

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Tepeji del Río (1316),
Estado de Hidalgo***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

DCXLVII REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO"

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					

ESTADO DE HIDALGO

1316	TEPEJI DEL RÍO	46.3	35.2	9.636374	7.0	1.463626	0.000000
------	----------------	------	------	----------	-----	----------	----------

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



***Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos***

***ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO TEPEJI DEL RÍO (1316), ESTADO DE
HIDALGO***

México D.F. Diciembre 2013

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	7
3.1. Provincia Fisiográfica	7
3.2. Clima	7
3.3. Hidrología superficial	7
3.4. Geomorfología	8
4. GEOLOGÍA	8
4.1. Estratigrafía	9
4.2. Geología estructural	17
4.3. Geología del Subsuelo	19
5. HIDROGEOLOGÍA	19
5.1. Tipo de acuífero	19
5.2. Parámetros hidráulicos	20
5.3. Piezometría	20
5.4. Comportamiento hidráulico	20
5.4.1 Profundidad al nivel estático	20
5.4.2 Elevación del nivel estático	20
5.4.3 Evolución del nivel estático	21
5.5. HIDROGEOQUÍMICA Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	23
7.1. Entradas	24
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	24
7.1.2 Recarga inducida (Ri)	25
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	26
7.2. Salidas	27
7.2.1 Bombeo (B)	27
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	27
7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)	27
7.2.4 Descarga por flujo base (Dfb)	28
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	28
8. DISPONIBILIDAD	28
8.1. Recarga total media anual (Rt)	29
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)	29
8.3. Volumen concesionado de agua subterránea (VCAS)	29
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA).

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 Tepeji del Río definido con clave 1316 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción suroccidental del estado de Hidalgo, entre los paralelos 19° 34' y 19°58' de latitud norte y los meridianos 99° 18' y 99° 32' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 406 km² (Figura 1).

Limita al norte y oeste con el acuífero Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo; al este con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, al suroeste con los acuíferos Valle de Toluca e Ixtlahuaca-Atzacomulco, estos tres pertenecen al Estado de Hidalgo.

Geopolíticamente abarca parcialmente los municipios Tepeji del Río de Ocampo, en el Estado de Hidalgo; Villa del Carbón, Tepetzotlán, Nicolás Romero y una pequeña porción del municipio Jiquipilco, todos ellos pertenecientes al Estado de México.

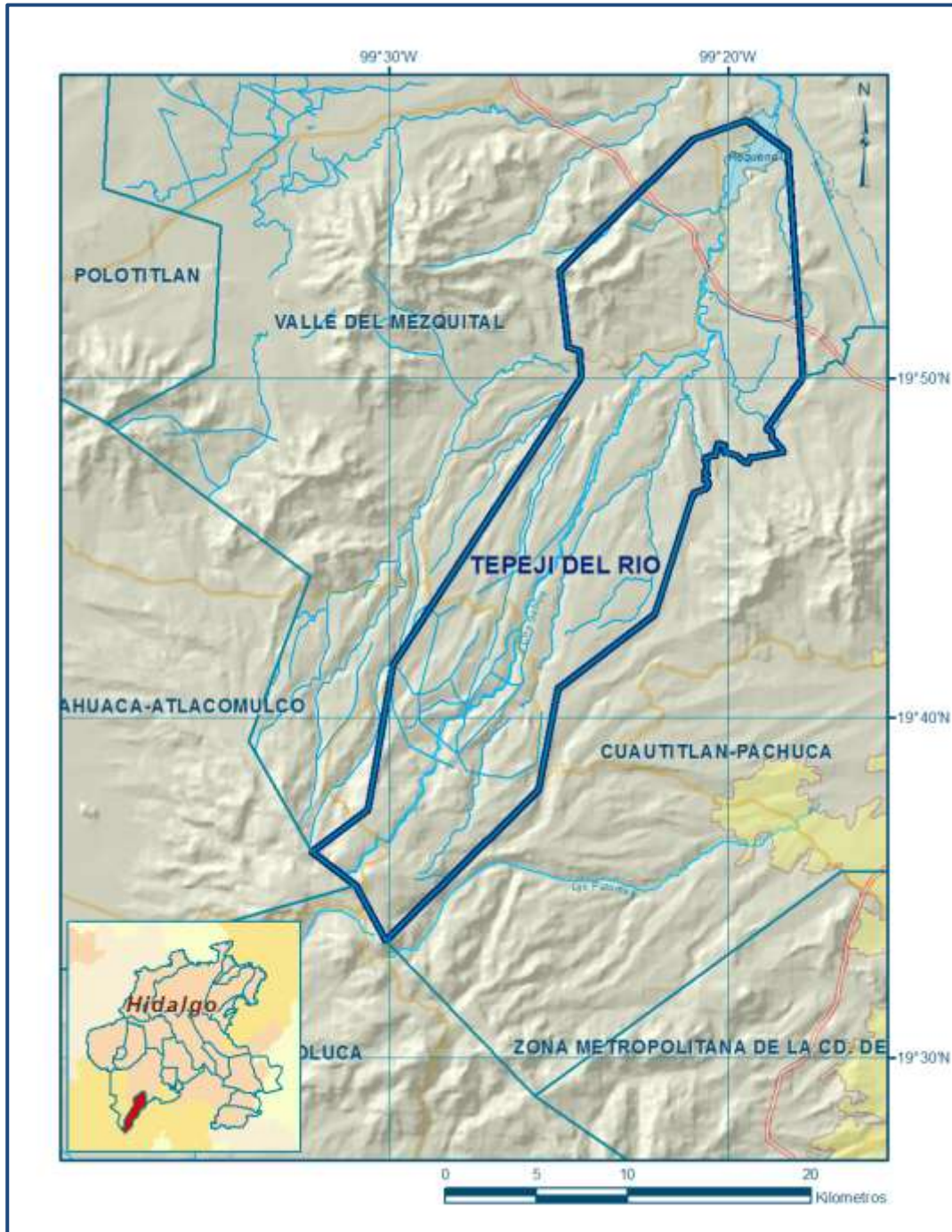


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1316 TEPEJI DEL RIO

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	30	6.3	19	33	27.0	
2	99	30	59.2	19	35	4.1	
3	99	32	16.9	19	36	3.3	
4	99	30	38.2	19	37	16.8	
5	99	29	52.8	19	41	34.3	
6	99	24	20.0	19	50	2.1	
7	99	24	23.0	19	50	49.1	DEL 7 AL 8 POR EL LIMITE ESTATAL
8	99	24	42.7	19	50	54.3	
9	99	24	57.9	19	53	10.7	
10	99	21	0.7	19	57	2.8	
11	99	19	28.5	19	57	35.8	
12	99	18	14.8	19	56	42.0	
13	99	17	48.0	19	50	4.5	DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE ESTATAL
14	99	21	4.4	19	46	31.0	
15	99	22	11.0	19	43	2.7	
16	99	25	1.9	19	40	50.6	
17	99	25	36.0	19	37	50.6	
1	99	30	6.3	19	33	27.0	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tepeji del Río pertenece al Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Hidalgo. Su territorio se encuentra parcialmente vedado. La mayor parte está sujeto a las disposiciones del “*Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos del Estado de México, que no quedaron en la vedas impuestas mediante Decretos Presidenciales de 7 de diciembre de 1949, 21 de julio de 1954, 10 de agosto de 1965 y 14 de abril de 1975 y Acuerdo Presidencial de 11 de julio de 1970*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 10 de julio de 1978, esta veda se clasifica como tipo II en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. Una pequeña porción de la zona sur está regida por el “*Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida por Cuenca o Valle de México*”, publicado en el DOF el 19 de agosto de 1954, esta veda se clasifica como tipo I en las que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.

La porción no vedada del acuífero Tepeji del Río, clave 1316, 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 del cual 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 de Materia de Agua 2013, los municipios Tepetzotlán y Nicolás Romero se clasifican como zona de disponibilidad 1, el municipio Villa del Carbón como zona de disponibilidad 2, Tepeji del Río de Ocampo como zona de disponibilidad 5 y Jiquipilco como zona de disponibilidad 6.

El principal usuario es el público urbano. En el territorio del acuífero no se localizan ninguna unidad o Distrito de Riego. Actualmente no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona del acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y de otros tipos. A continuación se mencionan los estudios más recientes e importantes:

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO DE TEPEJI DEL RÍO, ESTADO DE HIDALGO, elaborado por la Compañía Thorsa, S.A. de C.V. en 2001. El objetivo del trabajo fue determinar el modelo de funcionamiento del sistema acuífero. Se identificaron niveles estáticos someros, con profundidades menores a los 10 m y profundos, con valores mayores a 100 m. Los análisis químicos practicados a las muestras de agua subterránea reportaron baja salinidad, en general menor de 500 mg/l. Se obtuvieron valores de transmisividad de 0.0718 a 79.6 m²/s y coeficientes de almacenamiento de 0.0133 a 0.4398. Entre sus conclusiones preliminares más importantes destaca la existencia de un sistema acuífero de tipo libre a semiconfinado, en el que fue posible calcular una recarga media anual de 4.3 hm³.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO DE TEPEJI DEL RÍO, HIDALGO. Realizado para la Comisión Estatal de Aguas (CEA) y Alcantarillado del Estado de Hidalgo por la empresa Lesser y Asociados S.A. de C.V. en 2007. Los objetivos del trabajo fueron actualizar el

conocimiento hidrogeológico del acuífero, realizar un balance del agua subterránea y determinar la disponibilidad de agua subterránea de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana; así como desarrollar un modelo matemático para la simulación hidrodinámica del acuífero.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA-FINANCIERA Y SOCIAL DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN-CAPTACIÓN-CONDUCCIÓN Y ENTREGA DEL AGUA DEL ACUEDUCTO VALLE DEL MEZQUITAL-ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO. Elaborado por FG y Asociados para el Sistema de Aguas de la Ciudad de México en 2009. El objetivo de este estudio fue determinar la viabilidad técnica, económica, financiera, social y ambiental de un sistema de aprovechamiento integral de los acuíferos localizados en el Valle del Mezquital, como una fuente para el abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) para desarrollar el anteproyecto que permita cuantificar los costos de agua en bloque y determinar su competitividad con relación a otras fuentes de abastecimiento.

ANÁLISIS TÉCNICO Y PRUEBAS DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL MEZQUITAL, EN DIVERSOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE HIDALGO. Elaborado por Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en 2010. Los objetivos de este trabajo fueron estimar los efectos de la exposición a contaminantes emergentes por uso y consumo de agua ante diferentes escenarios de tratamiento; establecer la distribución más probable de dichos contaminantes en el medio ambiente; determinar a escala piloto la eficiencia y costo del uso de membranas para la eliminación de contaminantes y proponer el diseño funcional más adecuado para el tratamiento del agua del acuífero con fines de uso y consumo humano.

ESTUDIOS TÉCNICOS DE GEOHIDROLOGÍA, CALIDAD DEL AGUA, TENENCIA DE LA TIERRA Y ASPECTOS SOCIALES EN LA ZONA DE CAPTACIÓN PARA EL “SISTEMA MEZQUITAL PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN BLOQUE AL VALLE DE MÉXICO E HIDALGO”. Elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C. V. para la Comisión Nacional del Agua en 2012-2013. El objetivo del estudio fue conocer el funcionamiento actual del acuífero Valle del Mezquital, incluyendo los valles de Actopan, Ixmiquilpan y Chapantongo y determinar el volumen de agua que podría ser obtenido del subsuelo y conducido hacia la Ciudad de México para apoyar su abastecimiento. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos, pruebas de bombeo, ejecución de sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para actualizar la disponibilidad. Define el aprovechamiento potencial y los sitios susceptibles para la ubicación de nuevos aprovechamientos; mediante un modelo numérico de flujo subterráneo simula diferentes escenarios de extracción y establece las afectaciones que se generarían a los usos actuales.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia Fisiográfica

De acuerdo con la clasificación fisiográfica de Raisz (1964), la zona se ubica dentro la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico que en esta región se caracteriza por planicies construccionales escalonadas o valles fluviales, aluviales y lacustres, poco disectados, en la Subprovincia Fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI, 2001).

3.2. Clima

Con base en la clasificación de climas elaborada por W. Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, se establece que en la superficie que cubre el acuífero se presentan dos tipos de climas. En la porción norte el clima se clasifica como BS1 Kw(w), que corresponde a un clima templado semiseco; en tanto que en la porción sur la topografía se eleva y el clima cambia gradualmente a C(w1) (w) y C(E)(w2) (w), que corresponde a la gama de climas templados, subhúmedos con lluvias en verano.

La precipitación pluvial presenta valores de 700 mm anuales en la zona de Tepeji del Río y se incrementa hacia el sur hasta 1200 mm, conforme aumenta la elevación topográfica. En la estación climatológica Tepeji, el valor medio anual registrado es de 704.5 mm.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 6 estaciones que tienen influencia en la superficie del acuífero: Tula, Taxhimay, Atotonilco, Presa Endhó, Mixquiahuala y Tepeji. Sin embargo, no todas las estaciones tienen registro continuo para un mismo periodo, por lo que se optó por determinar la temperatura de la información disponible de las estaciones climatológicas y la precipitación a partir del mapa de isoyetas del INEGI, (anuario estadístico del Estado de Hidalgo, 2010). De esta manera, se obtuvieron valores de precipitación y temperatura media anual de **800 mm** y **16.0 °C**, respectivamente. En cuanto a la evaporación potencial, su valor promedio anual es del orden de los **1630 mm**.

3.3. Hidrología superficial

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica (RH) 26 Pánuco, Subregión Hidrológica Río Tula, en la cuenca del Río Moctezuma, subcuenca del Río El Salto. El colector más importante es el Río Tula, que en sus inicios se conoce como Río Tepeji, entre las presas Taxhimay y Requena, tramo en que recibe los aportes de los ríos Oro, Los Sabinos y San Jerónimo. Aguas abajo, con rumbo N-NW el Río Tepeji es interceptado por la presa Requena con el propósito de contener y controlar sus descargas. A la salida de la presa Requena se inicia el Río Tula, con una dirección

noroeste, hasta descargar su caudal a la presa Endhó. Aguas abajo de la presa Requena se suman las aguas negras del Río El Salto y del emisor central que conduce las aguas residuales procedentes de la ciudad de México. Por otra parte el Río El Salto es la continuación del tajo de Nochistongo, obra que es utilizada para dar salida a las aguas negras del sector poniente de la Ciudad de México; el Río Salado recibe aportaciones del antiguo túnel de Tequixquiac.

Como parte de la infraestructura hidráulica, en la porción centro y norte del acuífero, hacia el límite con el acuífero Valle del Mezquital, se localizan las presas Taxhimay y Requena, respectivamente.

3.4. Geomorfología

De acuerdo con el relieve topográfico se distinguen cuatro unidades geomorfológicas: valles, lomeríos, mesetas y sierras.

Valle. Es de origen aluvial y está conformado por depósitos de material granular que acumulan en la parte más baja de la cuenca, a lo largo del curso del arroyo Los Sabios, antes de su confluencia en la Presa Requena. En él se aloja la ciudad de Tepeji del Río y su altitud media es de 2170 msnm.

Lomeríos. Se localizan entre los poblados Villa del Carbón, San Luis Anáhuac y San Buenaventura, presentan formas redondeadas y fuertes pendientes, están constituidos por volcánicas y vulcanosedimentarias. Cuando están conformados por tobas y brechas presentan formas suaves y poca pendiente, erosionados.

Mesetas. Se localizan en la porción norte del acuífero y están constituidas principalmente por derrames de lavas basálticas emplazadas horizontalmente y posteriormente erosionadas; adoptando su morfología característica de mesetas escalonadas.

Sierras. Están constituidas por rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno, principalmente andesitas, riolitas y brechas. En el extremo norte, fuera del límite del acuífero, conforma sierras de calizas del Cretácico. Su elevaciones varían de 2400 y 3000 msnm y se levantan entre 250 y 800 m sobre el nivel de los valles.

4. GEOLOGÍA

La geología superficial está representada principalmente por rocas volcánicas de ambiente geotectónico asociado a un arco continental y en menor proporción por rocas sedimentarias del Cretácico y de ambiente geotectónico relacionado al orógeno de la Sierra Madre Oriental (Figura 2).

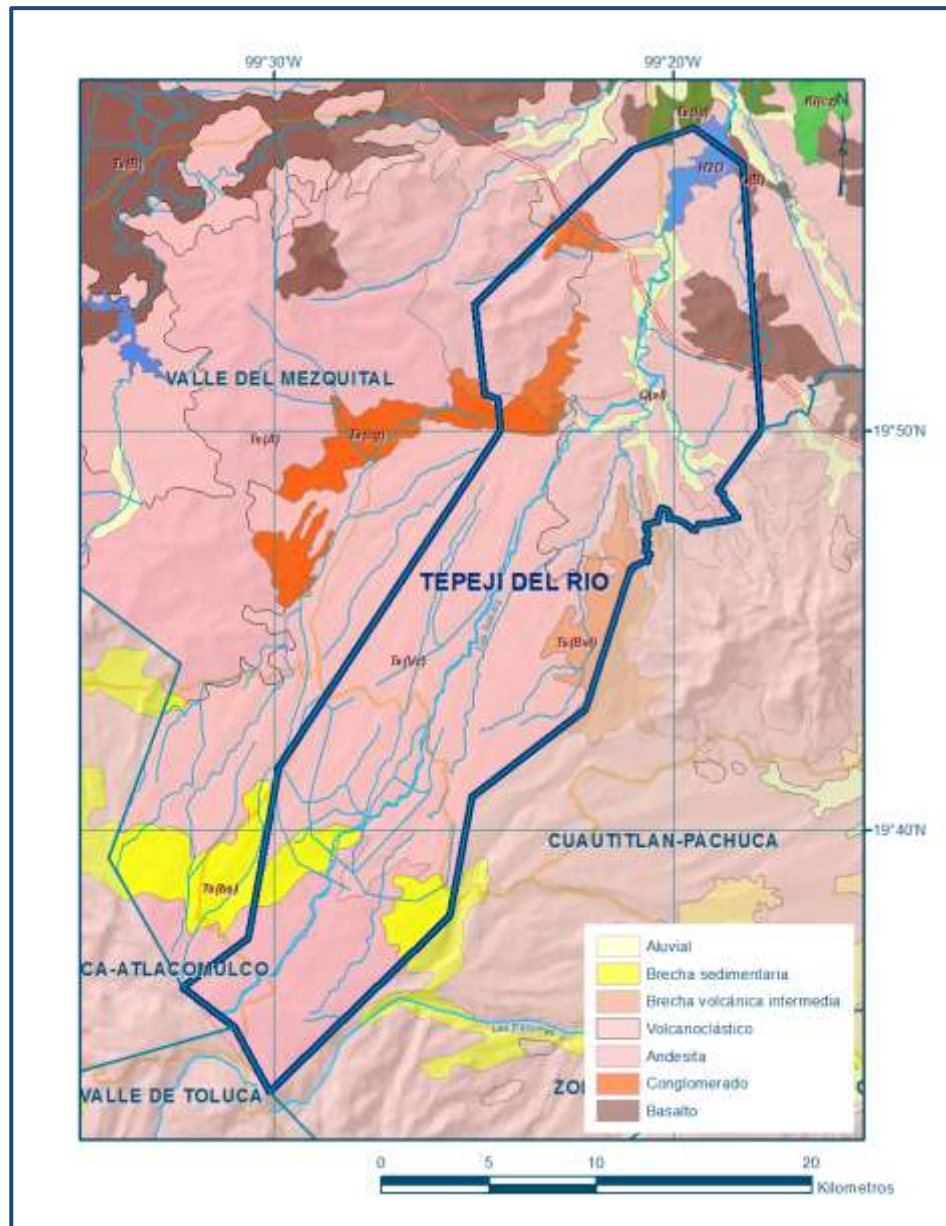


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía de la región incluye rocas sedimentarias y volcánicas cuyo registro comprende del Cretácico Superior al Reciente. A continuación se describe la secuencia estratigráfica, de la unidad más antigua a la más reciente:

Cretácico Superior

Formación El Doctor

Fue definida formalmente por Wilson *et al.* (1955), para designar a rocas calcáreas de banco de edad Albiano Medio-Cenomaniano Temprano. Posteriormente, en 1962, Fries menciona que la facie de

cuenca de esta unidad es la que aflora entre Apaxco y Tula, Hidalgo y que probablemente hacia el sur se interdigite en el subsuelo con la Formación Morelos. Según Fries, corresponde a una secuencia de 200 m de espesor de calizas de textura fina en capas delgadas, con nódulos y lentes de pedernal e intercalaciones locales de lutita. Aflora al norte del acuífero, fuera de sus límites.

Corresponde a la unidad más antigua que aflora en la zona de estudio. Está formada por rocas calizas de grano fino (micritas) compactas, dispuestas en estratos de 50 cm de espesor. Presenta color gris a gris claro y abundantes fósiles. Aflora en la sierra ubicada al noreste de Xochitlán (en el norte del Valle del Mezquital) y en los cerros de Bomintzhá y Conejos (en el sur del valle). Constituye el basamento de la región. En la parte central del valle (en la zona del volcán Xicuco), se encuentran sepultadas a 400 y 500 metros de profundidad (Comisión Federal de Electricidad, 1996). Se estima que su espesor máximo alcanza 2000 m.

Formación Soyatal

Esta formación definida por Wilson *et al.* (op. cit.), aflora fuera del área de estudio en el noroccidente donde tiene aproximadamente 100 m de espesor total, mientras que hacia el oriente disminuye hasta desaparecer. Las capas de caliza varían de delgadas a medianas y raras veces exceden 30 cm de espesor, es común una laminación fina. Hacia arriba en la sucesión, se presentan capas de lutitas calcáreas. Los fósiles encontrados constan principalmente de bivalvos del género *Inoceramus*, indicando una edad turoniana, por lo que puede correlacionarse con la Formación Agua Nueva (Stephenson, 1921) de la Cuenca de Tampico, o sea la parte inferior del Grupo Xilitla (Bodenlos, 1956). Sobreyace a la Formación El Doctor, aparentemente sin discordancia angular. Aflora al norte del acuífero, fuera de sus límites.

Al suroccidente de la zona, fuera del área del acuífero, aflora una sucesión de capas gruesas de calizas con más de 200 m de espesor total, de facies de banco submarino, con abundantes biostromas repletos de rudistas y gasterópodos, que comprueban una edad turoniana (Fries 1962). Esta caliza es bastante pura, no tiene intercalaciones de capas dolomíticas, presenta algo de pedernal y fósiles silicificados. Sin embargo, esta sucesión de calizas se correlaciona más con la Formación Cuautla, que aflora al sur de la Cuenca de México (Fries, 1960), que con la Formación Soyatal.

Formación Mexcala

Denominada por Fries (1960) en la cuenca del Río Balsas, en su localidad tipo del poblado Mexcala, Guerrero. En el área de estudio descansa encima de la Formación Soyatal y está formada en su porción inferior por capas alternadas de limolita, lutita, marga y arenisca (grauvacas o subgrauvacas). Hacia la cima las capas de marga y caliza desaparecen y las areniscas predominan, incluso con capas intercaladas de conglomerado de fragmentos finos. Es probable que su espesor máximo en los sinclinales más profundos, se encuentre entre los 600 y 1,000 m. Aflora al norte y este del acuífero.

La Formación Mexcala es poco resistente a la erosión y tiende a formar valles drenados por ríos subsecuentes. En el área aflora en el sur y suroeste, en los cerros Blanco y al sur de Bomintzhá, al suroeste del cerro El Elefante, en las inmediaciones del poblado de Mixquiahuala, al norte de Santiago de Anaya y en la porción nororiental.

Fries (*op. cit.*) considera que la parte basal de esta sucesión clástica es de edad coniaciana, mientras que los fósiles colectados por Segerstrom (1961) en la región de Zimapán, al noroeste del área, señalan edades desde el Coniaciano hasta el Campaniano. Su depósito ocurrió en aguas marinas someras y representa una secuencia Flysch (De Cserna, 1988), la cual posiblemente se originó como consecuencia del levantamiento y erosión del arco magmático durante el Cretácico del borde occidental del continente (Damon *et al.*, 1981).

Terciario

Grupo el Morro

De acuerdo con Segerstrom (*op. cit.*), esta es la primera unidad post-mesozoica en el área; consta de sedimentos continentales que sobreyacen localmente a las rocas cretácicas plegadas y profundamente erosionadas, con gran discordancia angular y erosional. Aflora de manera aislada en pequeñas áreas ubicadas en diferentes localidades: al sur de Tula del Progreso, en las faldas e inmediaciones del cerro Bomintzhá y en los límites del cerro San Miguel de La Cal y cerro El Elefante. Las rocas que lo conforman son muy resistentes a la erosión y tienden a formar acantilados.

La litología del Grupo el Morro es extremadamente variable, pero la composición más típica corresponde a un conglomerado calizo muy compacto y cementado, de color rojo, cuyos componentes se derivaron de la erosión de las rocas cretácicas infrayacentes. Este conglomerado contiene localmente intercalaciones de arenas y limos de color pardo, así como capas de grano fino de material tobáceo o lítico volcánico. La litología es aún más variable fuera de los límites del área, al norte, incluyen calizas lacustres, yesos, derrames de lava y otros productos volcánicos.

En la región de Zimapán, la unidad fue denominada Fanglomerado el Morro por Simons y Mapes (1957). En el Estado de Morelos y en gran parte de la cuenca hidrográfica del Río Balsas, dicha unidad fue nombrada Grupo Balsas (Fries, 1960). En las cercanías de la ciudad de Guanajuato existe una sucesión muy gruesa de sedimentos correlacionables con el Grupo El Morro. Estos fueron descritos por Edwards (1955) como “Conglomerado Rojo de Guanajuato” y por los fósiles vertebrados encontrados en ellos, se les asignó una edad correspondiente al Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano (Fries *et al.*, 1955), misma que se asigna al Grupo El Morro en el área de estudio (Fries, 1960). El Grupo El Morro posiblemente es el resultado de la acumulación rápida de sedimentos de origen terrestre en una cuenca de hundimiento (Simons y Mapes, 1956). Según, De Cserna *et al.* (*op. cit.*), este grupo representa una molasa continental post Orogenia Laramide. El espesor de los restos

observables en el área, es de algunas decenas de metros, aunque no sería raro encontrar espesores de varios cientos de metros. Es común encontrar esta unidad en zonas de estructura sinclinal y encima de bloques fallados hacia abajo (Fries, 1960).

Grupo Pachuca

El nombre fue propuesto por Segerstrom (*op. cit.*) para referirse a rocas volcánicas, cuya composición varía de basalto a riolita, que sobreyacen en discordancia erosional al Grupo El Morro y en algunos lugares en discordancia angular; de igual manera descansan en discordancia angular sobre rocas cretácicas. La sucesión más gruesa y más completa de estas rocas se define en la Sierra de Pachuca, en donde están muy falladas, intrusionadas, alteradas hidrotermalmente y mineralizadas, que subyacen a corrientes de riolita. Pertenecen también a este grupo las rocas volcánicas que afloran en la Sierra de Actopan, Sierra de Xinthé y en el cerro El Picacho, ubicado al norte de Santa María Ajoloapan, por su similitud con las rocas de la Sierra de Pachuca. El SGM (1999) se refiere como Grupo Pachuca las rocas volcánicas que afloran en las sierra La Joya o Cerro Grande, localizadas al poniente de la zona de estudio.

Por su parte Fries (1962), define Rocas Volcánicas no Diferenciadas a todas las volcánicas con posición estratigráfica parecida, excluyendo las del Grupo Pachuca, con excepción de las volcánicas de las Sierras de Pachuca y Actopan, por no haberse estudiado con suficiente detalle para poder correlacionarlas con diversas formaciones que componen dicho grupo. Entre estas rocas se encuentran las que conforman la Sierra Xinthé y Cerros de Mexe, Chinfo y El Picacho, entre otros. El mismo autor, piensa que estas rocas tuvieron sus propios centros eruptivos de emisión, ubicados en las cercanías o aún debajo de los afloramientos actuales. Las fuentes magmáticas de todas estas rocas probablemente estuvieron comunicadas a profundidad o tuvieron un mismo origen.

El Grupo Pachuca fue dividido en ocho formaciones (Tezuantla, Cerezo, Vizcaína, Santa Gertrudis, Real del Monte, Pachuca, Corteza y Santiago) basado en estudios detallados realizados de la geología del distrito minero Pachuca-Real del Monte (Geyne, *et al.*, 1963), en donde predomina la andesita y la sucesión tiene más de 2,500 m de espesor. Todas las formaciones mencionadas están constituidas por capas o estratos interdigitados, compuestos por derrames de lava, brecha volcánica y toba. Tiene algunas capas clásticas interestratificadas (conglomerado volcánico y arenisca tobácea) y localmente depósitos lacustres (calizas, lutitas y margas). Las discordancias erosionales dentro del grupo, son de tal magnitud que una de las formaciones más recientes puede descansar directamente sobre una de las más antiguas. En la Sierra de Actopan está representada por aproximadamente 500 m de basalto, andesita y riolita y en la Sierra Xinté afloran de 600 a 700 m de andesitas. En el Cerro El Picacho, la sucesión volcánica es delgada, inferior a 150 m de espesor.

La edad del Grupo Pachuca queda limitada por la del Grupo El Morro, infrayacente y la de la Formación Zumate, suprayacente; es decir, debe ser más reciente que el Oligoceno Temprano y más

antigua que el Plioceno Temprano. Este grupo marca el inicio de una fuerte actividad volcánica a principios del Terciario, que obstruyó el drenaje fluvial de ríos antiguos y, en consecuencia, se formaron incipientes cuencas endorréicas lacustres. Por su amplio rango de edad, incluyen rocas volcánicas relacionadas genéticamente con la actividad terminal del arco magmático de la Sierra Madre Occidental e inicio de la actividad del arco continental de la Franja Volcánica Transmexicana (Vázquez y Jaimes, 1989).

Las secciones geológicas disponibles, muestran que el Grupo Pachuca, por el efecto de fallas normales que lo desplazan (al igual que la Formación El Doctor), se profundiza desde el flanco de los valles del área hacia el centro de los mismos, constituyendo la roca basal de algunos de estos valles en donde comúnmente está cubierto por materiales de relleno de la Formación Tarango y Grupo San Juan. En el valle de Actopan, se presenta aproximadamente a 400 m de profundidad y en la parte noreste del valle del Mezquital yace aproximadamente entre 330 y 660 m de profundidad. En el valle de Ajacuba, se encuentra a 520 m de profundidad y en el valle de Tepatepec a más de 600 m de profundidad aproximadamente. Por la misma distribución en el subsuelo del Grupo Pachuca, ha sido penetrado por algunas perforaciones de pozos de abastecimiento de agua de menos de 200 m de profundidad, sobre el flanco de los valles mencionados y sobre los flancos del Cerro Grande, ubicado al sur de la Sierra Xinthé.

Toba Don Guinyó

Fue definida por Segerstrom (*op. cit.*) para referirse a tobas, brechas volcánicas e ignimbritas compactas con lentes horizontales de obsidiana; de composición dacítica a riolítica, que parecen haberse acumulado sobre una superficie muy erosionada. Afloran en las inmediaciones de Tula (Cerro Xicuco, Arroyo El Corazón, Río Jilotepec). De acuerdo con el SGM (*op. cit.*), también afloran en el flanco norte y sur de la Caldera de Huichapan, localizada al poniente, fuera del área de estudio. Estas ignimbritas tienen aproximadamente 170 m de espesor en el Cerro Xicuco

El Cerro Xicuco es evidencia de un manto más extenso, ahora erosionado, que tiene su desarrollo hacia el poniente, posiblemente asociado con la Caldera de Huichapan. Por la posición topográfica y la erosión profunda, su edad corresponde al Plioceno Medio (Fries, 1962). La CFE (*op. cit.*) identificó la Toba Don Guinyó en extensión y acuñaamiento hacia el sur del Cerro Xicuco, a 400 m de profundidad máxima, sobreyacida por arcillas de los depósitos lacustres del Plioceno Medio.

Formación Zumate

En las partes más elevadas de las Sierras de Actopan y Pachuca, se presenta una sucesión de rocas andesíticas y dacíticas, formada por la interestratificación de derrames de lava, capas de brecha y depósitos de lahar, que se han denominado Formación Zumate (Geyne *et al.*, *op.cit.*). Sobreyace con marcada discordancia erosional al Grupo Pachuca. Esta formación está inalterada, poco fallada y sin mineralización de cuarzo, pero intrusionada por algunos diques; se caracteriza por la textura porfídica

de sus lavas excepcionalmente gruesas y por sus formas erosionales de pináculos (Segerstrom, *op. cit.*). Parece que la fuente de eyección de estas rocas, estuvo localizada dentro del área actual de afloramiento y, aunque la sucesión está bastante erosionada, aún permanece un espesor máximo de 360 m. Su acumulación ocurrió después de la mineralización en el distrito minero de Pachuca, por lo que su edad se supone corresponde al Plioceno Medio (Fries, 1962).

El SGM (*op. cit.*) correlaciona con la Formación Zumate a las rocas volcánicas que afloran en las sierras ubicadas al poniente de la población Tepeji del Río (Sierras El Templo, Canoas, Las Ánimas y Coamango) y en el Cerro Grande al noroeste de Chapantongo.

Formación Taximay

Depósitos lacustres que consisten principalmente de arcillas de consolidación avanzada que no afloran en el área que cubre el acuífero. La edad de estos depósitos se asigna al Plioceno Medio, debido a que descansan sobre la Toba Don Guinyó infrayacente y es cubierta por la Formación Tarango con una marcada discordancia erosional. Estas arcillas fueron reconocidas por Mooser (2010) como Formación Taximay, en el subsuelo entre Huehuetoca y Tula de Allende. Presentan un espesor mayor de 50 m y se identifica en las partes topográficamente más bajas y a 130 m en la zona del parteaguas hidrográfico entre el valle del Mezquital y valle de Zumpango, localizado al sur.

En el Valle del Mezquital, se ha identificado la presencia de estas arcillas a profundidad, también cubiertas por la Formación Tarango en discordancia angular. La sección geológica que atraviesa el valle, entre los cerros Bomintzhá y El Elefante, muestra que las mismas arcillas se profundizan debido a las fallas normales que la desplazan, desde el flanco sur del valle, en donde ocurren aproximadamente a 50 m de profundidad, hacia el norte del valle en la zona de Mixquiahuala, donde se encuentran aproximadamente a 260 m de profundidad. La misma sección geológica muestra la presencia de capas intercaladas de gravas y arenas en el flanco sur del valle, que se interpretan como abanicos aluviales de frente montañoso antiguo. Se estima que su espesor es mayor de 160 m.

La CFE (*op. cit.*) dividió la Formación Tarango en dos miembros con base en secciones geológicas-geofísicas realizadas en la zona del Cerro Xicuco. El miembro inferior, lo define como tobas lacustres arcillo-arenosas de 200 m de espesor promedio, cuyas resistividades no sobrepasan 15 ohms/m. El miembro superior, se refiere a tobas areno-arcillosas de 220 m de espesor que sobreyacen en discordancia erosional al miembro inferior. Las tobas lacustres se correlacionan con la unidad de los depósitos lacustres del Plioceno Medio, ya que guardan la misma posición estratigráfica que las arcillas lacustres reconocidas en el subsuelo en las otras zonas descritas del valle del Mezquital. Estas arcillas lacustres no han sido reconocidas en el subsuelo de los otros valles del área de estudio (valles de Ajacuba, Tepatepec y Actopan), cuyo relleno granular se ha identificado formado sólo por la Formación Tarango.

Basaltos Grupo San Juan

Las rocas máficas de composición variable de basalto a andesita que sobreyacen a las rocas volcánicas más antiguas en discordancia erosional y a las rocas mesozoicas con marcada discordancia angular y erosional, fueron definidos como Grupo San Juan por Segerstrom (*op. cit.*). Afloran ampliamente formando extensas mesetas altas, como el Cerro El Gorrión y conos volcánicos aislados entre la Sierra de Pachuca y Tula de Allende. También forma la cima de altas colinas aisladas, como los cerros La Palma y Xicuco.

La secuencia consiste principalmente en derrames de lava con escasas capas interestratificadas de tobas, brechas volcánicas y conglomerados volcánicos. Según Robin (1982), las características petrológicas de estas rocas las ubican en una serie intermedia entre alcalinas y calcoalcalinas. En la Sierra de Pachuca, el grupo es conocido con el nombre de Formación San Cristóbal (Geyne, *et al.*, *op cit.*), por el Cerro San Cristóbal (localidad en la que se descubrió la especie mineral cristobalita) ubicado justamente al norte de la ciudad de Pachuca, cuya cima consta de derrames de andesita de olivino y piroxeno. Un cambio de litofacies hacia el poniente, desde basalto a andesita de hornblenda, fue observada por Segerstrom (*op cit.*) en la parte inferior de la sección predominantemente basáltica al noroeste y oeste de Zumpango. El nombre de Andesita Jalpan, se refiere a estas rocas (Hibbrad, 1955).

Su espesor es muy variable, pero no mayor a 400 m, observados en el Cerro El Gorrión. Por sus relaciones estratigráficas con otras rocas y su grado de erosión muy avanzada, se deduce que su edad varía del Plioceno Medio al Plioceno Superior. Estas rocas volcánicas y otras máficas equivalentes, están interestratificadas localmente con sedimentos clásticos de la Formación Tarango, equivalente de la Formación Atotonilco El Grande de la Cuenca del Río Amajac. En la porción sur del acuífero las erupciones volcánicas que las originaron no fueron explosivas y aparentemente ocurrieron a lo largo de grietas o fallas normales. Cantagrel y Robin (1979) agruparon estas rocas volcánicas con otras mesetas máficas y lavas no diferenciadas que afloran en Guanajuato y Jalisco, a las que consideraron típicas de la parte septentrional del vulcanismo Plio-Cuaternario.

Se han reconocido estas rocas en el subsuelo de los valles del área estudiada, mediante varias perforaciones de pozos de abastecimiento de agua potable, las cuales han penetrado basalto y escorias volcánicas asociadas, a diferentes niveles de profundidad y espesor. Por otra parte, las secciones geológicas disponibles muestran que estos basaltos se encuentran intercalados con tobas de las Formación Tarango y con las arcillas subyacentes de los depósitos lacustres del Plioceno Medio. Ocurren formando capas lenticulares entre el Cerro Bomintzhá y Cerro El Elefante. En otras zonas, forman capas de considerable extensión continua, tal como ocurre en el Cerro Xicuco, en la zona entre Muntepec y Río Tula y entre los valles de Ajacuba y Tepatepec, donde los basaltos de la Mesa Rincón Los Caballos tienen continuidad lateral en toda la región. De la misma forma, los

basaltos que afloran entre Santa María Ajoloapan y la ciudad de Pachuca, tienen continuidad lateral en el subsuelo, sobreyaciendo al Grupo Pachuca en discordancia erosional.

Formación Tarango

Los sedimentos clásticos de relleno de valles antiguos erosionados activa y profundamente por el Río Tula y sus efluentes, fueron relacionados con la Formación Tarango en el área por Segerstrom (op. cit.) y por Fries (1962), a partir de la definición original de Bryan (1948) en la localidad tipo ubicada al poniente de la ciudad de México, sobre el flanco poniente de la Sierra Las Cruces. Gran parte del área está cubierta por la Formación Tarango, la cual aflora extensamente en la zona del parteaguas hidrográfico con la Cuenca de México, entre las poblaciones de Tepeji del Río, Tula de Allende y Ajacuba; en el flanco poniente de la Sierra Actopan; en el flanco oriente de las Sierra Xinthé y sierras ubicadas más al sur; así como en las faldas del Cerro San Miguel de La Cal.

La mayor parte de la formación fue depositada por corrientes de aguas superficiales, por lo que está constituida por gravas, arenas, limos y arcillas, acumulados sobre antiguos cauces fluviales, llanuras de inundación y abanicos aluviales. Estos sedimentos clásticos están dispuestos generalmente en estratificación horizontal pero sus capas tienden a ser discontinuas lateralmente. También, se intercalan localmente con capas de tobas de grano fino y arenas pumíticas re-transportadas o procedentes de erupciones volcánicas contemporáneas. Localmente presenta sedimentos lacustres en forma de interestratos de arcillas, margas y tierras diatomáceas, lo que indica una interrupción del drenaje fluvial para formar pequeños lagos de corta duración. Existen depósitos de lentes de caliza con espesores hasta de 12 m en zonas cercanas a las localidades San Marcos, Atotonilco, Tula, Ajacuba y Tezontepec de Aldama, Hidalgo, así como Apaxco y Hueypoxtla-Tlapanloyan, en el estado de México. Casi en todas estas localidades existen manantiales termales, lo que hace pensar que las calizas tuvieron cierta relación con los manantiales ancestrales (Fries, 1962). En la localidad tipo, afloran tobas, brechas, gravas volcánicas de origen fluvial y delgadas capas de pómez, todas ligeramente endurecidas (Bryan, *op cit.*) y relacionadas con depósitos de lahar y abanicos aluviales (Fries, 1956). Vázquez y Jaimes (*op cit.*) en la zona de la localidad tipo, identifican una serie de sucesiones piroclásticas, que comienzan con capas delgadas de pómez de caída y de ceniza-lapilli de oleadas (surges), seguida por gruesos paquetes de tobas y brechas de flujo, generalmente no soldadas, y termina con una capa delgada de cenizas vítreas de nube piroclástica.

La Formación Tarango tiene aproximadamente 400 m de espesor total. Fue depositada en una superficie de erosión que se desarrolló sobre todas las unidades litológicas anteriores, de manera que puede encontrarse igualmente encima de las rocas cretácicas más antiguas, como encima de los depósitos lacustres del Plioceno Medio; se presenta interestratificada con los Basaltos San Juan.

La edad de la Formación Tarango se estima que corresponde al Plioceno Superior, basado en principios geológicos y geomorfológicos, por lo que se correlaciona con la Formación Atotonilco El

Grande, que se encuentra en la cuenca hidrográfica de los Ríos Amajac y Metztitlán. Según Fries (1962), la acumulación de los sedimentos que la conforman, comenzó debido a una combinación de causas. Indudablemente la extravasación de las lavas máficas de los Basaltos San Juan, continuamente ocasionaron interrupciones locales del desagüe fluvial. El surgimiento de bloques inclinados debidos a movimiento de fallas normales, también pudo haber sido una de las causas de la sedimentación. Un cambio marcado de clima pudo haber iniciado también la sedimentación de los detritos clásticos, que consistiría en el advenimiento de una mayor aridez, caracterizada por la presencia de lluvias torrenciales y periodos de estiaje.

Las secciones geológicas muestran que esta formación está afectada por fallas normales, constituye la mayor parte del relleno granular del valle y sobreyace en discordancia erosional a diferentes unidades más antiguas.

Cuaternario

Derrames de Lava y Conos Cineríticos

Los derrames basálticos de lava y conos cineríticos definidos por Segerstrom (1961) como Basalto del Pleistoceno, posteriormente fueron referidos como Derrames de Lava y Conos Cineríticos de edad cuaternaria por Fries (1962), separándolos de las rocas volcánicas máficas definidas como Basaltos Grupo San Juan, ya que parecen tener menor antigüedad geológica, definida con el criterio de que estos derrames fueron extravasados después de que comenzara a disecarse la Formación Tarango y los conos cineríticos o escoriáceos conservan su forma característica.

Depósitos Clásticos

Corresponden a sedimentos aluviales y fluviales, constituidos por arenas, arcillas y gravas acumuladas sobre la superficie actual del valle y a lo largo del lecho y márgenes de ríos y arroyos. Presenta espesores reducidos y se encuentran cubiertos por suelo residual.

4.2. Geología estructural

Los principales rasgos estructurales corresponden a fallas de tipo normal que se han cartografiado tanto por lineamientos topográficos superficiales, como por el resultado de sondeos geofísicos e interpretación de imágenes de satélite. En general, dan origen a fosas tectónicas donde se han acumulado los sedimentos granulares y volcánicos en los principales valles de la región. Los pilares tectónicos están representados por El Cerro San Miguel al norte y el área de Bomintzhá al sur. Corresponden a remanentes de rocas calcáreas del Cretácico, que se encuentran aflorando, sin embargo, sus flancos se encuentran cortados por fallas generalmente de tipo normal, aunque en la Sierra San Miguel se ha interpretado una falla de tipo recumbente.

Desde el punto de vista estructural, se presenta deformación correspondiente a los dominios dúctil-frágil y frágil. El primero está representado por la presencia de cabalgaduras intraformacionales, entre las cuales destaca la cabalgadura El Tepozán I, dentro de la secuencia de la Formación El Doctor. También está representado por pliegues anticlinales y sinclinales asimétricos muy puntuales y movimientos capa a capa. El dominio frágil está representado por sistemas de fallas normales en dos direcciones: NW-SE y NE-SW, algunas con componente lateral. Entre éstas últimas destacan El Sabino, Moctezuma, La Bruja, La Blanca, El Tepozán, El Taña, Cerro Alto, Atotonilco de Tula y Progreso; entre las de orientación NW-SE se identificaron las fallas La Calavera, San Agustín y Bomintzhá. Adicionalmente, mediante el modelo digital de elevación (MDE) se interpretaron las fallas Mixquiahuala, Tepeitic, Muntepec de Madero, Teltitlán de Juárez, Lechuguilla, La Cruz, Ulapa Melchor Ocampo, Ulapa Melchor Ocampo 1, Potrero del Rincón, Locamayé. El Puerco, Cerro Colorado, Mesa Grande, Lázaro Cárdenas 1 y Lázaro Cárdenas 2, las cuales se consideran representativas de un evento distensivo del sistema NE-SW. Entre las fallas laterales interpretadas destacan Peña Honda y Las Vacas. También se identificaron los lineamientos curvilíneos La Joya y Xithí (Cartas Geológico-Mineras Tula de Allende F14-C88 (2010) y Mixquiahuala F14-C89 (2009) del SGM. Escala 1:50000).

A partir del análisis de imágenes de satélite se identificaron estructuras anulares que pueden relacionarse con domos, calderas o intrusivos cercanos a la superficie y dos sistemas de lineamientos casi rectos con orientación SW-NE y E-W. Los primeros se asocian con posibles calderas localizadas en las inmediaciones del Cerro Colorado, al E-NW del Cerro La Cruz y en la cercanía del Cerro Peña Colorada, además de un lineamiento casi circular localizado al SW, que puede asociarse a una estructura dómica sepultada. Las estructuras sedimentarias forman parte de la estribación poniente de la Sierra Madre Oriental. Son parte de una cadena montañosa compuesta por rocas marinas mesozoicas plegadas que vergen hacia el oriente con un rumbo de plano axial N-S, producto de una fase tectónica de deformación ocurrida del Cretácico Superior a principio del Terciario, que originó además de numerosas estructuras plegadas, corrimientos que dieron lugar a fallas inversas (Carta Geológico-Minera Ixmiquilpan F14C79, SGM 1995. Escala 1:50000).

Existen muy pocas evidencias de los eventos tectónicos ocurridos antes del Turoniano-Campaniano, época en la cual se interrumpe la transgresión marina y el depósito de sedimentos carbonatados y se inicia el levantamiento gradual del norponiente de México, desde el poniente al oriente, que se manifiesta por un importante aporte de sedimentos turbidíticos.

A finales del Cretácico y principios del Terciario, inicia la fase de deformación atribuida a la Orogenia Laramide. Hacia el Mioceno Tardío inició el vulcanismo que dio origen al Eje Neovolcánico, al mismo tiempo que se generaron calderas distribuidas a lo largo de dicha provincia geológica, así como la formación de volcanes hasta la actualidad. El orógeno laramídico propició un estilo de deformación de cobertura con dirección al NW-SE y E-W en menor proporción; mientras que la fase distensiva

postmiocénica superior dio lugar a fallas orientadas N-S. En síntesis, se identifican dos importantes fases de deformación: una compresiva del Cretácico Tardío al Paleoceno; y otra de extensión que ocurre entre el Plioceno y el Pleistoceno, que afecta a toda la secuencia litoestratigráfica. En el Plioceno Tardío, la actividad volcánica alcanza su clímax con el desarrollo de calderas y vulcanismo post-caldera; así como fallamientos de gravedad que delimitaron cuencas endorreicas y fosas tectónicas en donde se acumularon lagos que recibieron aporte de sedimentos lacustres. La etapa culmina con la erupción de basaltos a través de fisuras y conos monogenéticos (Carta Geológico-Minera Tula de Allende F14-C88, SGM 2010. Escala 1:50 000).

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 fluviales y conglomerados que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los arroyos; en su porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas fracturadas de diferente composición, intercaladas con productos piroclásticos. Las tobas y andesitas que forman parte de la porción inferior del acuífero, constituyen el basamento y fronteras al flujo subterráneo en el acuífero, cuando a profundidad desaparece su fracturamiento. A mayor profundidad, el basamento regional está conformado por las calizas de la Formación El Doctor y la secuencia de lutitas, calizas y areniscas de las formaciones Soyatal y Mexcala.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten establecer la presencia de un acuífero tipo **libre a semiconfinado**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por materiales granulares porosos, rocas volcánicas fracturadas y productos piroclásticos, que en conjunto presentan un espesor promedio de 400 m; en su porción inferior está conformado por rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras, barreras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico están representados por las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece su fracturamiento, especialmente las rocas riolíticas Don Guinyó y del Grupo Pachuca, El Grupo El Morro y a mayor profundidad la secuencia de lutitas, limolitas y areniscas que constituyen las formaciones Soyatal y Mexcala.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 2012-2013 se ejecutaron y reinterpretaban 9 pruebas de bombeo de corta duración (4 a 8 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, existe información de al menos 70 pruebas más realizadas en estudios previos (LEASA, 2007; CFE, 1996; THORSA, 2001). De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que los valores de transmisividad varían de **0.015×10^{-3} a $31.97 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . En tanto que la conductividad hidráulica oscila entre **4×10^{-7} y $1.2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$** . En la zona donde predominan los basaltos, los valores de transmisividad varían de 10 a $50 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, en tanto que en las porciones centro y sur del valle, donde afloran principalmente rocas volcánicas, los valores oscilan 1.0 y $10.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

A nivel regional, 12 pruebas de bombeo contaron con pozo de observación para poder estimar el coeficiente de almacenamiento, el cual varía de 0.0002 a 0.2. En la superficie que cubre el acuífero, se obtuvieron valores que varían de 0.005 a 0.01. De manera general, los valores más altos de los parámetros hidráulicos corresponden a las rocas basálticas fracturadas y los menores a los sedimentos aluviales y piroclásticos de grano fino.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información para diferentes años; sin embargo es escasa y dispersa, para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2007-2012.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2012 presentaba valores que variaban de 10 a 50 m, que se incrementan por efecto topográfico desde las zonas cercanas al Río Tepeji y a los arroyos, conforme se asciende hacia los lomeríos. Los valores más someros se localizan hacia el Río Tepeji, cerca de la presa Requena y se profundizan hacia las zonas topográficamente más elevadas (figura 3).

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2012 presenta valores que varían de 2180 msnm que se registran en la porción norte del acuífero, descendiendo gradualmente por efecto de la topografía, al igual que la profundidad, hasta 2040 msnm en la porción central del acuífero, en la zona cercana a la presa Requena. De esta manera se identifica la dirección preferencial del flujo subterráneo de sur a norte, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental (figura 4).

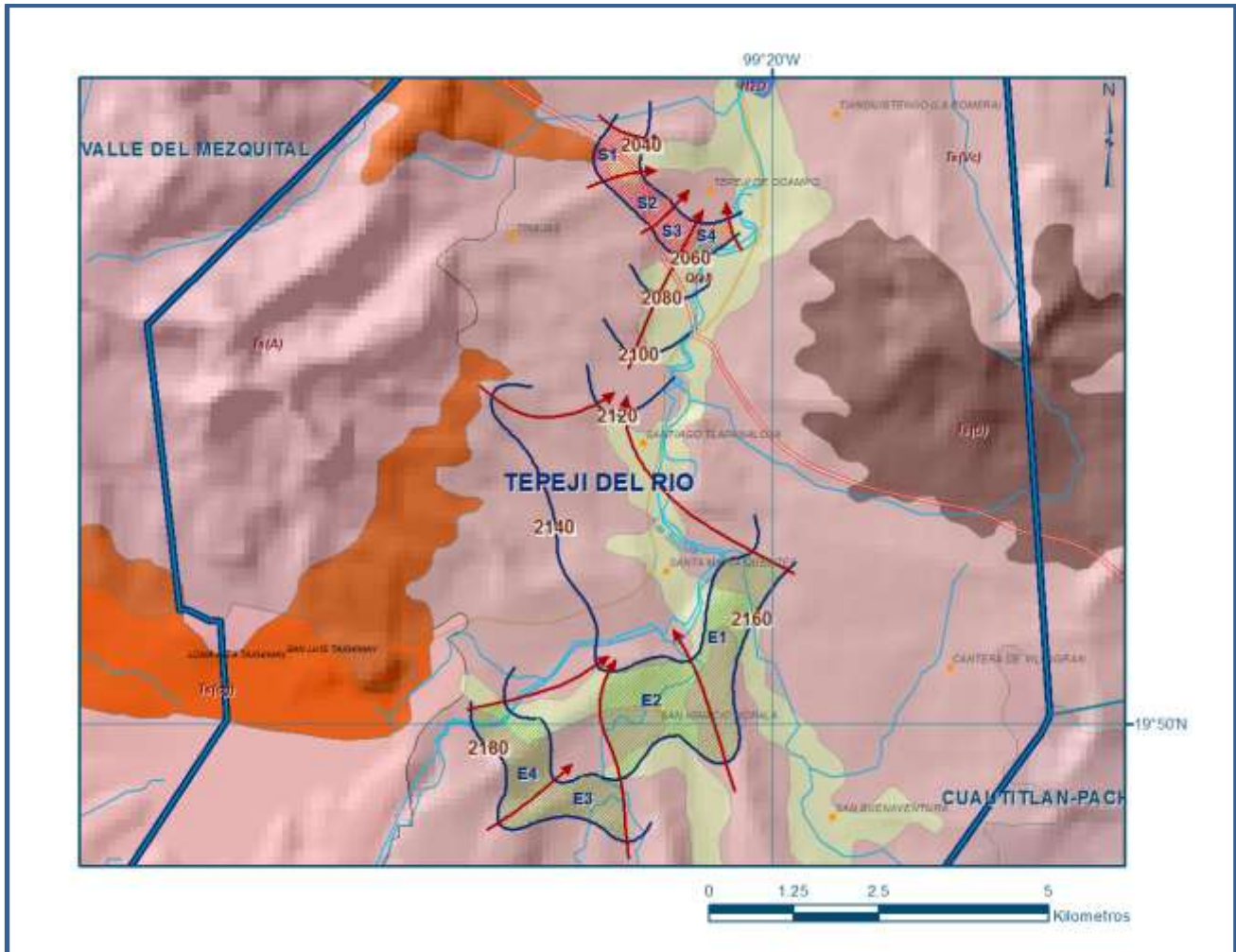


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2012)

5.5. HIDROGEOQUÍMICA Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se tomaron 10 muestras en aprovechamientos distribuidas en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos iones mayoritarios, metales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, etc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y el funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano. La concentración de sólidos totales disueltos presenta valores que varían de 200 a 628 mg/l. los valores de conductividad eléctrica varían de 216 a 844 $\mu\text{mhos/cm}$. En cuanto a la temperatura, los valores oscilan entre 20.3 y 30.5 $^{\circ}\text{C}$, y el pH entre 7.0 y 9.68

En relación a las determinaciones de metales, los fluoruros rebasan el límite máximo permisible (LMP) de 0.01 mg/l que establece la norma mencionada, ya que en dos muestras se registraron concentraciones 1.53 y 1.96 mg/l. Por lo que se refiere al plomo, prácticamente todas las muestras presentan una concentración de 0.02 mg/l, ligeramente por arriba del límite permisible que es de 0.01 mg/l. Se considera que podría corresponder a valores de fondo (naturales de la zona) o bien a un posible error del laboratorio.

Respecto a los análisis bacteriológicos sólo se detectaron coliformes totales en el agua de un manantial, por lo que es posible que se deba a una fuente de contaminación puntual, relacionada con la descarga de aguas negras.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media (C_2) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), lo que indica que es apropiada para su uso en riego.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la sódico-bicarbonatada, que corresponde a agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas 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 2012-2013, se censaron 44 aprovechamientos, 40 activos y 4 inactivos; del total de aprovechamientos 22 son pozos, 15 norias y 7 manantiales. Del total de captaciones 30 son para uso público-urbano, 3 para uso agrícola y 11 para otros usos; que en conjunto extraen un volumen de **7.0 hm³/año**, de los cuales 0.5 hm³ (7.1 %) son para uso agrícola, 6.2 hm³ (88.6%) para uso público-urbano y 0.3 hm³ (4.3%) para otros usos.

Adicionalmente, a través de los **manantiales** se descarga un volumen de **6.5 hm³ anuales**, de los cuales 6.0 hm³ son para para uso público urbano y 0.5 hm³ sin uso reportado.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2007 a 2012, en una superficie de **277.0 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

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

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

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 de un 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_t) 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 (R_v), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, la que se produce a lo largo de los canales de riego (R_c); del agua residual de las descargas urbanas, así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado (R_{pu}) constituyen otra fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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 definida por la expresión:

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

Donde:

R_v : Recarga vertical

R_i : Recarga inducida

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

B : Bombeo

S_h : Salidas por flujo subterráneo horizontal

D_m : Descargas por manantiales

D_{fb} : Descarga por flujo base

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + Sh + D_m + D_{fb} - R_i - E_h \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Recarga inducida (R_i)

Como se mencionó anteriormente, la recarga inducida (R_i) tiene varias componentes: la infiltración de los excedentes del riego agrícola (R_r), de los canales de distribución de agua superficial (R_c) y de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado (R_{pu}). $R_i = R_r + R_c + R_{pu}$

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que 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, el volumen del agua que retorna al acuífero se dedujo del balance hidrometeorológico en el que la evapotranspiración es del 80 %; por lo tanto se considera que aproximadamente un 20% del agua aplicada retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, lo cual es consistente con la permeabilidad media a baja de los sedimentos del subsuelo, la profundidad somera al nivel estático y la existencia de drenes. De esta manera, tomando en cuenta que el volumen neto de agua superficial, aplicado al riego en el distrito de riego es de 12.1 hm^3 al año, de los cuales 11.6 hm^3 corresponden a agua superficial y 0.5 hm^3 son agua subterránea, el volumen por el retorno del riego (**R_r) = 2.4 hm^3** al año.

Para la estimación de la recarga a través de los canales se tomó en cuenta el promedio de los últimos 10 años de los volúmenes totales de entrada a los distritos de riego (volumen bruto) y el volumen real que reciben los módulos (volumen neto). La diferencia entre ellos se considera que de manera aproximada representa la infiltración a lo largo de los canales de distribución. De esta manera si el volumen bruto es de 16.5 hm^3 anuales y el volumen neto es de 11.6 hm^3 anuales, la recarga a lo largo de los canales (R_c) es de 4.9 hm^3 al año, que representa aproximadamente el 30% del volumen bruto. Por lo tanto **$R_c = 4.9 \text{ } hm^3 \text{ anuales}$** .

Por otra parte, el volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 12.2 hm^3 , de los cuales 6.2 hm^3 corresponden a agua subterránea y 6.0 hm^3 al agua procedente de los manantiales. Considerando que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y que un 30 % de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las fugas en la red de distribución de agua potable y en el sistema de alcantarillado; el volumen de recarga de este tipo R_{pu} es de **3.7 hm^3 anuales**

Por lo tanto la recarga inducida $R_i = R_r + R_c + R_{pu}$.

$$R_i = 2.4 + 4.9 + 3.7 = 11.0$$

$R_i = 11.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2012, mostrada en la figura 4. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

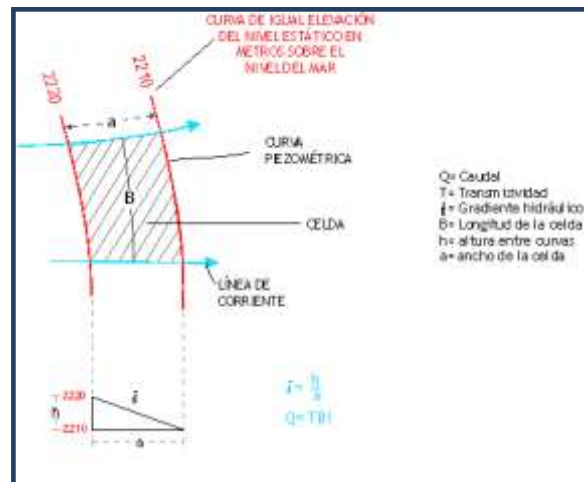
$$Q = B \cdot i \cdot T$$

Donde:

B= Largo del canal de flujo;

i= Gradiente hidráulico (i);

T= Transmisividad en el canal de flujo;



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 y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **5.6 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en el año 2012 y otros previos, adaptados al espesor saturado de cada zona

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal (2012)

CELDA	LONGITUD B m	ANCHO a m	GRADIENTE HIDRAULICO i	TRANSMISIVIDAD T m ² /s	CAUDAL Q m ² /s	VOLUMEN hm ³ /año
E-1	712	1586	0.0281	0.001	0.045	1.4
E-2	606	1197	0.0330	0.001	0.040	1.2
E-3	1163	1496	0.0172	0.001	0.026	0.8
E-4	683	2274	0.0293	0.001	0.067	2.1
TOTAL						5.6

7.2. Salidas

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

7.2.1. Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **7.0 hm³/año**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las descargas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático (figura 4). El valor calculado es de **4.1 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal (2012)

CELDA	LONGITUD B m	ANCHO a m	GRADIENTE HIDRAULICO i	TRANSMISIVIDAD T m ² /s	CAUDAL Q m ² /s	VOLUMEN hm ³ /año
S-1	649	628	0.0308	0.0013	0.025	0.8
S-2	454	823	0.0441	0.0012	0.044	1.4
S-3	479	444	0.0418	0.0012	0.022	0.7
S-4	397	604	0.0504	0.0013	0.040	1.2
TOTAL						4.1

7.2.3. Descarga a través de manantiales (Dm)

A través de los 7 manantiales se descarga un caudal de 206 lps, que equivalen a un volumen anual de **6.5 hm³/año**.

7.2.4. Descarga por flujo base (Dfb)

De acuerdo con los aforos realizados en el Río Tepeji en distintas fechas durante el periodo de estiaje de 2012, el caudal promedio es de 910 lps, que representan un volumen de **28.7 hm³ / año**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la evolución del nivel estático para el periodo 2007-2012. Durante este periodo de tiempo los niveles del agua subterránea no mostraron variaciones significativas por lo que para fines de balance el cambio de almacenamiento se considera nulo. **$\Delta V(S) = 0.0 \text{ hm}^3 / \text{año}$** .

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la expresión (2), establecida anteriormente:

$$R_v = B + Sh + D_m + D_{fb} - R_i - E_h \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 7.0 + 4.1 + 6.5 + 28.7 - 11.0 - 5.6 + 0.0$$
$$R_v = 29.7 \text{ hm}^3$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (R_t) es igual a la suma de las entradas:

$$R_t = R_v + E_h + R_i$$
$$R_t = 29.7 + 5.6 + 11.0$$
$$R_t = 46.3 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la siguiente expresión:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS: Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica

Rt: Recarga total media anual

DNCOM: Descarga natural comprometida

VCAS: Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **46.3 hm³/año**; de los cuales 35.3 hm³ corresponden a la recarga natural y 11.0 hm³ son recarga inducida.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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

Para este caso, el volumen considerado como descarga natural comprometida que corresponde a la suma de la descarga a través de flujo base (Dfb) 28.7 hm³ y la descarga a través de manantiales (Dm) 6.5 hm³. Por lo tanto la **DNCOM** es de **35.2 hm³/año**.

8.3. Volumen concesionado de agua subterránea (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2013**, es de **9'636,374 m³/año**.

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA.

$$\begin{aligned} \text{DAS} &= \text{Rt} - \text{DNCOM} - \text{VCAS} \\ \text{DAS} &= 46.3 - 35.2 - 9.636374 \\ \text{DAS} &= 1.463626 \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **1'463,626 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2001. Actualización Geohidrológica del Acuífero Tepeji del Río, estado de Hidalgo. Realizado por Thorsa, S.A. de C.V.

Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado (CEAA) del estado de Hidalgo, 2007. Estudio Hidrogeológico del Acuífero Tepeji del Río, Hidalgo. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua. 2012. Estudios técnicos de geohidrología, calidad del agua, tenencia de la tierra y aspectos sociales en la zona de captación para el “Sistema Mezquital para el abastecimiento de agua en bloque al Valle de México e Hidalgo”. Elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C. V.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2010. Análisis técnico y pruebas de potabilización del agua del acuífero del Valle del Mezquital, en diversos municipios del Estado de Hidalgo.

Sistema de Aguas de la Ciudad de México. 2009. Estudio de factibilidad técnica-económica-financiera y social del sistema de extracción-captación, conducción y entrega del agua del acueducto Valle del Mezquital-Zona Metropolitana del Valle de México. Elaborado por FG y Asociados.

Servicio Geológico Mexicano, 1995. Carta Geológico-Minera Ixmiquilpan F14C79. Escala 1:50000

Servicio Geológico Mexicano, 2009. Carta Geológico-Minera Mixquiahuala F14-C89. Escala 1:50,000

Servicio Geológico Mexicano, 2010. Carta Geológico-Minera Tula de Allende F14-C88. Escala 1:50,000.