de sales. El segundo, situado por debajo del anterior, es termal, con altas concentraciones de sales y gas sulfhídrico, detectado a diferentes profundidades, principalmente en la porción occidental de la ciudad de Puebla.

ESTUDIO DE EXPLORACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA DE PUEBLA, realizado por Lesser y Asociados, S. A. de C.V. en 1989 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Mediante prospección geofísica determina los espesores de los sedimentos lacustres y volcánicos, así como la profundidad, morfología y distribución de las rocas calcáreas que los subyacen, con el propósito de identificar las áreas que presentan las mejores condiciones geohidrológicas para ubicar pozos de exploración o explotación.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL VALLE DE PUEBLA, realizado por Exyco, S.A. en 1990 para la Comisión Nacional del Agua. Sus objetivos principales consistieron en determinar las estructuras que controlan el almacenamiento y flujo de agua subterránea en el valle de Puebla-Tlaxcala, cuantificar la recarga media que recibe el acuífero e identificar áreas favorables para la exploración y explotación de aguas subterráneas que garanticen el abastecimiento futuro de la ciudad de Puebla.

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE PUEBLA, realizado por Exyco, S.A. en 1990 para la Comisión Nacional del Agua. Entre sus actividades principales destacan la realización de un censo de aprovechamientos, piezometría, toma de muestras para análisis fisicoquímicos, ejecución de sondeos eléctricos verticales, así como la interpretación geológica y geohidrológica de imágenes de satélite y fotografías aéreas.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO BÁSICO DEL PROYECTO NEALTICAN, PUEBLA, realizado por Calomel, S.A. de C.V. en 1994 para la Comisión Nacional del Agua.

Sus objetivos principales fueron definir la factibilidad geohidrológica de extraer 500 l/s adicionales de agua subterránea, en una porción localizada entre los municipios de Nealtican y San Pedro Cholula, ubicados al occidente de la ciudad de Puebla; definir las condiciones geohidrológicas y caracterizar los acuíferos para localizar y diseñar los pozos requeridos para complementar el abastecimiento.

Entre sus actividades más importantes destacan la actualización del censo de aprovechamientos y de la hidrometría de las extracciones, ejecución de sondeos eléctricos verticales, pruebas de bombeo, muestreo y análisis de agua. Adicionalmente, incorpora el balance de aguas subterráneas, calidad del agua y construye un modelo matemático preliminar.

REACTIVACIÓN DE LA RED DE MONITOREO DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DE PUEBLA, ESTADO DE PUEBLA, realizado por UNITECNIA, S.A. de C.V. EN 1997 para la Comisión Nacional del Agua. Realiza la piezometría en la red piloto integrada por 79 pozos y propone complementarla con otros más.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS DEL VALLE DE PUEBLA, realizado por Geotecnología, S.A. en 1996 para el Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de Puebla (SOAPAP). Entre sus objetivos principales destacan actualizar el conocimiento del uso y disponibilidad de agua subterránea, recomendar opciones de manejo del acuífero y definir la interconexión de los acuíferos del Valle de Puebla con los de la subcuenca del Río Zahuapan.

Adicionalmente, realizó un modelo matemático de simulación del comportamiento del acuífero. Calcula un volumen de extracción de 316 hm³/año, de los cuales el 52% se destina al uso público-urbano.

MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUIFEROS VALLE DE PUEBLA Y ALTO ATOYAC, realizado por Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente S.C. (SIIMA) en el 2002 para la Comisión Nacional del Agua. Mediante el registro piezométrico se actualizaron las configuraciones del nivel estático del acuífero.

La evolución considera el periodo de análisis de 1997-2002 en el que los mayores abatimientos presentaron un ritmo anual de 1 m al suroeste de la ciudad de Puebla; en la zona comprendida entre las ciudades de Tlaxcala y Puebla no se registraron cambios en la posición de los niveles del agua subterránea.

ZONAS DE RESERVA DE AGUA POTABLE PARA LA CIUDAD DE PUEBLA, realizado por Desarrollo y Sistemas, S.A. (DESISA), en el 2003 para la Comisión Nacional del Agua. Identifica las variables del balance de aguas subterráneas y mediante el análisis de las fuentes de contaminación y de las proyecciones de la demanda, define las zonas de reserva de agua potable hasta el año 2030.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO VALLE DE PUEBLA, EN EL ESTADO DE PUEBLA, realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C. para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 2010. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos 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 analizaran 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.

Esta provincia colinda al norte con la Llanura Costera del Pacífico, la Sierra Madre Occidental, la Mesa Central, la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte; al sur está delimitada por la Sierra Madre del Sur y la Llanura Costera del Golfo Sur; al oeste su límite natural es el Océano Pacífico y al este el Golfo de México.

Comprende parte de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, Estado de México, Tlaxcala, Distrito Federal, Hidalgo, Puebla, y Veracruz.

La integran grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas.

Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico" integrado por: Volcán de Colima, Tancítaro, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (La Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19°; que representan el trazo de la gran Falla Clarión.

La Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se caracteriza por estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, conformadas por 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. En las estribaciones de la sierra de mayor altitud se presenta el clima semifrío subhúmedo, con lluvias en verano, temperatura media anual entre 5 y 12 °C, porcentaje de lluvias invernales menor de 5%. En la parte más alta del Volcán La Malinche el clima es frío, con temperatura media anual entre -2 y 5 °C e invierno muy marcado.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 20 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero, 5 localizadas en territorio del estado de Tlaxcala (Ixtacuixtla, Tepetlipa, Españita, Zacatelco y Nanacamitla) y 15 en el estado de Puebla (Balcón del Diablo, Echeverría, Puebla 21 Poniente, Huejotzingo, San Baltazar Tetela, San Martín Texmelucan, Santa Rita Tlahuapan, San Miguel Canoa, San Juan Tetla, San Andrés Calpan, Huilango, Tepatlaxco, Capulac, Cholula y Puebla), cuyo registro comprende el periodo 1982-2008, así como el plano de isotermas del INEGI para determinar la temperatura media de la región donde se localizan los principales aparatos volcánicos.

De esta manera se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **860 mm** y **12.9°C**, respectivamente. La evaporación potencial media es de **1845 mm anuales**.

3.3. Hidrografía

De acuerdo a su ubicación geográfica, el área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en la Región Hidrológica 18 "Río Balsas", Subregión Hidrológica Alto Balsas, cuenca del Río Atoyac, subcuencas Río Atoyac-Balcón del Diablo, Presa Manuel Ávila Camacho, Río Atoyac-San Martín Texmelucan, Río Nexapa y Río Zahuapan; en forma más precisa, en los orígenes del Río Atoyac.

El Valle de Puebla es atravesado por dos importantes corrientes que son los ríos Zahuapan y Atoyac. Después de la unión de éstos, el Río Atoyac atraviesa la ciudad de Puebla, recibiendo aportaciones de los ríos Coronado y Malinche, así como las aguas residuales de las ciudades de Puebla y Cholula, para finalmente descargar en la Presa Manuel Ávila Camacho (o Valsequillo), donde se regulan y utilizan para irrigación en el Distrito de Riego No. 30. Hasta aquí se identifica como cuenca alta del Río Balsas, considerada como la de mayor desarrollo económico en toda la Región Hidrológica No. 18. El Río Atoyac es el colector principal de la zona, se forma por los escurrimientos que descienden por la vertiente norte del Volcán Iztaccíhuatl, desde una altitud de 4,000 msnm, en los límites de los Estados de México y Puebla.

Entre las numerosas corrientes que descargan en su cauce durante sus primeros kilómetros, se pueden mencionar los ríos Tlahuapan, Turín, Otlati, Atotonilco y San Jerónimo. Adopta el nombre de Río Atoyac a partir de la confluencia con los dos primeros tributarios Tlahuapan y Turín. El Río Zahuapan, tributario del Río Atoyac, nace en la Sierra de Tlaxco, ubicada 40 km al norte de la ciudad de Tlaxcala, a una altitud de 3,418 msnm.

Sus primeros escurrimientos son controlados por la Presa Atlanga, que se utiliza para el riego de aproximadamente 2,000 ha. Aguas abajo atraviesa la ciudad de Tlaxcala, en cuyas inmediaciones se tiene instalada la estación hidrométrica del mismo nombre. Aguas abajo de las aportaciones de los ríos Jilotepec, San Juan y Soledad, recibe por su margen derecha al Río Atoyac, unos 10 km antes de la Ciudad de Puebla, confluencia donde adquiere el nombre de Río Atoyac.

3.4. Geomorfología

El paisaje geomorfológico de la zona se caracteriza por estar constituido por sierras, barrancas y planicies aluviales.

Los elementos morfológicos más jóvenes están constituidos por dos planicies aluviales situadas entre el Volcán La Malinche y la Sierra Nevada. También se encuentra el corredor aluvial Amozoc, formado por depósitos de poco espesor que cubren los flancos localizados entre el Volcán La Malinche y la Sierrita de Amozoc.

Las planicies aluviales antiguas están representadas por la meseta baja de depósitos aluviales que proceden del antiguo Volcán Iztaccíhuatl, formado principalmente por el colapso que dio lugar a la caldera Llano Grande.

Existe un gran número de volcanes con emisiones de lavas, que descansan sobre acumulaciones de tobas y éstas a su vez sobre depósitos aluvio-fluviales antiguos ubicados en la zona de Valsequillo.

También se observa una gran cantidad de conos volcánicos geológicamente modernos, que descienden del Popocatepetl hacia el norte de Cholula y de la Ciudad de Puebla.

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

La segunda indica una etapa de rejuvenecimiento, representada por las zonas montañosas y arroyos en forma de "v"; debido al incremento de las pendientes topográficas las corrientes superficiales son torrenciales que erosionan con gran intensidad las rocas por las que atraviesan. En general, el drenaje es de tipo radial y subdendrítico; en zonas altas como La Malinche es de tipo radial centrífugo y subdendrítico en regiones bajas.

4. GEOLOGÍA

Las diferentes unidades litológicas (figura 2) comprenden rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas extrusivas, distribuidas en la secuencia meta-vulcanosedimentaria del Terreno Tectonoestratigráfico Guerrero, definido por Campa y Coney (1983) (Figura 2).

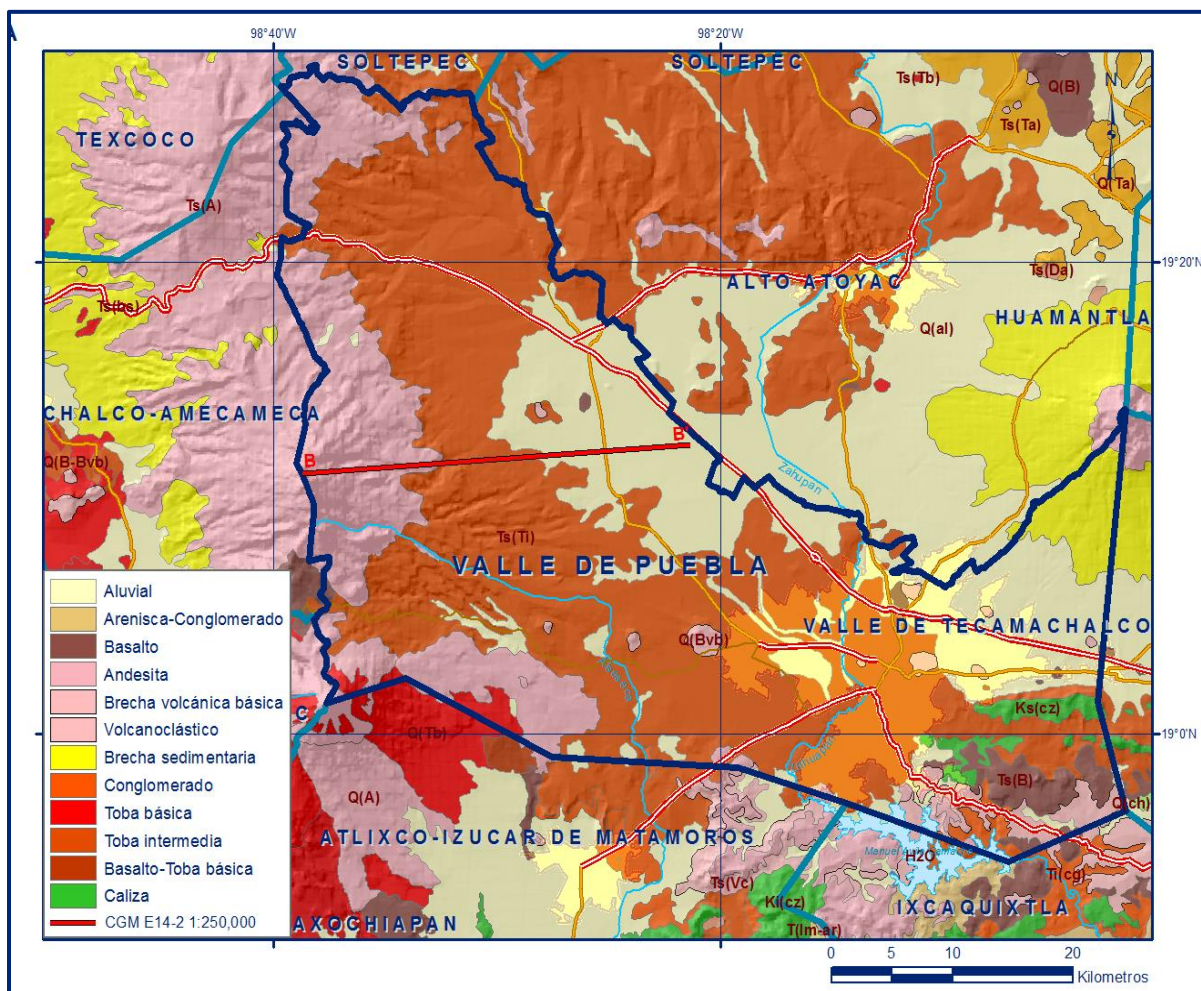


Figura 2. Geología general del acuífero

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. Como la región está ubicada en su totalidad dentro del Eje Neovolcánico, la geología ha sido moldeada por una actividad volcánica que le ha dado al relieve un perfil característico.

4.1. Estratigrafía

La columna estratigráfica que aflora en la región está constituida por rocas cuyas edades varían del Paleozoico al reciente. A continuación, se describen las distintas unidades, de la más antigua a la más reciente:

PALEOZOICO

Complejo Acatlán

Está formado por una secuencia plegada y afectada por metamorfismo regional que ha sido estudiada por varios autores (Ordóñez, 1906; Jenny, 1933; Salas, 1949; Fries, 1960; Rodríguez-Torres, 1970); esta secuencia fue formalmente definida por Ortega-Gutiérrez (1978), quién la propuso como unidad litoestratigráfica equivalente a grupo, el cual incluye cinco formaciones estratiformes (Magdalena, Chazumba, Cosoltepec, Xayacatlán y Tecomate) y tres intrusivos (Granitoides Esperanza, Tronco de Totoltepec y Diques San Miguel). Estas formaciones representan una secuencia constituida por migmatita, esquisto pelítico, cuarcita, anfibolita, eclogita, roca verde, metagabro, serpentinita, metagrauvaca, meta-arcosa y metaconglomerado, cuya litología premetamórfica corresponde a depósitos típicos de arco insular y cuenca oceánica marginal. Las rocas intrusivas afectaron a los sedimentos durante su evolución quedando en parte también metamorfoseadas. Aflora únicamente al sur del área.

Formación Los Arcos (Olinalá)

Fue definida formalmente por Flores de Dios y Buitrón (1982) al referirse a una sucesión sedimentaria continua, en cuya base se encuentra un conglomerado polimíctico que pasa transicionalmente a limolita, la cual se intercala con arenisca. Sobreyacen a estos depósitos rocas carbonatadas que a su vez pasan transicionalmente a rocas clásticas finas, limitadas por el Complejo Acatlán en la base. Casi al mismo tiempo, Corona-Esquivel (1983), estudia esta misma unidad formacional y la denomina como Formación Los Arcos, para referirse a una secuencia de rocas sedimentarias marinas y litorales, que contienen *stacheoceras* y *agathiceras* con un alcance estratigráfico Pensilvánico-Pérmico Medio.

Su localidad tipo se encuentra en la cañada Los Arcos, ubicada 2.5 km al sureste de Olinalá en el estado de Guerrero (Corona-Esquivel, 1981).

Su litología comprende un paquete de más de 600 m de espesor que se formaron en un ambiente semejante al de una bahía, con sedimentación desde continental deltaica hasta de plataforma y arrecife; contiene abundante y variada fauna (Corona-Esquivel, 1983).

Por sus características litológicas y paleontológicas, se infiere que se depositó en ambientes marinos poco profundos, cercanos a la costa, con aporte constante de terrígenos, que representa una facies de relleno de cuenca tipo flysch pelítico-arenoso.

MESOZOICO

Sistema Jurásico

Grupo Tecocoyunca.

Burckhardt (1927), describió por vez primera los estratos del Jurásico Medio en los alrededores de Tecocoyunca, pero Jenny (1933) distingue posteriormente dos unidades: superior e inferior. Más tarde Guzmán (1950) las nombra "Capas Tecocoyunca" y también las separa en inferior y superior. Finalmente, Erben (1956), las eleva de rango denominándolas como las conocemos en la actualidad, dividido en 5 formaciones: Zorrillo, Taberna, Simón, Otatera y Yucuñuti; propone como localidad tipo a la barranca Tecocoyunca, localizada entre los poblados de Cualác y Huamuxtlán, Guerrero.

El Grupo Tecocoyunca tiene un espesor de más de 250 m y está constituido por una secuencia de estratos que en su porción inferior es de origen continental, mientras que en la parte media existen intercalaciones marinas; la porción superior está conformada por estratos completamente marinos. Litológicamente se trata de areniscas, conglomerados, limolitas y lutitas que contienen concreciones calcáreo-hematíticas; en algunos niveles existen mantos de carbón y en otros horizontes de coquinas. La parte superior en el área de Olinalá está constituida por lutitas de color morado con intercalaciones de yeso (Corona-Esquivel 1981, Consejo de Recursos Minerales y ECRT-UAG 1997).

En el Jurásico Medio se repitieron las condiciones de cuenca somera, permitiendo el depósito del Conglomerado Cualác y del Grupo Tecocoyunca. Por su contenido fósil de flora y fauna, su edad se ha ubicado en el Jurásico Medio (Erben 1956). Corresponde a los Lechos Rojos post-orogénicos del Jurásico Medio cuyos sedimentos aparecen deformados, incluso en pliegues apretados.

Presenta espesores máximos de 300 a 500 m. Se desconoce su contenido basal, ya que en esta zona su contacto con el Esquistos Acatlán es por cabalgadura.

Formaciones Tecomazúchil y Atzompa

Sobre la secuencia anterior, se depositaron con pequeña discordancia angular al sur de la presa Valsequillo, las formaciones Tecomazúchil y Atzompa. Están constituidas por una alternancia rítmica de areniscas y lutitas marinas, seguidas por calizas de estratificación delgada a mediana e intercalaciones de lutitas.

Se incluye en esta secuencia, la parte superior de las unidades estratigráficas denominadas Calizas Tamán y Formación Pimienta; consisten ambas de estratos delgados a gruesos de calizas intercalados con lutitas.

El espesor del conjunto sedimentario marino es de aproximadamente 700 m.

Sistema Cretácico Inferior

Su litología es variada debido a los cambios paleontopográficos de los ambientes de depósito; desde lagunares y marinos de aguas someras, semiprofundas y a veces hasta batiales. Se depositaron calizas que se diferencian según la localidad, en las formaciones Xochicalco, Orizaba y Morelos.

En todas las localidades visitadas estas formaciones presentan desarrollo de cavernas, que en varios sitios generan paisajes cársticos. Los sedimentos marinos del Cretácico Inferior forman paquetes cuyo espesor alcanza 1,000 m.

Formación Zicapa

Consiste principalmente de conglomerados, areniscas y limonitas de color rojo, formadas en un ambiente continental, con algunos lentes de caliza intercalados, cuyo espesor total es mayor a 1,000 m (Guzmán 1950; De Cserna et al. 1980; Salinas-Prieto 1986; Consejo de Recursos Minerales y ERCT-UAG 1998a). Guzmán (1950) y Erben (1956) mencionan por primera vez la presencia de los estratos de lechos rojos y tobas intercaladas en esta área. Posteriormente, De Cserna et al. (1980) describen formalmente a la Formación Zicapa y ubican su localidad tipo “a unos 5 km al suroeste del poblado de Zicapa, Guerrero”.

Esta unidad aflora principalmente en una faja de ancho variable (~20 km) alrededor y sobre los afloramientos del Complejo Acatlán, el ancho de esta faja es mayor en la porción sur del área.

Estas capas rojas consisten de estratos delgados de limolitas, areniscas y conglomerados polimícticos bien consolidados, con fragmentos abundantes de cuarcita, filita, metareniscas, metaandesita y clastos de rocas volcánicas.

La estratificación gradada es un rasgo común en las areniscas y en los conglomerados. La mayor parte de la arenisca contiene limo o arcilla como cementante.

Formación Morelos

Nombre propuesto por Fries (1960) para referirse a una secuencia de calizas de plataforma; consiste de calizas de plataforma y arrecifales masivas de edad Albiano-Cenomaniano y una secuencia de anhidritas en la base de la secuencia (Fries 1960; De Cserna et al. 1980) que tiene una relevancia mayor en la interpretación de las zonas de despegue dúctil existentes en la zona central de la plataforma.

En las calizas no se han encontrado evidencias claras de vulcanismo contemporáneo y esto ha sido utilizado para separar esta unidad de las secuencias vulcano-sedimentarias que afloran hacia el occidente. Sin embargo, en la zona de Chiautla,

Puebla se ha reportado la presencia de lavas de composición básica intercaladas con la secuencia de calizas (Sabanero-Sosa et al. 1996) y dentro de la secuencia de calizas se ha observado un estrato vulcanoclástico distintivo (Hernández-Romano et al. 1997). En general se observa que las facies de la Formación Morelos son más someras hacia el este (Hernández-Romano et al. 1997) y las facies costeras y arrecifales sobreyacen en algunas zonas a las rocas del Complejo Acatlán o al conglomerado Cualác (De Cserna et al. 1980).

Más al oriente, en la zona de Tlapa-Tlaltepéji, la secuencia de calizas someras se encuentra intercalada con secuencias potentes de yesos. Por otro lado, la secuencia cercana al Complejo Acatlán presenta variaciones importantes en su espesor, en la zona de Citlalli y en la zona localizada al noroeste de Papalutla el espesor de la secuencia de calizas alcanza más de 700 m, mientras que entre San Juan de Las Joyas y Papalutla los espesores son menores a 100 m.

Al oriente y sobre el Complejo Acatlán, el espesor de las calizas disminuye considerablemente o se encuentran ausentes. De esta manera se puede especular que el nivel del mar cubrió solo parcialmente los afloramientos del Complejo Acatlán durante el intervalo de tiempo en el cual se depositó la Formación Morelos. De acuerdo a su contenido faunístico, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano.

Se correlaciona en edad con las formaciones Cipiapa y Orizaba de la porción central de Puebla, con la caliza El Doctor de Querétaro oriental, y con las formaciones El Abra y Tamaulipas Superior (en la Sierra Madre Oriental) de los Estado de Tamaulipas y San Luis Potosí

Sistema Cretácico Superior

Formación Mezcala

Esta unidad se ha definido como una secuencia de ambiente marino compuesta principalmente de areniscas, limolitas y lutitas calcáreas con intercalaciones de conglomerados y estratos de caliza, cuya edad varía desde el Turoniano hasta el Maestrichtiano Inferior y tienen un espesor de más de 1200 m (Fries 1960; Hernández-Romano et al. 1997; Long y Friedrich 1998; Parrillita et al. 2000; Mondo et al. 2000).

Las rocas de esta unidad afloran entre la cabalgadura de Teloloapan hacia el oeste y el Complejo Acatlán hacia el oriente, aunque rocas de edad y litología similar se han descrito en la cobertura del Terreno Guerrero y en la zona de Tehuacán.

Las edades reportadas de la Formación Mezcala varían del Albiano Tardío en la zona de Teloloapan (Mondo et al. 2000), pasando por el Turoniano en la parte central de la plataforma (secciones Barranca del Tigre, Axaxacoalco; Hernández-Romano 1997), Coniaciano en la zona de Atenango del Río, Guerrero (Lang y Frierich 1998) hasta el Maestrichtiano Inferior en la zona de Temalac (Perrilliat et al. 2000).

Incluye margas de color café claro, con algunos estratos de areniscas calcáreas de grano fino, de alrededor de 30 a 50 cm de espesor. La litología cambia gradualmente a arena hacia la cima de la sección.

En el área de Temalac y Mitepec, la secuencia cambia progresivamente a un ambiente deltaico continental, incluso se ha reportado la presencia de huellas de dinosaurio (Villafranca et al. 1995 en Perrilliat et al. 2000). Las formaciones Tetelcingo del Maestrichtiano Superior–Paleoceno y Balsas del Terciario Inferior sobreyacen a la Formación Mezcala. En la mayoría de los casos este contacto es discordante; sin embargo, entre las localidades de Temalac y Mitepec, los depósitos costeros de la Formación Mezcala cambian gradualmente a depósitos continentales.

De acuerdo con varios autores (Fries 1960; Ontiveros-Tarango 1973; Lang et al. 1996; Lang y Frerichs 1998; Hernández-Romano 1999; Cabral-Cano et al. 2000b) el inicio de la deposición clástica marina en una cuenca de tipo antefosa “foreland” con cambios abruptos de facies de la Formación Mezcala se puede interpretar como una unidad sin-tectónica relacionada a los primeros pulsos del acortamiento Laramídico. La presencia de clastos de cuarcita ha sido utilizada como evidencia del levantamiento de la parte oriental de la plataforma (Hernández-Romano 1999).

Se correlaciona con la porción superior de la Formación Escamela Superior de la porción centro-oriental del Estado de Puebla; con la Lutita Méndez en la porción oriental de Querétaro y centro-occidental de Hidalgo, y con la Formación San Felipe al sureste de San Luis Potosí.

Cenozoico. Terciario

Grupo Balsas

Nombre asignado por Fries (1960) para referirse a una secuencia continental constituida principalmente por conglomerados, calizas lacustres, arcosas, areniscas y limolitas, así como brechas volcánicas, tobas y lavas que se presentan en la cuenca del Río Balsas. Más tarde Ortega (op. cit.) separa del grupo a una unidad vulcanoclástica constituida por tobas, brechas volcánicas y lavas.

En el área está constituido por un conglomerado polimíctico que incluye clastos de caliza, arenisca, rocas metamórficas, rocas volcánicas y cuarzo, incluidos en una matriz limo-arenosa de color rojo. Aflora generalmente en bajos topográficos formando amplios valles en las faldas de las sierras.

Aunque puede dividirse en varios miembros o formaciones, en la zona se presentan dos miembros distintivos: el inferior es conglomerático y compacto; mientras que el superior es de carácter limo-arcilloso, semicompacto y suave. Representa una sedimentación molasse postorogénica.

Los materiales finos se presentan en estratos delgados en tanto que los conglomerados se disponen en capas gruesas y bancos masivos. Campa (op. cit.) reporta que dada su naturaleza de relleno de valles-fosa, en algunos lugares se ha calculado un espesor de 500 m. En el área de Valsequillo, parecen rellenar a una extensa fosa situada entre las sierras Tentzo y Amozoc.

Representa un conjunto sedimentario equivalente a una molasse, depósito pos-orogénico alpino. En vista de que estos sedimentos se derivan de la erosión de los cuerpos anticlinales laramídicos, contiene abundantes clastos calizos y muy rara vez clastos volcánicos en el área al sur de Puebla. De acuerdo con las relaciones estratigráficas, Fries (op. cit.) establece una edad Eoceno Tardío-Oligoceno Medio; sin embargo, Ortega (op. cit.), con base en datación radiométrica obtenida en rocas de la Formación Tetelcingo, sugiere que se amplíe el alcance a Paleoceno-Oligoceno.

No se han encontrado fósiles en estas capas rojas; pero su edad se establece con base en su correlación con el Conglomerado Rojo de Guanajuato, en donde se fecharon los restos de un roedor del Eoceno Tardío-Oligoceno (Edwards, 1965 y Fries, et. al 1955). Se correlaciona con el Conglomerado El Morro que aflora en el área de Zimapán y con el Conglomerado Guanajuato que aflora en la porción central del país, así como con las Formaciones Huajuapán, Yanhuatlán y Cuicatlán de Oaxaca.

Rocas Volcánicas del Oligoceno

Son el producto efusivo relacionado con la subducción de la placa Farallón en el Pacífico Oriental, que generó arcos volcánicos en el continente. En la región estos arcos se caracterizan por lineamientos orientados generalmente de sur a norte. Durante la emisión de las rocas se produjeron pilares y fosas, éstas últimas se rellenaron con sus propios productos efusivos. Presentan composición intermedia, aunque inciden materiales efusivos básicos y ácidos. Al sur de la presa Valsequillo, se asignaron a esta unidad los restos de una caldera afectada por fracturamiento N-S. Su espesor máximo es de 1500 m en la Cuenca de México y considerablemente menor en el Valle de Puebla.

Rocas Volcánicas del Mioceno

Son de composición ácida e intermedia principalmente, cuyo espesor en la cuenca de Puebla varía de 100 a 200 m; comienzan con la unidad Coatepec, un diminuto afloramiento al NE de Valsequillo, que representa probablemente una pequeña chimenea volcánica.

Están representadas por las Tobas Caulapan que afloran entre Valsequillo y Atlixco, producto de importantes erupciones de flujos piroclásticos, probablemente provenientes de una gran caldera, cuya posición aún se desconoce. Se incluye también a los depósitos de gravas y arenas fluviales.

Afloran al sur de Puebla con mayor frecuencia que las de edad Oligoceno; por su menor edad, sus formas se aprecian menos erosionadas y menos afectadas en sus cuerpos originales de domos, conos o calderas.

Rocas Volcánicas del Plioceno

La mayor parte de las vulcanitas Ixcalo están constituidas por andesitas de olivino y fueron definidas como unidad por Malde en 1968; su edad varía del Plioceno Medio a Superior y frecuentemente se asignan al Mioceno Superior por el control estructural W-E que las rige.

En el Plioceno Medio se desarrollaron numerosas cuencas endorreicas someras, las cuales dieron lugar a la formación de potentes depósitos lacustres; destacan en el norte los depósitos lacustres de Tlaxcala, con espesores máximos de 200 m que contienen escasas lavas y algunos horizontes de ceniza. Los depósitos lacustres del Plioceno, constituyen, por su importante superficie, una formación que presenta frecuentes variaciones de espesor. Sus potentes espesores en el norte de la cuenca de Puebla, disminuyen considerablemente en los alrededores de la ciudad de Puebla, donde apenas llegan a medir unos 30 a 50 m.

Depósitos Lacustres del Plioceno

En el Plioceno Medio, se desarrollaron numerosas cuencas endorreicas someras en las que se acumularon potentes depósitos lacustres; destacan en el norte los depósitos lacustres de Tlaxcala, con espesores máximos de 300 m que contienen, además de arcillas lacustres y horizontes de diatomitas, escasas lavas, capas de cenizas, paleosuelos y gravas fluviales. Por su extensión superficial presentan frecuentes variaciones de espesor, los mayores se presentan en el norte de la cuenca de Puebla y disminuyen considerablemente en los alrededores de la ciudad de Puebla, donde apenas llegan a medir unos 30 a 50 m.

Tobas Tlaxcala

Sobreyaciendo a los depósitos lacustres, se encuentra un conjunto potente de tobas estratificadas, derivadas probablemente de las erupciones piroclásticas de los inicios de la actividad del volcán La Malinche; forman una secuencia de estratos que alcanzan un espesor de más de 100 m, constituida en su mayor parte por cenizas de caída libre y en menor proporción por flujos piroclásticos, algunos de ellos en forma de corrientes de lodo.

Cuaternario

Rocas Volcánicas

En la cuenca de Puebla incluye cuerpos fenobasálticos situados al pie surponiente de La Malinche, que se diferencian de los conos volcánicos, situados al sur de La Malinche e integrados en el Cuaternario Superior, por su morfología más reciente. De la misma manera, citando otro ejemplo, se asigna a esta edad la cadena de volcanes que presentan control tectónico al N-NE y de morfología relativamente joven, que se observan al sur de Puebla. También se asignan al Cuaternario Superior las vulcanitas de Chignahuapan, en su mayoría riolíticas, ubicadas al norte de la cuenca de Puebla, así como las rocas de la Formación Chichinautzin con sus conos y domos.

Depósitos Aluviales y Lacustres

Están representados por extensos rellenos aluviales y lacustres, característicos de zonas volcánicas. Incluye depósitos de travertino que existen en la ciudad de Puebla y en área de la Presa Valsequillo; así como tobas depositadas en taludes, formadas principalmente por la caída de cenizas durante la intensa actividad volcánica del Cuaternario.

4.2. Geología estructural

La deformación que presentan los Terrenos que afloran en la región es diferente en edad y naturaleza.

Las rocas del Terreno Guerrero están afectadas por deformación dúctil no coaxial ocurrida en el Terciario Inferior (Salinas, 1994), evidenciada por planos de esquistosidad asociados a pliegues isoclinales y cabalgaduras de dirección norte-sur y vergencia al oriente.

La lineación mineral y de estiramiento indica una trayectoria de la deformación de poniente a oriente producida por la acreción del Terreno Guerrero al Continente (Terreno Mixteco).

Por otra parte, la deformación en el basamento del Terreno Mixteco (Complejo Acatlán) está evidenciada por al menos tres fases de deformación dúctil, sin embargo, en la cubierta (Formación Tecomate), solo se presenta una fase.

Las rocas de la cubierta paleozoica y mesozoica presentan evidencias de deformación compresiva, con pliegues amplios orientados en sentido norte-sur.

Existen también cabalgaduras importantes como la de Papalutla, que evidencian una dirección opuesta a la presente en la zona occidental.

Los desplazamientos laterales orientados NW-SE juegan un papel importante en el desarrollo de pliegues y cabalgaduras y son paralelas a las estructuras mineralizadas de los distritos de Taxco, Tetipac, Zacualpan y Sultepec.

La Fosa que se extiende desde Cuautla, Axochiapan, Izúcar de Matamoros hasta Atlixco, corresponde a una estructura circular tipo caldera, posiblemente asociada al Volcán Popocatepetl.

El Terreno Guerrero presenta características que indican la presencia de un arco volcánico submarino que ocurrió en el Cretácico Inferior sin que se conozca con certeza su basamento, mientras que el Terreno Mixteco se caracteriza por contar con basamento metamórfico Paleozoico, con una cubierta sedimentaria de carbonatos y terrígenos depositados en un ambiente de plataforma y cuenca; por la cubierta volcánica que comparten es muy probable que a finales del Cretácico Superior o Terciario Paleógeno haya ocurrido la acreción de estos terrenos (Campa y Coney, 1983). La existencia del arco de Cascalote en Chiautla de Tapia, abre la posibilidad de ampliar los límites del Terreno Guerrero hacia el oriente (Carta Geológica-Minera Cuernavaca E14-5, escala 1:250,000. SGM, 1998).

El Albiano-Cenomaniano se caracteriza por su estabilidad tectónica que propició la precipitación de carbonatos (Formación Morelos) que culmina con un cambio a terrígenos (Formación Soyatal-Mezcala). A principio del Terciario se interrumpe la sedimentación debido a la fase tectónica más intensa de la Orogenia Laramide, caracterizada por esfuerzos compresivos; que originaron una deformación continua que imprime a las rocas cretácicas pliegues y cabalgaduras. Casi contemporáneamente empieza a actuar una fase erosiva con sedimentación molásica y se desarrolla también el evento magmático de la Sierra Madre del Sur, que pudiera relacionarse con la migración de arcos magmáticos que se distribuyen a lo largo de la costa del Pacífico (Morán Z D. et al., 2000), evidenciado por intrusiones graníticas-granodioríticas y vulcanismo andesítico. Durante el Mioceno Medio se inicia el desarrollo del Eje Neovolcánico como una serie de eventos con características vulcanológicas y estructurales muy particulares cuyas rocas, caracterizadas por la abundancia de andesitas y dacitas, so típicas de una provincia calcoalcalina (Carta Geológica-Minera Ciudad de México E14-2, escala 1:250,000. SGM, 2002).

Los rasgos estructurales y tectónicos están relacionados con la presencia del Volcán La Malinche, así como otras estructuras volcánicas y fallas que atraviesan la región en direcciones dominantes. El Volcán La Malinche parece estar alineado, como ocurre con otras estructuras similares del Eje Neovolcánico, con una dirección regional NW-SE. En la porción central del área, existe una falla que atraviesa en dirección E-W al sur de Apizaco, rasgo que se alinea con la frontera de depósitos tobáceos que descienden desde Calpulalpan. Las estructuras volcánicas, fallas y fracturas han contribuido a modelar el relieve y están asociadas íntimamente a la actividad volcánica y tectónica continental.

El estratovolcán La Malinche tiene una elevación de 4460 msnm y se formó sobre un complejo sistema de fallas normales asociadas a la tectónica global. Estas fallas se desarrollaron en sistemas de fosas, destacando por sus dimensiones aquellas orientadas W-E (fosa Iztaccíhuatl- Malinche) que pueden ser la más recientes, aquellas orientadas NW-SE (fosa Pachuca-Apizaco) y finalmente las orientadas en sentido SW-NE (fosa Atlixco-Huamantla), probablemente la más antigua. Otros rasgos tectónicos están evidenciados por lineamientos que presentan conos volcánicos recientes, que representan debilidades corticales por donde pudieron ascender los magmas básicos que les dieron origen. Los conos de esta región se encuentran alineados en dirección SW-NE.

Se determinaron cinco grandes bloques y lineamientos, que, de acuerdo con su presencia, se nombran de la siguiente manera: bloques Huexoyucan, San Martín, Zacatelco y Puebla, además del pilar denominado Tepeaca, cuyos límites laterales están representados por las principales estructuras volcánicas de esta porción del país; dentro de cada uno de ellos, las correspondientes fallas Santa María, Tlaxcala, Malinche, Huejotzingo y Tepeaca. Es importante observar, que el estilo de deformación más sobresaliente es por fracturamiento y por fallamiento.

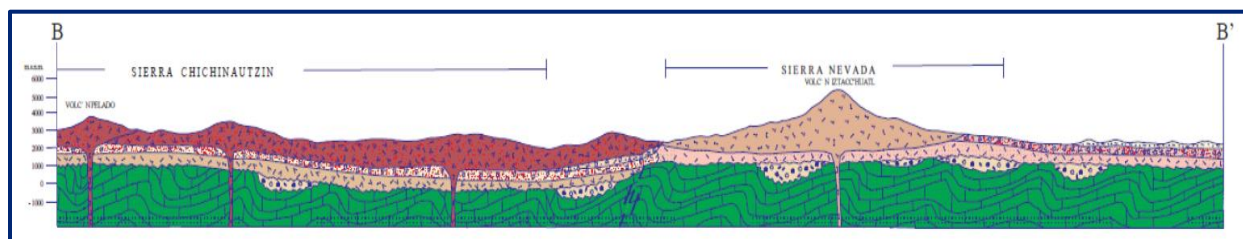
4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales, fluviales y brechas de granulometría variada, 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 se aloja en una secuencia de rocas ígneas extrusivas, integrada por derrames volcánicos, principalmente basaltos, tobas y andesitas, así como rocas calizas, areniscas y lutitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas carbonatadas.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico, están representados por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias al desaparecer su fracturamiento y disolución, los depósitos lacustres y rocas arcillosas, así como las unidades más antiguas representadas las lutitas y limolitas del Grupo Tecocoyunca y las rocas metamórficas del Complejo Acatlán.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por depósitos arcillosos, lutitas y limolitas. La alternancia de rocas que no presentan fracturamiento con depósitos aluviales, forman acuíferos locales independientes (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera "Ciudad de México" E14-2. Escala 1:250,000. (SGM, 2002)

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero en general de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, que presenta condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de depósitos lacustres; constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales y brechas de granulometría variada; la porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas (tobas y andesitas) y sedimentarias marinas (calizas y areniscas), 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 lutitas, limolitas y depósitos lacustres.

Se puede distinguir verticalmente un sistema de tres unidades denominadas superior, media y profunda. La unidad superior presenta buena calidad del agua, la unidad media se caracteriza por contener agua sulfurosa; a mayor profundidad se presenta un acuitardo y una tercera unidad antes del basamento geohidrológico.

La unidad superior está constituida por depósitos granulares, brechas y rocas volcánicas fracturadas del cuaternario, que reciben directamente una recarga subterránea proveniente de las regiones altas de la cuenca como son las estribaciones del volcán La Malinche y la Sierra Nevada.

Esta es la unidad que tradicionalmente se ha explotado por medio de pozos, su espesor varía desde unos cuantos metros en los bordes de la cuenca a más de 200 m en la porción central circundante a la ciudad de Puebla, con un promedio de 130 m. Su permeabilidad es media a alta y funciona como acuífero libre.

Estas unidades litológicas, descansan sobre los depósitos lacustres del Plioceno de muy baja permeabilidad, que funcionan como acuicludo entre la unidad superior y media, conformada por rocas volcánicas del Plioceno, rocas volcánicas del Mioceno y del Oligoceno, además de los conglomerados del Grupo Balsas, que por su fracturamiento presentan permeabilidad secundaria. Estos materiales descansan a su vez, sobre otro acuicludo constituido por la formación marina plegada del Cretácico Superior denominada Mezcala, que por su composición predominante de margas y lutitas se considera prácticamente impermeable, excepto cuando presenta fracturamiento.

Bajo este acuicludo se localizan las formaciones marinas calcáreas del Cretácico Inferior, Tecamazúchil, Atzompa y Morelos que constituyen el acuífero profundo, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución. Esta tercera unidad no ha sido explorada, pero por su profundidad se infiere que contiene agua de alta salinidad.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2010, se ejecutaron 15 pruebas de bombeo, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 5 a 8 horas, para la etapa de abatimiento, y de 6 a 12 horas para la recuperación.

De la interpretación de las pruebas por métodos analíticos convencionales y de los resultados de otras pruebas efectuadas en estudio previos, se establece que los valores de transmisividad varían de **3.2×10^{-5} a $27.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . De acuerdo con el espesor saturado, de 120 a 800 m, la conductividad hidráulica varía de a **3.7×10^{-8} a $1.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.003 a 10.0 m/d)**.

Los valores más altos de ambos parámetros corresponden a los sedimentos aluviales de mayor granulometría y a las rocas fracturadas, en tanto que los valores más bajos son representativos de sedimentos de granulometría fina y de rocas arcillosas o volcánicas con menor grado de fracturamiento.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se pudieron obtener valores del coeficiente de almacenamiento, sin embargo, por la heterogeneidad de los materiales que conforman el sistema acuífero, se puede establecer un rango de valores entre 0.007 a 0.05 e inclusive de 0.3, cuando se trata de rocas fracturadas.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se tomó en cuenta la información piezométrica para los años 1997, 2002 y 2010.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático La profundidad al nivel estático en 2010 muestra que los niveles estáticos del acuífero varían, de manera general, de 5 a 130 m, incrementándose por efecto de la topografía desde el centro del valle hacia el volcán La Malinche y hacia las sierras que delimitan el acuífero (figura 4).

Las profundidades más someras, de 5 a 25 m, se localizan en la porción central del acuífero, entre las poblaciones Santa María Coronango, San Miguel Xoxtla y Santa María Motoyzingo; en tanto que las mayores se registran hacia el volcán La Malinche y hacia la Sierra Nevada así como entre San Bernardino y el sur de la zona urbana de la ciudad de Puebla.

En la mayor parte de la zona urbana de Puebla se registran profundidades que varían de 80 a 110 m.

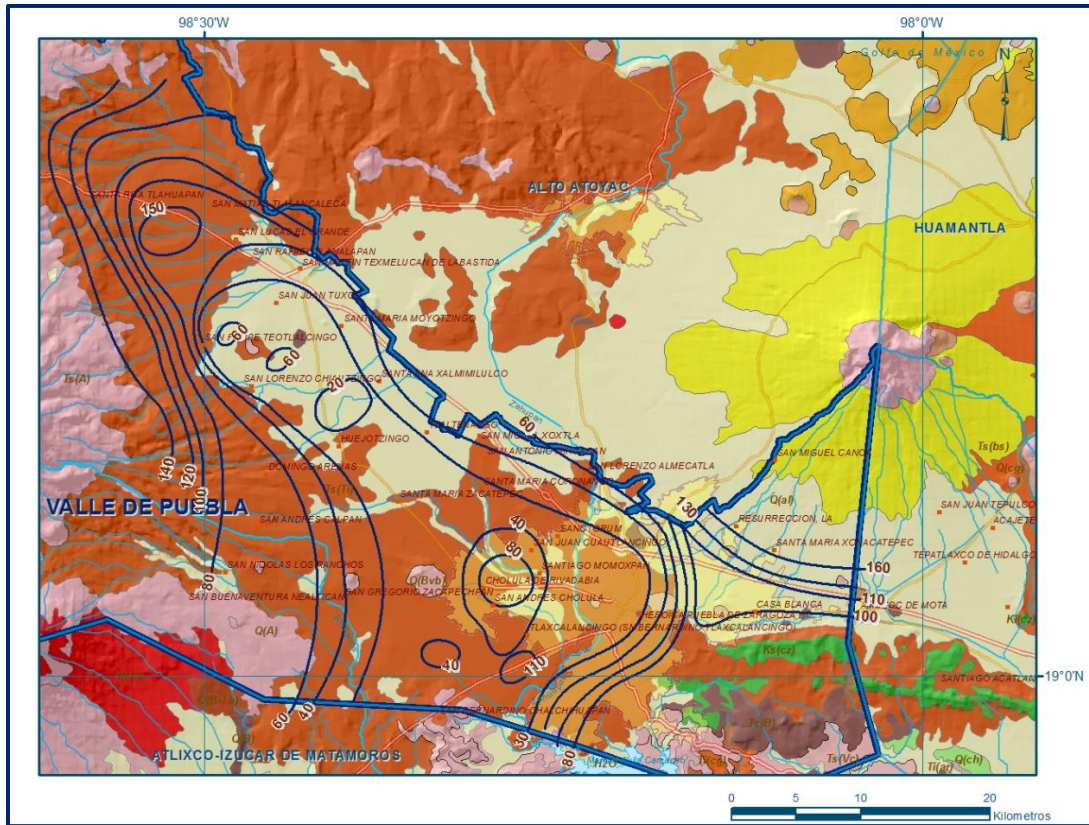


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático 2010, se registran valores que varían 2500 a 2000 msnm incrementándose, al igual que la profundidad, por efecto de la topografía, desde la porción sur hacia el norte y los extremos nororiental y oeste, hacia las estribaciones del volcán La Malinche y la Sierra Nevada, respectivamente, que representan las principales zonas de recarga.

La dirección preferencial del flujo subterráneo es de norte a sur, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental, hacia el acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros y de la Sierra Nevada hacia el acuífero Alto Atoyac (figura 5).

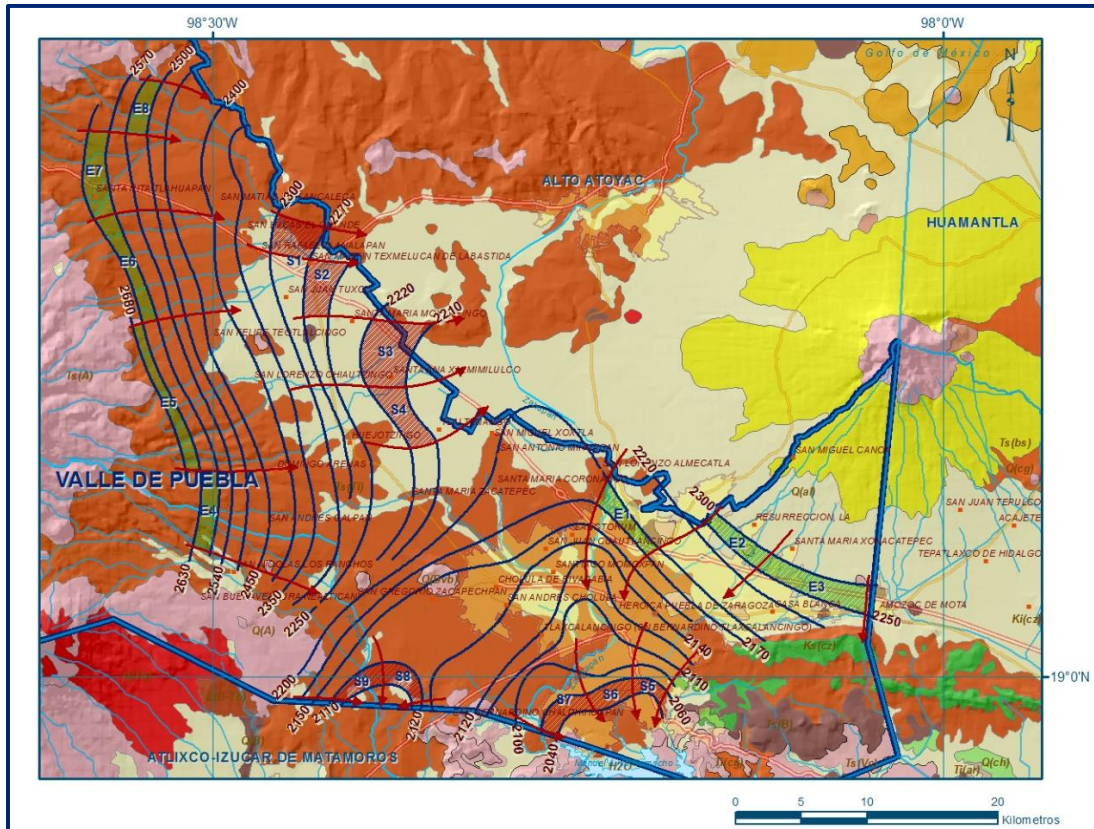


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La evolución del nivel estático para el periodo 2002-2010 registra abatimientos de 2 a 20 m, que representan valores de 0.25 a 2.5 m anuales.

Los mayores abatimientos, de 15 a 20 m, se presentan al noroeste de San Martín Texmelucan, de 5 a 10 m se registraron en toda el área que rodea al poblado Huejotzingo y en la región comprendida entre la ciudad de Puebla, Cholula, Santa María Coronango y Tlaxcalancingo (figura 6). De manera general, se considera que el abatimiento promedio del acuífero es de 0.6 m anuales.

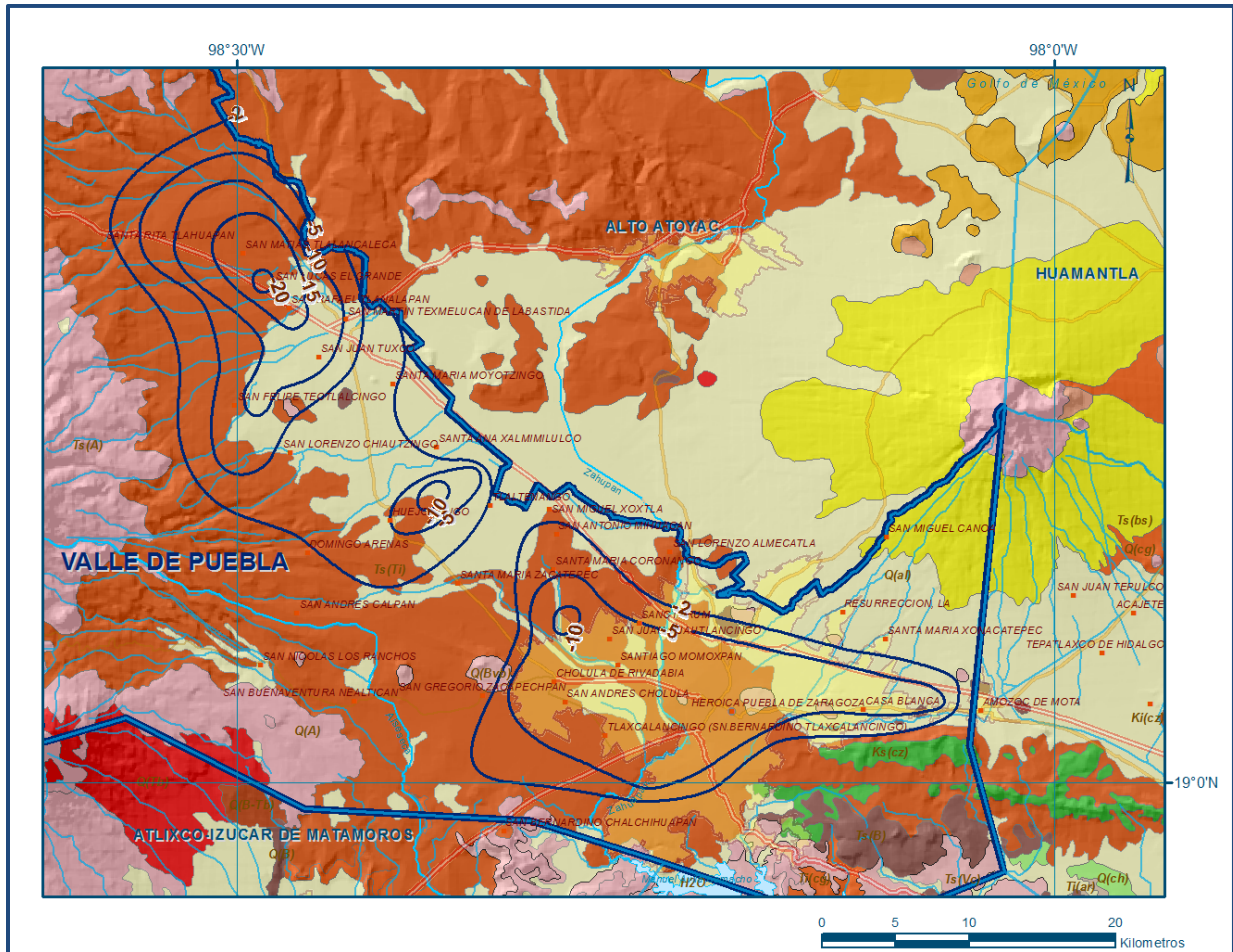


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2002-2010)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 20 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación de la unidad superior, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio, potasio, fierro y manganeso.

De acuerdo con la concentración de sólidos totales disueltos (STD), se registran valores que varían de 49 a 770 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica, de manera general, como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 171 a 1544 $\mu\text{S}/\text{cm}$; los mayores valores de STD y conductividad eléctrica se registran al sur del acuífero, confirmando la dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur. Sólo dos muestras superan el LMP de dureza total, que es de 500 mg/l, al presentar concentraciones de 564 y 689 mg/l. Los valores de temperatura varían de 18.0 a 28.4 °C y para el pH de 5.1 a 8.5.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), de las 20 muestras analizadas 7 se clasifican como C_1-S_1 , que representa agua de baja salinidad y bajo contenido de sodio intercambiable, 10 se clasifican como C_2-S_1 agua de salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable, y 3 como C_3-S_1 agua de salinidad alta y bajo contenido de sodio intercambiable. Por lo tanto, en general, el agua subterránea es apropiada para su uso en riego agrícola sin restricciones, en algunos casos requiriendo suelos permeables y lavado de ellos.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predominan las familias bicarbonatada-magnésica y bicarbonatada-mixta (sódico-magnésica), que representan agua de reciente infiltración, que ha circulado a través de rocas sedimentarias y volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2010, se registró la existencia de 1200 aprovechamientos, de los cuales 463 son norias, 735 pozos y 2 manantiales. Del total de obras, 1095 están activos y 105 inactivos. De las obras activas, 408 se destinan al uso agrícola, 292 para uso público-urbano, 155 para uso doméstico, 114 para servicios, 118 para uso industrial y 8 para uso pecuario.

El volumen estimado de extracción por bombeo asciende a **327.7 hm³/año**, de los cuales 181.6 hm³/año (55.4 %) son para uso público-urbano, 77.5 hm³/año (23.7 %) para uso agrícola, 42.0 (12.8 %) para uso industrial, 21.7 hm³ (6.6 %) para uso doméstico, 2.5 hm³/año (0.8 %) para servicios y 2.4 (0.7 %) para uso pecuario. Adicionalmente, a través de los 2 **manantiales** se descarga un volumen de **19.0 hm³ anuales**, destinados a los usos agrícola y pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1997-2010, en una superficie de **1,308 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 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 en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del 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 inducida (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:

R_v = Recarga vertical;

R_i = Recarga inducida;

E_h = Entradas horizontales por flujo subterráneo horizontal;

B = Bombeo;

D_m = Descarga a través de manantiales

S_h = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

ΔV(S)=Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

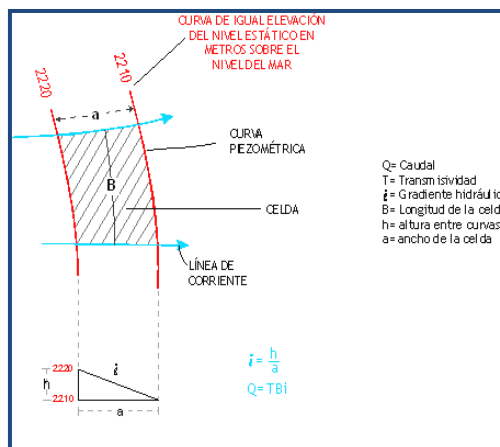
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos y en el llevado a cabo en el 2010, adaptados al espesor saturado en cada zona.

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas definidas. El cálculo de las entradas subterráneas para el año 2010 se presenta en la tabla 2. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **196.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2010)

CANAL	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	5900	1640	30	0.0183	0.0030	0.3238	10.2
E2	6650	1475	50	0.0339	0.0030	0.6763	21.3
E3	7870	2295	50	0.0218	0.0015	0.2572	8.1
E4	6870	1150	60	0.0522	0.0035	1.2545	39.6
E5	13100	1150	50	0.0435	0.0030	1.7087	53.9
E6	7870	1475	60	0.0407	0.0035	1.1205	35.3
E7	6560	1970	60	0.0305	0.0025	0.4995	15.8
E8	3280	1310	40	0.0305	0.0040	0.4006	12.6
Total entradas							196.8

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 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 confiable de láminas de riego por cultivo, por correlación con acuíferos vecinos, se consideró que un 5 % del volumen aplicado al **uso agrícola retorna al acuífero** en forma de recarga inducida, considerando que la profundidad al nivel del agua subterránea en la zona agrícola varía de 25 a 50 m y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo.

El volumen de agua que se destina al uso agrícola es 130.1 hm³ anuales, de los cuales 77.5 hm³ son agua subterránea, 29.4 hm³ agua residual sin tratar y 23.2 hm³ de agua residual tratada.

Si consideramos que el 5 % del volumen aplicado en la agricultura retorna al acuífero, se obtiene un volumen de **6.5 hm³/ año** de recarga por retornos de riego.

Por otra parte, el rango de pérdidas por **fugas en las redes de distribución de agua potable y de alcantarillado** es del orden del 20 al 45 %. Para este, caso se consideró que el 22.5% del volumen destinado al uso público urbano (181.6 hm³ anuales) se infiltra como recarga efectiva al acuífero; es decir que la recarga inducida de esta manera es de **40.9 hm³ anuales**. Por lo tanto, el volumen total por recarga inducida R_i , es $6.5 + 40.9 = 47.4$. **$R_i = 47.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas subterráneas horizontales (Sh) y descarga a través de manantiales (Dm). No existe descarga por evapotranspiración (ETR), ni por flujo base de ríos (Dfb).

7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas se calculan de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del año 2010 (figura 5), el cálculo se muestra en la tabla 3. El volumen total estimado de salidas por flujo subterráneo asciende a **42.2 hm³ anuales**.

7.2.2 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **327.7 hm³ anuales**.

7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con el estudio realizado en el 2010, a través de manantiales se descarga un caudal aproximado de 603 l/s, que equivalen a un volumen de **19.0 hm³ anuales**.

Tabla 3. Calculo de salidas flujo subterráneo horizontal (2010)

CANAL	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	3280	3935	30	0.0076	0.0035	0.0875	2.8
S2	4260	2950	20	0.0068	0.0030	0.0866	2.7
S3	4920	3640	10	0.0027	0.0060	0.0811	2.6
S4	5245	2295	10	0.0044	0.0060	0.1371	4.3
S5	3280	1310	20	0.0153	0.0040	0.2003	6.3
S6	3935	1475	20	0.0136	0.0040	0.2134	6.7
S7	3280	1800	20	0.0111	0.0040	0.1458	4.6
S8	3935	1640	10	0.0061	0.0065	0.1560	4.9
S9	4100	1150	10	0.0087	0.0065	0.2317	7.3
Total salidas							42.2

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2002-2010 (figura 6). Con base en ella y considerando un valor de rendimiento específico promedio de $S = 0.042$ (adoptado por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos Soltepec y Huamantla), se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 1308 km², 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 (km²);

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

Como consecuencia de la explotación intensiva del recurso, la posición del nivel piezométrico ha descendido, propiciando una variación negativa del almacenamiento. Los valores obtenidos para cada variación piezométrica se pueden observar en la tabla 4.

El volumen anual del cambio de almacenamiento para este periodo es de -225.5 hm³, que representa un promedio anual de **-28.2 hm³/año**. De esta manera, **$\Delta VS = - 28.2$ hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2002-2010)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
-20	-20	2.0	0.042	-1.7
-10	-10	5.0	0.042	-2.1
-15 a -20	-17.5	29.0	0.042	-21.3
-10 a -15	-12.5	62.0	0.042	-32.6
-5 a -10	-7.5	382.0	0.042	-120.3
-2 a -5	-3.5	323.0	0.042	-47.5
0	0	505.0	0.042	0.0
Área de balance		1308.0	TOTAL	-225.5
		Promedio anual		-28.2

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, obteniendo lo siguiente:

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

$$R_v = 327.7 + 19.0 + 42.2 - 196.8 - 47.4 - 28.2$$

$$R_v = 116.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 116.5 + 196.8 + 47.4$$

$$R = 360.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero.

Para este caso, su valor es de **360.7 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que 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 **DNC = 61.2 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), 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 **281,482,546 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 360.7 - 61.2 - 281.482546 \\ \text{DMA} &= 18.017454 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **18,017,454 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1990. Estudio der Actualización Geohidrológica del Valle de Puebla, realizado por Exyco, S.A.

Comisión Nacional del Agua, 1997. Reactivación de la Red de Monitoreo del Acuífero de la Cuenca de Puebla, Estado de Puebla. Realizado por UNITECNIA, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio Geohidrológico del Acuífero Valle de Puebla, en el Estado de Puebla. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Actualización del Estudio Geohidrológico en el Valle de Puebla. Realizado por Perforaciones y Estudios Geológicos, S. A. (PEGSA) en 1981 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1989. Estudio de Exploración Geohidrológica en la Zona de Pueblas. Realizado por Lesser y Asociados, S. A. de C.V.