CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO TEMASCALTEPEC (1509), ESTADO DE MÉXICO

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 4
3. FISIOGRAFÍA 5
3.1 Provincia Fisiográfica 5
3.2 Clima 5
3.3 Hidrografía 5
4. GEOLOGÍA 6
4.1 Estratigrafía 6
4.2 Geología estructural 8
4.3 Geología del subsuelo 8
5. HIDROGEOLOGÍA 9
5.1 Tipo de acuífero 9
5.2 Parámetros hidráulicos 10
5.3 Piezometría 10
5.4 Comportamiento hidráulico 10
5.4.1 Profundidad al nivel estático 10
5.4.2 Elevación del nivel estático 12
5.4.3 Evolución del nivel estático 13
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 13
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 13
7.1 Entradas 14
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 15
7.2 Salidas 17
7.2.1 Extracción por bombeo (B) 17
7.2.2 Descarga natural por flujo base (Dfb 17
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) 18
8. DISPONIBILIDAD 18
8.1 Recarga total media anual (R) 19
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 19
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 19
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 20

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 Temascaltepec, definido con la clave 1509 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroeste del estado de México, entre los paralelos 18°49'58.9" y 19°08' 37.0" latitud norte y entre los meridianos 99°51'17.9" y 100°36.0' 46.2" longitud oeste. Tiene una superficie aproximada de 1,410 km^2.

Colinda al norte con el acuífero Villa Victoria-Valle de Bravo, al sur con Altamirano–Cutzamala, al este con Tenancingo, todos en el estado de México y al oeste con Huetamo en el estado de Michoacán de Ocampo (figura 1).

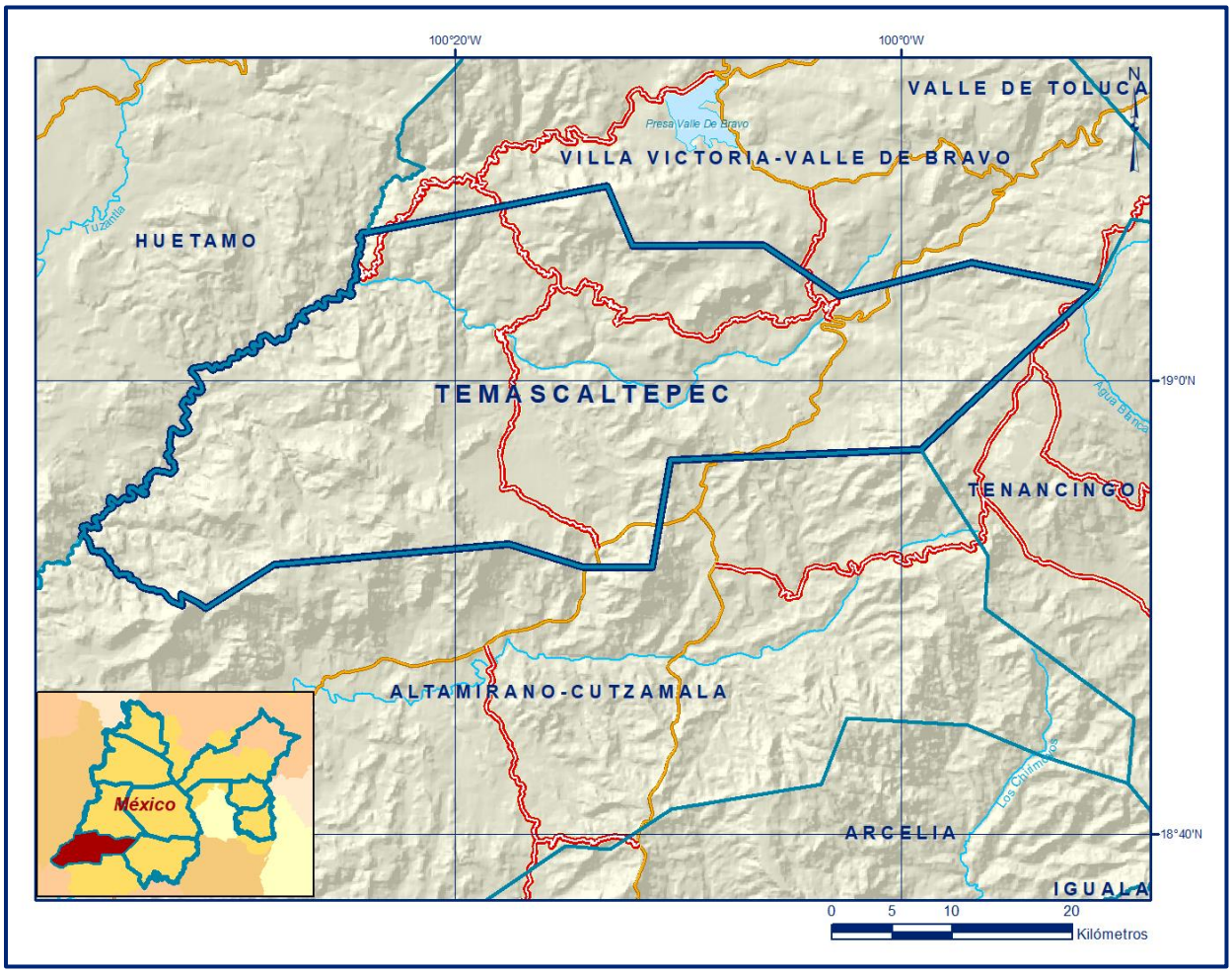

Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente abarca completamente el municipio Zacazonapan y parcialmente Otzoloapan, San Simón de Guerrero, Tejupilco, Temascaltepec, Valle de Bravo y una pequeña porción de Texcatitlan. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 1.

ACUIFERO 1509 TEMASCALTEPEC							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	23	56.6	19	6	33.0	
2	100	13	11.8	19	8	37.0	
3	100	12	2.6	19	5	58.4	
4	100	6	9.6	19	6	1.4	
5	100	2	45.9	19	3	45.5	
6	99	56	49.6	19	5	12.5	
7	99	51	17.9	19	4	6.0	
8	99	59	8.2	18	56	58.2	
9	100	10	21.0	18	56	30.1	
10	100	11	10.2	18	51	47.0	
11	100	14	15.5	18	51	46.3	
12	100	17	35.0	18	52	48.3	
13	100	28	6.2	18	51	54.1	
14	100	31	10.6	18	49	58.9	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	100	36	46.2	18	53	10.2	DEL 15 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	100	23	56.6	19	6	33.0	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Temascaltepec, pertenece al Organismo de Cuenca Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de México. Su territorio completo se encuentra 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 limites 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 10 de julio de 1978, esta veda se clasifica como tipo II, que solo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El principal usuario es el agrícola. En su territorio no existen Distritos de Riego y actualmente no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se ha llevado a cabo el siguiente estudio:

ESTUDIOS DE REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE: VILLA VICTORIA-ZACAZONAPAN Y TEMASCALTEPEC, ESTADO DE MEX.; VALLE DE CADEREYTA Y SAN JUAN DEL RÍO, QRO.; AJACUBA Y ZIMAPÁN, HGO, elaborado por la empresa Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente, S.C. para la Comisión Nacional del Agua, en 2004.

Sus objetivos principales fueron: diseñar una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica de los acuíferos en estudio, mediante la ubicación, inspección y selección en campo, de pozos de monitoreo.

Conocer la evolución y la condición actual de los niveles del agua subterránea, así como las tendencias que se presentan inducidas por causas naturales o antropogénicas, mediante recorridos piezométricos.

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

El acuífero Temascaltepec se encuentra en la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre del Sur y en la Subprovincia Depresión del Balsas.

3.2 Clima

El clima de la región donde se localiza el acuífero Temascaltepec es del tipo Acw Semicálido subhúmedo con lluvias en verano y del tipo A (w) Cálido subhúmedo con lluvias en verano.

De acuerdo con el análisis de las estaciones climatológicas, la temperatura media anual promedio es de 20.3° C, la precipitación media anual es de 1 158 mm. La evaporación potencial es del orden de 900 mm/año.

3.3 Hidrografía

El acuífero Temascaltepec pertenece a la Región Hidrológica 18 Balsas. Subregión 18 B Medio Balsas. Cuenca del Río Cutzamala. La principal corriente superficial es el río Temascaltepec, que se origina con la unión de los ríos Verde y del Vado, los cuales descienden del Nevado de Toluca hasta el sitio en el cual funcionó la estación hidrométrica Paso del Cobre. Aguas abajo el río Temascaltepec recibe por su margen izquierda al arroyo Los Sabinos. No existen presas de almacenamiento de agua, únicamente algunos puntos de control para determinar los escurrimientos del río. Existen también algunos manantiales.

4. GEOLOGÍA

Regionalmente, la zona se encuentra dentro de dos provincias geológicas que son la Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre del Sur, mismas que están representadas por afloramientos de rocas de origen ígneo, sedimentario y metamórfico, las rocas ígneas extrusivas y metamórficas son las que ocupan una mayor extensión (figura 2).

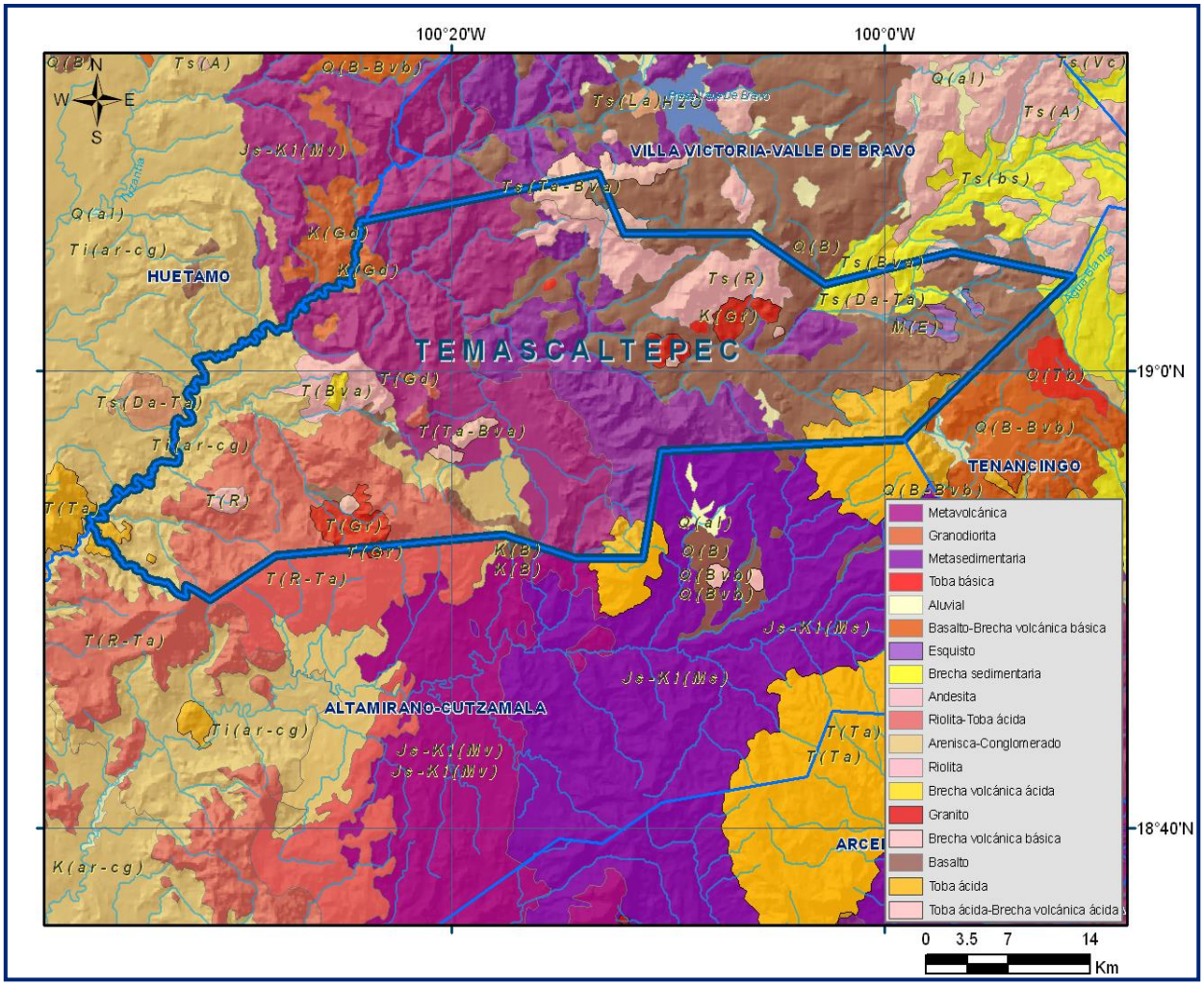

Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Por su edad, las rocas presentes dentro de la zona, datan desde el Triásico (rocas metamórficas) hasta el Cuaternario, y estas últimas están representadas por rocas ígneas de composición basáltica, así como por depósitos lacustres y aluviales.

Estratigráficamente las rocas que pertenecen a la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, cubren principalmente la parte norte del estado y está caracterizada por el predominio de rocas volcánicas cenozoicas que datan del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario; sin embargo, en esta provincia existen algunos afloramientos de rocas triásicas como filitas y pizarras, así como rocas sedimentarias marinas de composición carbonatada del Cretácico.

Con respecto a las rocas del Cuaternario, existen depósitos lacustres y aluviales, que rellenan antiguos lagos de la Cuenca de México, así como algunos valles de la Cuenca del Lerma. Las principales estructuras de esta provincia son los aparatos volcánicos formados por conos cineríticos y derrames de lava principalmente de composición andesítica.

Por otro lado, las rocas que forman parte de la provincia geológica Sierra Madre del Sur, pertenecen a la subprovincia conocida como Cuenca del Balsas, la cual penetra en la zona y cubre la porción sur de la entidad.

Las rocas más antiguas de esta provincia están representadas por rocas metamórficas del Triásico. Las rocas del Cretácico son sedimentarias, entre las que se encuentran afloramientos de calizas y calizas interestratificadas con lutitas; aunque no cubren una gran extensión, estas rocas afloran discordantemente y cubren a las rocas metamórficas del Triásico. Las rocas del Paleógeno-Neógeno son en su gran mayoría volcánicas, así como las del Cuaternario que se encuentran representadas por rocas volcánicas de composición basáltica.

En lo que se refiere a la secuencia estratigráfica, la unidad más antigua que aflora en la zona es la Formación Arcelia, que es una secuencia vulcanosedimentaria formada por lavas de composición basáltico-andesítica, tobas y areniscas de cuarzo, todas ligeramente metamorfoseadas. Sobreyaciendo a las rocas antes descritas se encuentra la Formación Tilzapotla compuesta de brecha volcánica riolítica, tobas líticas y tobas finas de composición riolítica y dacítica.

Como último evento volcánico de la región se encuentran los derrames del Cuaternario, compuestos de basaltos y andesitas, que son, además, los que cubren una extensa zona del área. Finalmente, en algunas zonas bajas, se encuentran depósitos aluviales, compuestos de arenas, gravas y conglomerados, junto con otros depósitos fluviales y de talud recientes.

4.2 Geología estructural

Las secuencias mesozoicas presentan deformación dúctil. Los esquistos presentan tres fases de deformación; las esquistocidades se asocian a pliegues isoclinales con ejes orientados NW-SE preferentemente.
En el subterreno Huetamo-Arcelia se observan estructuras de deformación en su porción basal, mientras que en las porciones superiores sólo se desarrollan asociadas a pliegues recostados (Carácuaro y Tzitzio) y a cabalgaduras.

La deformación frágil se presenta con fallas normales de orientación N 40° a 80° E y de N 50° a 80° W. En las secuencias volcánicas cenozoicas las direcciones principales son de N 60° a 90° E que indican esfuerzos compresivos máximos en esta dirección y casi subhorizontal, con componentes laterales siniéstrales E-W, (fallas Morelia, Los Azufres y Tlalpujahua). Asimismo, existen grandes basculamientos.

4.3 Geología del subsuelo

La unidad más antigua es una secuencia metasedimentaria que aflora en el núcleo del anticlinal de Tzitzio; que corresponde a esquistos, filitas, cuarcitas, metareniscas y radiolaritas de facies esquistos verdes. Al sur aflora una diorita que intrusiona únicamente al Complejo Metamórfico y comparte su deformación.

En el sureste aflora la unidad Arcelia, constituida por una secuencia de rocas volcánicas de composición basáltico-andesítica con brechas, aglomerados y lavas en coladas y almohadillas, intercaladas con sedimentos terrígenos y radiolaritas. La base de la unidad Arcelia no se observa, el contacto superior se observa en la zona de Jungapeo-20 de Noviembre y se manifiesta como un cambio transicional a una secuencia de areniscas y limolitas, conglomerados y calizas.

En la localidad El Pilón-Tiamaro esta relación se observa tectónica producto de movimientos subhorizontales de la secuencia terrígena. La secuencia pasa transicionalmente a capas rojas constituidas por una alternancia de conglomerados, areniscas, limolitas y horizontes de caliza.

En la Presa del Bosque en Zitácuaro aflora un intrusivo de composición diorítica; aparentemente es cubierto por la unidad Arcelia sin mostrar evidencias de intrusión. Al sureste la unidad Arcelia se encuentra afectada por un intrusivo de composición granítica a granodiorítica.

En la región de Carácuaro aflora un intrusivo granítico de dimensiones batolíticas que afecta a los conglomerados y al complejo metamórfico principalmente. Las unidades antes descritas comparten una cubierta cenozoica predominantemente volcánica.

En discordancia sobre las unidades mesozoicas se depositan las secuencias volcánicas de la Sierra Madre Occidental que ocupan parte de la zona centro-oriental. A la base afloran andesitas afectadas por un intrusivo granítico-granodiorítico. En el extremo sureste, aflora una secuencia de conglomerados, areniscas y limolitas correlacionables con la Formación Balsas.

Cubriendo discordantemente aflora un paquete volcánico de riolitas, conglomerados volcánicos, ignimbritas, tobas riolíticas, andesitas y tobas andesíticas. Posterior al vulcanismo de la Sierra Madre Occidental se genera el vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana distribuido ampliamente en la zona. Primeramente, se depositan basaltos, andesitas y dacitas.

Para el Plioceno el volcanismo se manifiesta como domos, conos, piroclastos y maars de composición andesítica, basáltica y riolítica. El Pleistoceno está representado por basaltos en estructuras de conos y volcanes en escudo. En el Holoceno se desarrollan volcanes monogenéticos, conos cineríticos y maars que coronan a las unidades anteriores.

Las últimas pulsaciones volcánicas produjeron materiales piroclásticos riolíticos en avalanchas (lahares). Finalmente se depositan sedimentos lacustres que se observan principalmente en el sector nor-noroeste.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Con base en las unidades hidrogeológicas descritas anteriormente, se considera que el acuífero es de **tipo libre.** Existen tres unidades hidrogeológicas cuyo comportamiento se describe a continuación:

Materiales de permeabilidad alta que constituyen zonas de recarga y/o acuíferos de potencialidad alta. En esta unidad hidrogeológica se agrupan los derrames volcánicos y los depósitos aluviales.

Son materiales que están constituidos por materiales granulares y por rocas fracturadas, principalmente de composición básica; se agrupan debido a su alta permeabilidad, lo que les permite constituir acuíferos de alta potencialidad, así como zonas de recarga importantes. En el caso de los materiales granulares, su potencialidad es menor por su reducido espesor y extensión lateral.

Materiales de permeabilidad media que constituyen zonas de recarga y/o acuíferos de potencialidad media. Estas unidades comprenden a rocas que presentan permeabilidad media a alta, originada principalmente por fracturamiento. La mayor parte de estas unidades están conformadas por rocas ígneas extrusivas de composición intermedia; en las zonas en donde afloran, constituyen zonas de recarga y en el subsuelo conforman acuíferos de potencialidad media.

Materiales de permeabilidad baja que constituyen zonas de barreras. En esta unidad hidrogeológica se agrupa a las rocas metamórficas que se localizan en la parte suroccidental del área; debido a su litología y fracturamiento escaso y discontinuo, su permeabilidad puede ser de baja a prácticamente nula. Por esta razón en superficie el agua de precipitación sólo escurre sobre ellas, mientras que en el subsuelo constituyen barreras al movimiento del agua.

5.2 Parámetros hidráulicos

No se dispone de esta información debido a que no se han realizado pruebas de bombeo.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible para 2004.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en la zona de Temascaltepec, está asociada a la topografía y a la posición de los materiales que presentan diferente permeabilidad; de esta manera, se tiene una gran cantidad de pequeños valles intermontanos, en donde la profundidad del nivel del agua es muy diferente entre uno y otro, lo que aunado a la escasa y heterogénea distribución de las obras, la diferencia de nivel entre pozos y norias relativamente cercanos, que evidencian la presencia de varios niveles piezométricos, no permitieron en su conjunto, tener una continuidad en la

configuración de toda la zona. Las menores profundidades se localizan en pozos y norias ubicados en la comunidad de Villa de Luvianos, donde los valores encontrados varían entre 1 y 2 m de profundidad.

Hacia el sureste de Temascaltepec, en las inmediaciones de la población de San Simón de Guerrero, se localizaron varias norias que tienen una profundidad al nivel estático mayor a 10 m. No obstante, lo anterior, con la información obtenida se pudo establecer de manera general el comportamiento piezométrico de la región (figura 3).

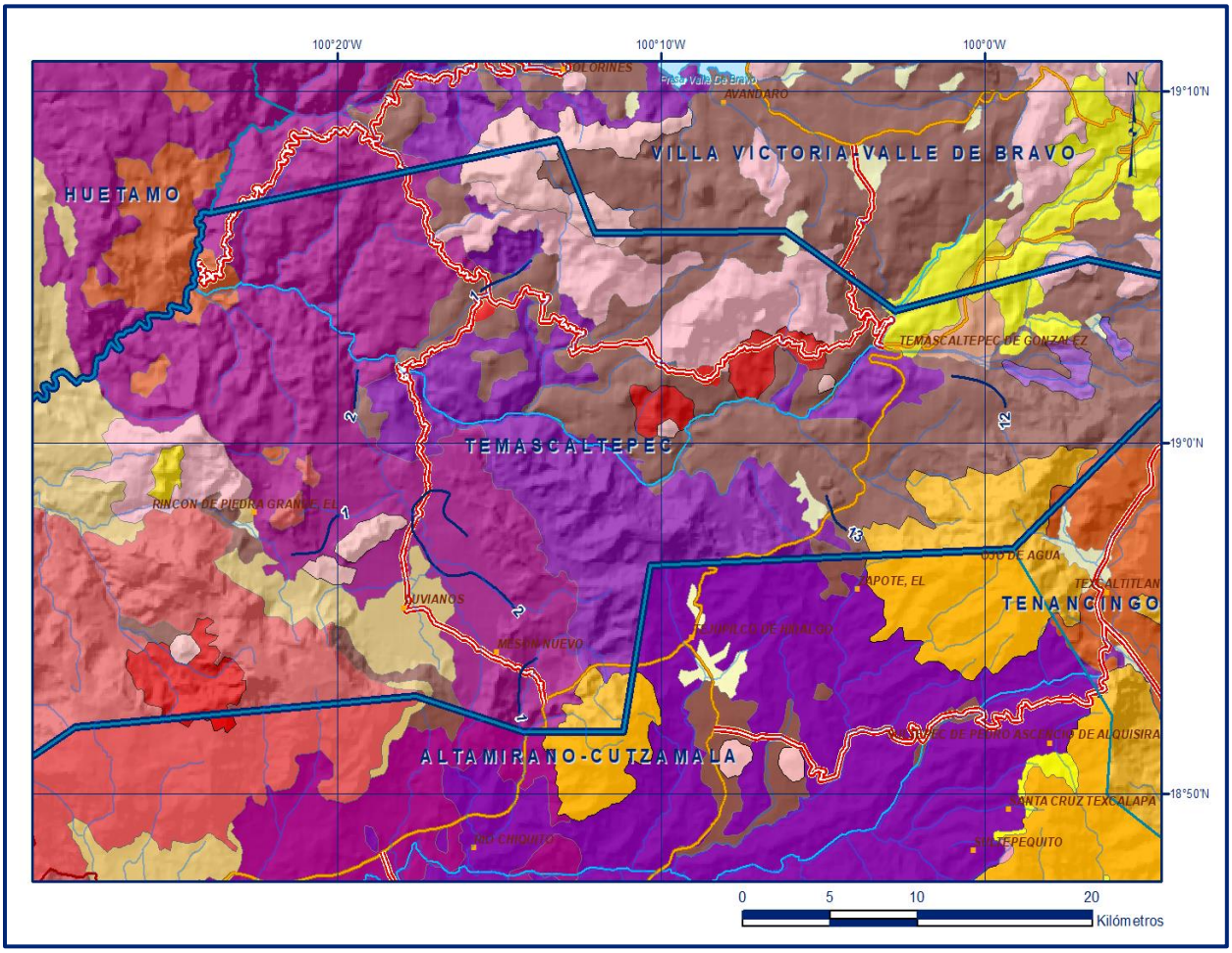

Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2004)

De acuerdo con los recorridos de campo llevados a cabo recientemente, se observa que se han excavado algunas norias, que sirven además como cárcamos para almacenar el agua de algunos manantiales; desde los cuales se rebombea a tanques de distribución ubicados en sitios topográficamente más altos.

Ante la falta de continuidad en la configuración de todo el acuífero, a continuación, se presentan los valores de profundidad representativos para las zonas que se indican; cabe mencionar que esta división se hizo de manera convencional con la finalidad de agrupar pozos o norias relativamente cercanos; grupos que no representan un mismo nivel piezométrico, pero si permiten tener una idea de la variación de éste.

5.4.2 Elevación del nivel estático

El comportamiento de las curvas de igual elevación del nivel estático, para la zona de Temascaltepec, presentó la misma problemática que la de profundidad descrita en párrafos anteriores, es decir, la errática distribución de las obras, así como la propia topografía de la zona, ocasionó una falta de continuidad en las equipotenciales; no obstante esta situación, se pudo establecer de manera general, que en todos los pequeños valles intermontanos, la recarga proviene principalmente de las estribaciones de los cerros que los rodean, mientras que la dirección de flujo es radial y concéntrica a los mismos.

Al suroeste de Temascaltepec se observa que la dirección de flujo proviene de la comunidad de Cuadrilla de López hacia Villa de Luvianos, siguiendo el curso del arroyo Los Sabinos. En esta zona es donde se pudo elaborar una pequeña configuración.De acuerdo a las equipotenciales se puede observar un comportamiento en forma escalonada desde la zona de Temascaltepec hasta Villa de Luvianos. En la zona central del acuífero las elevaciones varían de 1,110 a 1,200. En la zona de Zacazonapan la elevación es de 1,350 msnm y hacia San Simón al oriente del acuífero las elevaciones son de 2,120 msnm (figura 4).

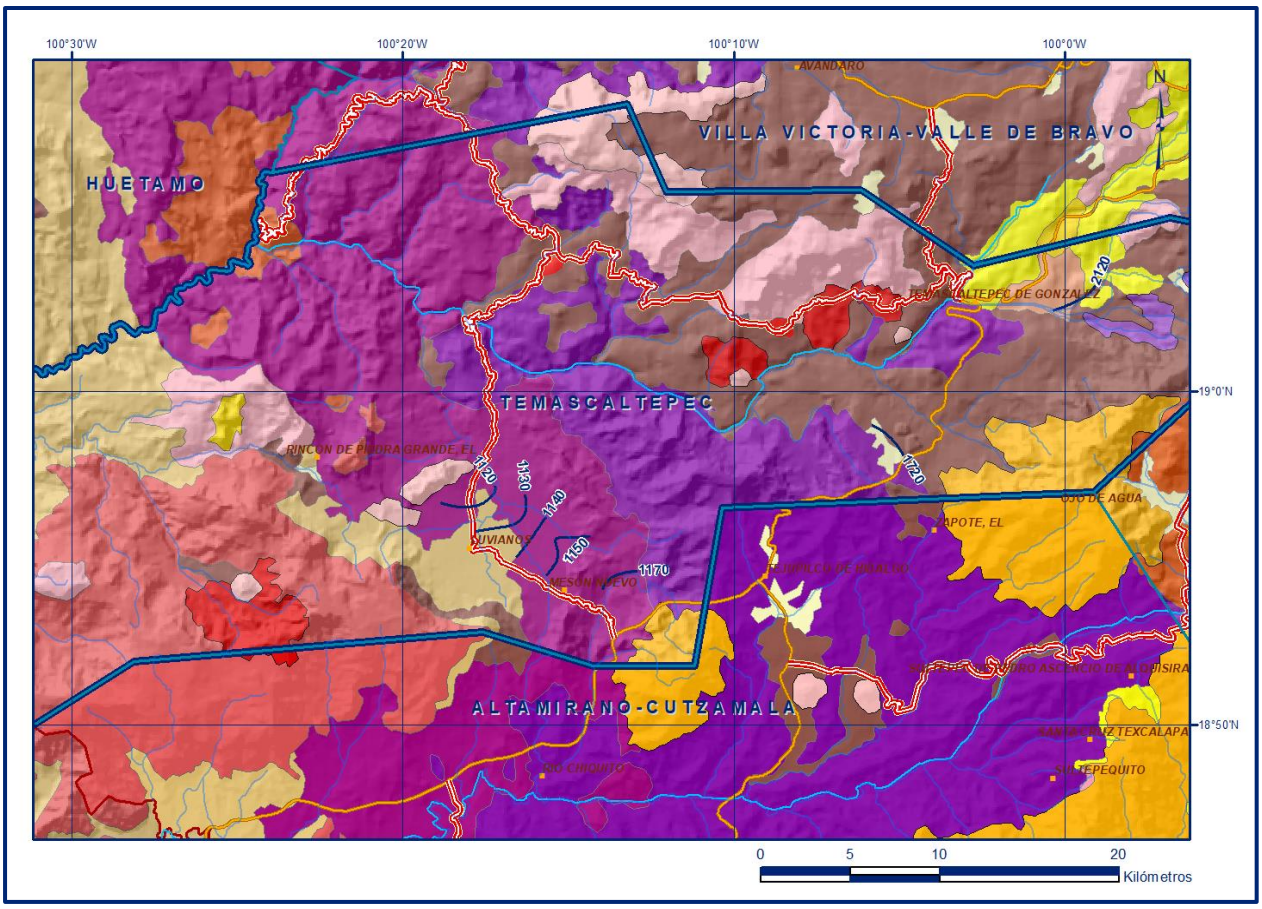

Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2004)

5.4.3 Evolución del nivel estático

No se tiene información piezométrica para describir la evolución de los niveles estáticos, pero basta comparar la recarga contra el bombeo, para deducir que los niveles del agua subterránea no registran alteraciones importantes a lo largo del tiempo.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

La extracción en el acuífero Temascaltepec es de 2.6 hm^3/año, destinado casi en su totalidad para satisfacer las necesidades del uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 anualmente por el almacenamiento del acuífero. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

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

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

Existe una gran dispersión de los escasos datos piezométricos, por lo que se decidió plantear la ecuación de balance para una zona de balance de 1 410km^2. La ecuación de balance definida es:

$$Rv - B - Dn - Dfb = \Delta V(S) \qquad (1)$$

Dónde:
Rv= Recarga vertical;
B= Bombeo;
Dn= Descarga natural;
Dfb= Descarga por flujo base;
ΔV(s)= Cambio de almacenamiento;
De esta manera, despejando la componente de Descarga natural que es el dato que se desconoce la ecuación queda definida de la siguiente forma:

$$Rv - B - Dfb \pm \Delta V(S) = Dn \qquad (2)$$

7.1 Entradas

Las entradas al acuífero Temascaltepec están integradas básicamente por las recargas naturales que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle. No se cuenta con información hidrogeológica para toda la superficie del acuífero. La información disponible es puntual e inconsistente en el tiempo, de tal manera que no es posible extrapolar la información para elaborar configuraciones del nivel estático.

Aunado a la escasa extracción del agua subterránea, la región está conformada casi en su totalidad por serranías, existiendo entre ellas pequeños valles intermontanos que es donde se localizan los aprovechamientos de agua subterránea.

Por esta razón, se optó por plantear el balance hidrometeorológico para estimar el volumen de agua susceptible de infiltrarse y recargar al acuífero.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical se estimó considerando la infiltración de agua de lluvia, para ello se realizó un balance hidrometeorológico, de este balance se determinó el volumen susceptible de infiltrarse. Para realizar el balance hidrometeorológico se requiere conocer, entre otros parámetros, los volúmenes de escurrimiento que se presentan por lluvia dentro del área, es decir, el volumen de agua que se genera en la misma cuenca.

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se puede utilizar el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 17 de abril de 2002, que señala que en caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento.

El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento (Ce) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo. Con la finalidad de obtener un valor de K más representativo de la realidad, en vez de asignar un valor de K único para todo el acuífero, se dividió el acuífero en dos zonas, de acuerdo con los materiales geológicos que afloran y con la cobertura vegetal; se obtuvieron las áreas para estos dos tipos de suelos, y se calculó K como un promedio ponderado.

En la porción suroeste del acuífero afloran rocas metamórficas e intrusivas, clasificadas como suelo tipo C, casi impermeable y abarcan una superficie aproximada de 705 km^2, (50 % del total del acuífero). En esa porción la cobertura de bosque es del 75 %, por lo que para esa superficie se consideró un valor de K igual a 0.24. En el resto del acuífero, 705 km^2 (50 %) afloran materiales de permeabilidad media como rocas volcánicas fracturadas y material aluvial, por lo que se clasificó como suelo tipo B. En esta porción la cobertura de bosque es aproximadamente del

25 %. Por ello para esta zona se asignó un valor de K igual a 0.28. El valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.26, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento:

$$Ce = K\,(P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$$

Donde:
Ce = Coeficiente de escurrimiento;
P = precipitación media anual en mm;
Se obtiene un coeficiente de escurrimiento de Ce =0.1914

El área considerada es de 1 410 km^2 y la lámina de precipitación promedio de 1 158 mm/año, de la multiplicación de estos dos valores se obtiene el volumen precipitado que es de 1 632.8 hm^3/año; al multiplicar este por el coeficiente de escurrimiento se obtiene el volumen de escurrimiento anual, que es de 312.5 hm^3. Para conocer el volumen de infiltración por lluvia que se presenta en el sistema, se realizó el balance de agua superficial con apoyo en la fórmula de Turc para determinar la evapotranspiración y dejar como incógnita a la infiltración para lo cual se aplicó la siguiente expresión:

Infiltración = precipitación – evapotranspiración - escurrimiento

Para determinar la evapotranspiración real (ETR), se hizo uso de la fórmula de Turc, la cual indica que:

Fórmula de Turc:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \qquad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	20.3		
P(mm) =	1158	P^2 =	1340964
L =	1225.77135	L^2 =	1502515.4
ETR (mm)	864.9		

Donde:
ETR = evapotranspiración real en metros/año;
P = precipitación en m/año;
T = Temperatura media anual en °C;

Como se señaló anteriormente en el área donde se localiza el acuífero la precipitación promedio anual es de 1 158 mm/año; el volumen total precipitado de 1 632.8 hm^3/año. La temperatura promedio anual considerada ésta es de 20.3° C, utilizando la ecuación de Turc para estimar la evapotranspiración, se obtiene un valor de 864.9 mm/año, que multiplicado por el área total da un volumen evapotranspirado de 1 219.5 hm^3/año.

Sustituyendo los valores de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento, antes calculados, en la ecuación que se planteó para obtener el volumen infiltrado, se tiene:

$$\text{Infiltración} = 1632.8 - 1219.5 - 312.5 = 100.8 \text{ hm}^3\text{/año}$$

Al dividir este volumen anual promedio infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 1 632.8 hm^3/año, se obtiene el coeficiente de infiltración, el cual resulta de 0.062.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 100.8 hm^3/año en los 1410 km^2 de superficie del acuífero. Por lo que **Rv= 100.8 hm^3/año.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y flujo base de los ríos (Dfb).

Debido a que se carece de suficiente información piezométrica con una adecuada distribución, que permita generar configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático, así como una red de flujo confiables para todo el acuífero, no es posible calcular las descargas por evapotranspiración ni las salidas por flujo subterráneo horizontal; por lo que se dejarán como incógnitas en la ecuación de balance

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **2.6 hm^3/año**.

7.2.2 Descarga natural por flujo base (Dfb

De acuerdo con la información hidrométrica de la Estación Temascaltepec, se observa un gasto medio mensual mínimo de aproximadamente 3 m^3/s durante los meses de estiaje, lo que se interpreta como un flujo base del orden de **94.6 hm^3/año.**

Existen también descargas naturales por evapotranspiración y salidas subterráneas, sin embargo, debido a la escasa información piezométrica no se tienen los elementos necesarios para cuantificarlas por separado.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Considerando que en el acuífero no existe una explotación fuerte (2.6 hm^3/año) contra los 100.8 hm^3/año de su recarga natural; además de que no se observan evoluciones de los niveles estáticos en las zonas con escasa información piezométrica, se deduce que el cambio de almacenamiento es nulo, es decir, **ΔVS = 0.**

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, falta por conocer la parte de las salidas correspondientes a las salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) y por evapotranspiración (ETR), que se denominarán Descargas naturales (Dn).

Despejando este término de la ecuación (2) definida, se tiene:

$$Rv - B - Dfb \pm \Delta V(S) = Dn \qquad (2)$$

$$Dn = 100.8 - 2.6 - 94.6 - 0$$

$$Dn = 3.6$$

8. DISPONIBILIDAD

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

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO **=** RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL **-** DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA **-** EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **100.8 hm³/año,** todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

La descarga comprometida, para este caso, corresponde a la descarga natural por flujo base que es igual a **94.6 hm³/año.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **1,613,712 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS}$$
$$\mathbf{DMA = 100.8 - 94.6 - 1.613712}$$
$$\mathbf{DMA = 4.586288\ hm^3/año.}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **4,586,288 m³ anuales.**